

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ
ORLANDO XAVIER DA SILVA NETO**

**ENERGIA RENOVÁVEL: Reaproveitamento da
Biomassa da Casca de Arroz em Caldeiras do Tipo
Aquatubular**

**Taubaté - SP
2019**

ORLANDO XAVIER DA SILVA NETO

**ENERGIA RENOVÁVEL: Reaproveitamento da
Biomassa da Casca de Arroz em Caldeiras do Tipo
Aquatubular**

Trabalho de Graduação apresentado para
obtenção do Certificado de Graduação do
curso de Engenharia Mecânica do
Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Taubaté.

Orientadora: Prof. Me. Maria Regina
Hidalgo de Oliveira Lindgren

Coorientador: Prof. Me. Paulo Cesar
Correa Lindgren

**Taubaté – SP
2019**

SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas / UNITAU

S586e Silva Neto, Orlando Xavier da
Energia renovável: reaproveitamento da biomassa da casca de arroz em
caldeiras do tipo aquatubular / Orlando Xavier da Silva Neto. -- 2019.
39 f. : il.

Monografia (graduação) – Universidade de Taubaté, Departamento de
Engenharia Mecânica e Elétrica, 2019.

Orientação: Profa. Ma. Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren,
Departamento de Engenharia Mecânica.

Coorientação: Prof. Me. Paulo Cesar Correa Lindgren, Departamento de
Engenharia Mecânica.

1. Energia Renovável. 2. Biomassa. 3. Caldeira. I. Graduação em
Engenharia Mecânica. II. Título.

CDD – 333.79

Ficha catalográfica elaborada por Shirlei Righeti – CRB-8/6995

ORLANDO XAVIER DA SILVA NETO

**ENERGIA RENOVÁVEL: Reaproveitamento da Biomassa da Casca de Arroz
em Caldeiras do Tipo Aquatubular**

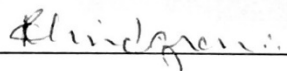
Trabalho de Graduação apresentado para
obtenção do Certificado de Graduação do
curso de **Engenharia Mecânica** do
Departamento de Engenharia Mecânica da
Universidade de Taubaté.

DATA: 27/11/2019

RESULTADO: APROVADO.

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Me. Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

Prof. Msc. Paulo Cesar Correa Lindgren
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

Prof. Msc. Jose Carlos Savio de Souza
UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ

Assinatura: 

27 de novembro de 2019

Dedico este trabalho a todas pessoas que acreditaram em mim e aqueles que me deram amor infinito.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus que ilumina meu caminho diariamente me dando oportunidade de alcançar meus objetivos.

Agradeço aos meus pais que sempre acreditaram em mim, me ajudaram a todo momento e me incentivaram a continuar.

Agradeço aos meus familiares e amigos que sempre estiveram torcendo por mim, tornando esse momento mais leve e tranquilo.

Agradecemos aos nossos queridos professores, em especial à nossa orientadora, professora Maria Regina Hidalgo de Oliveira Lindgren e ao nosso coorientador, professor Paulo Cesar Corrêa Lindgren.

RESUMO

Atualmente, com a grande procura de fontes sustentáveis/renováveis de energia, a Biomassa se tornou uma grande solução por se tratar de uma fonte de energia natural, a qual não prejudica agressivamente o meio ambiente. Entre elas temos a casca de arroz, a casca de coco verde, bagaço de cana de açúcar, resíduos agropecuários, entre muitos outros. Apesar de muitos pensarem que essa fonte é utilizada apenas para combustíveis, a biomassa, pode ser reutilizada por diversas formas, dentre elas, a queima do material orgânico para geração de gases que movimentam máquinas térmicas. O objetivo do presente estudo foi o levantamento de dados atuais sobre as fontes de energias renováveis já existentes, enfatizando a Biomassa proveniente da casca do arroz com uso direto em combustão para geração de energia em fornos e caldeiras industriais que são fortemente utilizadas em empresas cujos processos industriais precisam de altas temperaturas, como indústrias químicas, petroquímicas e em diversos outros segmentos. Já existem diversos processos em funcionamento usando biomassas, esses projetos alcançaram resultados satisfatórios que contribuíram para a sustentabilidade do processo produtivo, obtendo ganhos no aspecto social, tendo desenvolvimento profissional em treinamentos e maior oferta de emprego para profissionais, no aspecto econômico, devido às reduções de custos na produção com a implantação de novos processos utilizando a Biomassa, e também no aspecto ambiental, o qual, com a utilização da Biomassa, passa a ter melhor aproveitamento de todo o seu produto e seu resíduo. Essas informações foram levantadas por meio de pesquisas bibliográficas e dados nacionais. Como conclusão, são muito expressivos os benefícios ambientais da exploração da Biomassa como insumo energético e como uma fonte abundante, favorecendo o seu uso e colhendo excelentes resultados.

Palavras-chave: Energia Renovável, Biomassa, Caldeira.

ABSTRACT

Given today's high demand for sustainable /renewable energy sources, biomass has become a great energy solution because it is a natural energy source that does not aggressively harm the environment. There are many different types of biomass energy sources including, but not limited to, rice husks, green coconut husks, sugarcane bagasse, and agricultural residues. Many people think that biomass is used solely for fuels, however, biomass can be reused in several ways, including the burning of organic material to generate gases that drive thermal machines. The aim of this study was to gather current data on existing renewable energy sources. The emphasis of the study was on examining biomass from rice hulls used directly in combustion for power generation in industrial furnaces and boilers that are heavily used in companies whose industrial plant processes need high temperatures, such as chemical, petrochemical and other similar industries. There are already several industries/company's using biomass processes and these projects have achieved satisfactory results. In these examples the biomass process has contributed to the sustainability of the production process, social gains, greater opportunities for professional development/training and the creation of job opportunities. The biomass process also had a positive economic impact, due to the reduction in production costs. Lastly, the biomass process had a positive environmental impact, given that the use of biomass efficiently used both a company's product and waste. This information was collected through bibliographic research and national data. In conclusion, the environmental benefits of exploiting biomass which is an abundant energy input are very significant, favoring its use and reaping excellent results.

Keywords: Renewable Energy, Biomass, boiler.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fontes de Biomassa	17
Figura 2: Processos de reaproveitamento da casca de arroz	23
Figura 3: Processamento termoquímico da biomassa e produtos.....	24
Figura 4: Processo de Geração.....	25
Figura 5: Diagrama temperatura e entropia	26
Figura 6: Caldeira em tubos verticais.....	29
Figura 7: Caldeira em tubos horizontais	29
Figura 8: Caldeira Aquatubular	30
Figura 9: Quantidade de produção de arroz em casca	32
Figura 10: Eficiência dos principais equipamentos de uma unidade termoelétrica.	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Relação de matéria prima.....	18
Tabela 2: Animais vivos por rebanho em 2003	20
Tabela 3: Excremento produzido por diferentes tipos de rebanho.....	20
Tabela 4: Produção de arroz em casca (Safrá/2004/05).....	21
Tabela 5: Poder Calorífico de Biomassas.....	24

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Potencial energético da casca de arroz

Equação 2 – Energia gerada pelo combustível

Equação 3 – Energia gerada pelo combustível

Equação 4 – Eficiência isentrópica da turbina

Equação 5 – Trabalho real do equipamento

Equação 6 – Cálculo da potência da turbina

Equação 7 – Energia retirada do fluido de trabalho

Equação 8 – Trabalho realizado pela bomba

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos
ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
CIRAD	Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agronômica para o Desenvolvimento
CH ₄	Gás Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
EJ	Exajoule
FAO	Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
GEE	Gases de Efeito Estufa
GEINTEC	Gestão, Inovação e Tecnologias
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
PCI	Poder Calorífico Inferior
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
SO ₂	Dióxido de Enxofre

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Objetivos	14
1.1.1 Objetivo geral	14
1.1.2 Objetivo Especifico:	14
1.2 Delimitação do estudo:	14
1.3 Relevância de estudos	14
1.4 Organização do trabalho	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1 Biomassa.....	16
2.1.1 Histórico e Conceito	16
2.1.2 Biomassas como Fonte de Energia Renovável.....	16
2.1.3 Fontes de Biomassa.....	17
2.1.3.1 Resíduos Vegetais	18
2.1.3.2 Resíduos Sólidos Urbanos.....	18
2.1.3.3 Resíduos Industriais	19
2.1.3.4 Resíduos Animais.....	19
2.1.3.5 Resíduos Florestais.....	20
2.2 Biomassa da Casca do Arroz.....	21
2.2.1 Alternativas tecnológicas para o aproveitamento energético da casca	22
2.3 Ciclo Termodinâmico e Equipamentos Utilizados no Processo.....	25
2.3.1 Turbinas a vapor.....	26
2.3.2 Caldeira a Vapor.....	27
2.3.2.1 Desenvolvimento das Caldeiras	27
2.3.2.2 Classificações das Caldeiras.....	28
2.3.2.2.1 Caldeiras Flamotubulares.....	28
2.3.2.2.2 Caldeiras Aquatubulares	29
3 METODOLOGIA	31
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1 Caldeira	33
4.2 Turbina a vapor	34
4.3 Condensador.....	34
4.4 Bomba	34
4.5 Perdas no processo.....	35
5 CONCLUSÕES	36
REFERENCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

O mundo vem sofrendo com mudanças desde a muito tempo atrás, e que estão diretamente relacionadas com o crescimento populacional mundial. Com essa expansão acelerada da população, o consumo de recursos naturais vem se aumentando proporcionalmente, ocasionando uma elevação na quantidade de rejeitos nocivos ao meio ambiente. Logo, é necessárias pesquisas para criação de novos métodos para que não possamos causar a poluição proveniente desses resíduos orgânicos.

Atualmente a Biomassa é um recurso natural que vem sendo muito explorado por se tratar de uma energia cada vez mais rentável e ecológica. O seu uso basicamente é a combustão do material orgânico para gerar energia mecânica ou elétrica.

Embora em algumas partes do planeta esteja desprovida de florestas, a quantidade de biomassa existente é muito grande, em torno de dois trilhões de toneladas. Esse valor é basicamente 400 toneladas per capita, energeticamente isso equivale em torno de 3000 EJ por ano que corresponde oito vezes a mais o consumo mundial de energia primaria no mundo todo (da ordem de 400 EJ por ano) (RAMAGE; SCURLOCK, 1996).

Um dos grandes fatores que influenciam no aquecimento global é a emissão de gases poluentes vindo de máquinas que utilizam energias (queima de combustíveis) que agredem o meio ambiente.

Por se tratar de um assunto sustentável e energético, nesse trabalho de graduação iremos abordar a utilização da biomassa orgânica em setores industriais onde seu aproveitamento pode ser feito diretamente pela combustão direta em fornos, caldeiras, etc. E através de uma energia renovável possamos fornecer uma alternativa viável e factível à indústria Brasileira.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Mostrar através de um estudo bibliográfico a diversidade de energias disponíveis no Brasil, com um foco na biomassa orgânica.

1.1.2 Objetivo específico:

Realizar uma pesquisa literária com dados atuais sobre as fontes de energias renováveis já existentes, enfatizando a biomassa proveniente da casca do arroz com uso direto em combustão para geração de energia em fornos e caldeiras industriais.

1.2 DELIMITAÇÃO DO ESTUDO:

Provar o benefício e a eficiência do uso da casca de arroz em caldeiras e fornos.

1.3 RELEVÂNCIA DE ESTUDOS

A casca de arroz por se tratar de uma matéria prima em abundância no Brasil, poderíamos reutiliza-la, além das suas serventias atuais, para geração de energia mecânica para substituir o uso do combustível em um processo maquinário.

Assim, dessa forma, teríamos um desenvolvimento sustentável, eficaz e que atenderia os quesitos de produção.

1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo que no capítulo um encontra-se a Introdução, Objetivos, Delimitação e Relevância do estudo realizado.

No segundo capítulo, denominado de Revisão Bibliográfica, temos uma breve história sobre as energias renováveis com um foco na biomassa originaria a partir da casca de arroz, as caldeiras e seus processos colocando em ênfase as caldeiras do tipo aquatubular.

No capítulo três tem-se a Metodologia aplicada para o desenvolvimento deste estudo.

No quarto e quinto capítulos são abordados: Resultados e Discussão e Conclusão do trabalho, respectivamente.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BIOMASSA

2.1.1 Histórico e conceito

É toda a energia química produzida pelas plantas na forma de hidratos de carbono através da fotossíntese. Plantas, animais e seus derivados são biomassa. Também pode ser utilizada como combustível, mas em apenas em sua forma bruta ou através de seus derivados. Algumas formas de biomassa são a madeira, produtos e resíduos agrícolas, resíduos florestais, excrementos animais, carvão vegetal, álcool, óleos animais, óleos vegetais, gás pobre, biogás (PACHECO, 2006)

Visando energeticamente, para fim de outorga de empreendimentos do setor elétrico, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), todo recurso renovável proveniente de matéria orgânica, seja ela animal ou vegetal, é considerada biomassa e podem então ser utilizadas como fonte de energia. Assim como a energia hidráulica e outras fontes renováveis, a biomassa é uma forma indireta de energia solar. A energia solar é convertida em energia química, através da fotossíntese, base dos processos biológicos de todos os seres vivos.

2.1.2 Biomassas como fonte de energia renovável

Diante o cenário atual, o consumo de energia se intensifica cada vez mais e acabamos criando uma certa dependência desse recurso energético. Com a busca incessante por uma forma de energia alternativa surge a necessidade de uma diversificação na utilização das fontes energéticas e uma das soluções seria a utilização da biomassa.

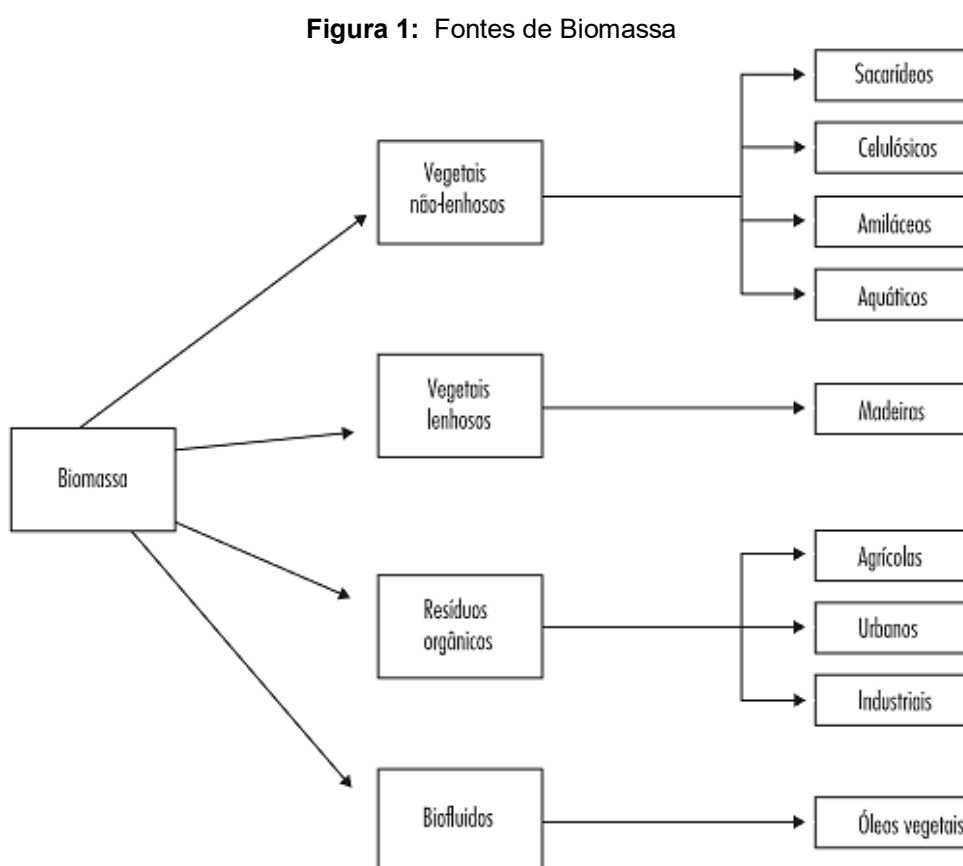
Nesta busca por fontes alternativas o Brasil apresenta grande diferencial em relação a outros países, pois a sua imensa biodiversidade, permite a geração de energia por vários meios, incluindo as fontes de energia renováveis como a hidrelétrica e também a busca pelo desenvolvimento de fontes alternativas como a utilização da biomassa, para produção de combustíveis renováveis, como o álcool, o biodiesel, e, mais recentemente, o H-bio (AGRONEGÓCIOS, 2006).

2.1.3 Fontes de biomassa

As fontes de biomassa se diferenciam de acordo com suas características ou origens. Considera-se biomassa primária aquela obtida de produtos originados diretamente da natureza, como a lenha e a cana-de-açúcar. Já a biomassa secundária é um produto resultante de algum processo de conversão dos combustíveis energéticos primários (MOTA, 2017).

A obtenção da biomassa pode ser feita por vegetais lenhosos, vegetais não lenhosos, por resíduos orgânicos e também podemos adquirir essa fonte através de biofluidos (CORTEZ et al, 2017).

A Figura 1 mostra um esquema das fontes de biomassa.



Fonte: Ministério de Minas e Energia, 1982

2.1.3.1 Resíduos vegetais

O Brasil sendo um dos maiores produtores agrícolas mundiais gera muitos resíduos vegetais decorrente das atividades de colheita. Cada vez mais essa área de plantação vem aumentando significativamente, e com ela a quantidade de resíduos, que com as novas tecnologias são reaproveitadas energeticamente.

Mas, segundo CIRAD (Centro de Cooperação Internacional em Pesquisa Agrônômica para o Desenvolvimento, 2004), apesar do Brasil ser um dos grandes produtores, mais de 200 milhões de toneladas desses rejeitos agroindustriais não são aproveitadas (LORA et al, 2004).

Abaixo é apresentada a tabela 1 para relação de matérias prima com sua determinada quantidade de produção.

Tabela 1: Relação de matéria prima

Matéria-prima	Produção agrícola (tons)	Produção de resíduos (t/ha)	Matéria seca (%)	Produção total de resíduos (tons)
Cana (bagaço)	396.012.158	7,0 – 13,0	23,4	59.201.824
Arroz (casca)	10.334.603	4,0 – 6,0	89,0	2.937.094
Café (casca) em coco	2.453.470	-	-	1.662.658
Mandioca (rama)	21.961.082	6,0 – 10,0	90,4	6.542.206
Milho (palha e sabugo)	48.327.323	5,0 – 8,0	90,5	64.028.870
Soja (restos de cultura)	51.919.440	3,0 -4,0	88,5	80.746.839
Mamona	111.100	-	-	-
Algodão	2.199.268	-	-	-

Fonte: IBGE, 2004 - Baseado em base seca

2.1.3.2 Resíduos sólidos urbanos

Resíduos sólidos urbanos são basicamente todo lixo coletado em domicílios e comércio.

Dados divulgado pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), o Brasil vem se superando cada vez mais com a quantidade de geração de lixos. Em 2015, foram geradas 79,9 milhões de toneladas

descartes em todo país, sendo assim um aumento de 1,7% em relação ao ano anterior.

Informações divulgadas pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), após um estudo, chegou-se à conclusão que apesar de 30% dos lixos gerados poderem ser reutilizados, porém apenas 3% é de fato é reaproveitado.

2.1.3.3 Resíduos industriais

As industriais que utilizam de matérias primas para produção de seu produto, em alguns casos esses produtos geram um resíduo que pode ser reaproveitado, no caso de materiais agrícolas e florestais.

Exemplificando, uma serraria se beneficia da tora de madeiras fazendo seu produto e acabam gerando resíduos como a casca do material, o cavaco, pó de serra, maravalha, etc. As indústrias de alimentos em muitas das vezes produzem resíduos na fabricação de sucos e aguardente, alguns frutos após a utilização geram bagaço, em uma colheita de grãos (arroz, café, trigo, milho) há geração de sabugo e palha.

O uso energético dos resíduos agroindustriais é obtido, na maioria dos casos, por meio da queima direta em fornos e caldeiras ou, de maneira mais inovadora, através da biodigestão anaeróbia, que basicamente é um processamento da matéria orgânica.

2.1.3.4 Resíduos animais

Os resíduos animais são a produção de excrementos de uma determinada criação, tendo seu uso energético e também em alguns casos como fertilizante (adubos) que ajudam a melhorar as características físicas, químicas e biológicas do solo de uma determinada plantação. Os animais que fornecem esse tipo de biomassa são os gados, suínos, caprinos e ovino.

A tabela 2, a seguir é um levantamento de dados do IBGE, onde foi demonstrado a quantidade de animais vivo por rebanho em 2003.

Tabela 2: Animais vivos por rebanho em 2003

Tipo de rebanho	Cabeças	Tipo de rebanho	Cabeças
Bovino	195.551.576	Coelhos	335.555
Suíno	32.304.905	Ovino	12.556.484
Equino	5.828.905	Galinhas	183.799.736
Asinino	1.208.660	Galos, frangas, frangos e pintos	737.523.096
Muar	1.345.389	Codornas	5.980.474
Bufalino	1.148.808	Caprino	9.581.653

Fonte: IBGE, 2004

Logo a seguir tem-se a tabela 3, que demonstra o levantamento realizado pelo IBGE, onde é descrito a quantidade de excremento produzido por diferentes tipos de rebanho.

Tabela 3: Excremento produzido por diferentes tipos de rebanho

Animal	Massa animal (kg)	Volume excremento (m ³ /dia)	Massa úmida excremento (kg/dia)	Matéria seca (%)
Gado de corte	500	0,028 – 0,037	27,7 – 36,6	10
Gado de leite	500	0,031 – 0,035	30,2 – 35,0	10
Suínos	100	0,0056 – 0,0078	5,4 – 7,6	10
Equinos	500	0,025	28,0	20
Aves	2,5	0,00014 – 0,00017	0,14 – 0,17	20
Ovelhas	-	-	2,0	20

Fonte: IBGE, 2004

Analisando os gráficos, podemos ver que os rebanhos com maiores destaques são os gados e também os suínos.

2.1.3.5 Resíduos florestais

São determinados por todo aquele material que é deixado para trás na hora da extração e coleta da madeira, sendo eles as folhas, galhos, todos dejetos resultantes da destoca.

O Brasil é um país rico em recursos naturais, um deles são as florestas nativas, onde representam 64% do seu território nacional, segundo FAO, 29 mil km² de seu território são reflorestados com eucalipto, o que coloca o país em segundo lugar nesse ranking, atrás da Índia. O Brasil vem sendo o maior produtor de madeira no mundo inteiro.

Portanto, não é fácil levantar dados para quantificar a geração de resíduos florestais no Brasil, já que ele depende de diversos fatores como o diâmetro da tora e o uso final das peças serradas.

2.2 BIOMASSA DA CASCA DO ARROZ

O arroz é um vegetal que possui 23 espécies do gênero e após seu período de cultivo pode crescer cerca de 1,0 a 1,8 metros de altura. No momento da colheita, são gerados resíduos que ficam no campo e também na hora do processamento do arroz (Rocha et al, 2017).

Atualmente, o Brasil, é um dos maiores produtores de arroz (Tabela 4) no mundo inteiro, sendo o Rio Grande do Sul a região com maior cultivo desse produto (em torno de 55% do arroz produzido no país todo), essas áreas possuem diversos fatores que facilitam a maior produtividade, o solo tem grande potencialidade de fertilidade natural, e a topografia da região é levemente plana e ondulada, além da presença de mananciais de água, entre outros motivos.

Tabela 4: Produção de arroz em casca (Safrá/2004/05)

Região	Produção de arroz		Produção de casca
	Mil toneladas	Mil sacos (50kg)	Mil toneladas
Nordeste	1.258,2	25.164,0	276,8
Norte	1.380,2	27.604,0	303,6
Centro-Oeste	2.672,4	53.448,0	587,9
Sudeste	359,4	7.188,0	79,1
Sul	7.139,2	142.784,0	1.570,6
Rio Grande do Sul	5.877,8	117.556,0	1.293,1
Brasil	12.809,4	256.188,0	2.818,1

Fonte: Anuário Brasileiro de Arroz

De acordo com Cardoso (2012), o peso da palha do arroz representa um percentual de 38% para cada tonelada de arroz produzido, sendo que parte do resíduo gerado permanece no campo e a casca bruta coletada equivale a 22% do arroz, a qual poderemos usar no processo de combustão.

Como uma alternativa sustentável o uso desse descarte traria vários benefícios ao meio ambiente, pois caso esses resíduos não sejam corretamente descartados podem-se gerar problemas ambientais graves, por conta de sua lenta degradação (VALE *et al*, 2014).

Atualmente, segundo Mayer *et al* (2006), existem aterros onde são depositados os rejeitos do arroz para degradação, esses locais são grandes emissores de Metano (CH₄), esse gás é produzido a partir da decomposição da matéria orgânica, sendo mais poluente que o Dióxido de Carbono (CO₂). (NUNES *et al*, 2017).

Ainda Mayer *et al* (2006), diz que a utilização da casca do arroz para geração de energia, ou algum tipo de aproveitamento, diminuiria os problemas ambientais existentes pois essa matéria dura em torno de 5 anos para se decompor completamente na natureza.

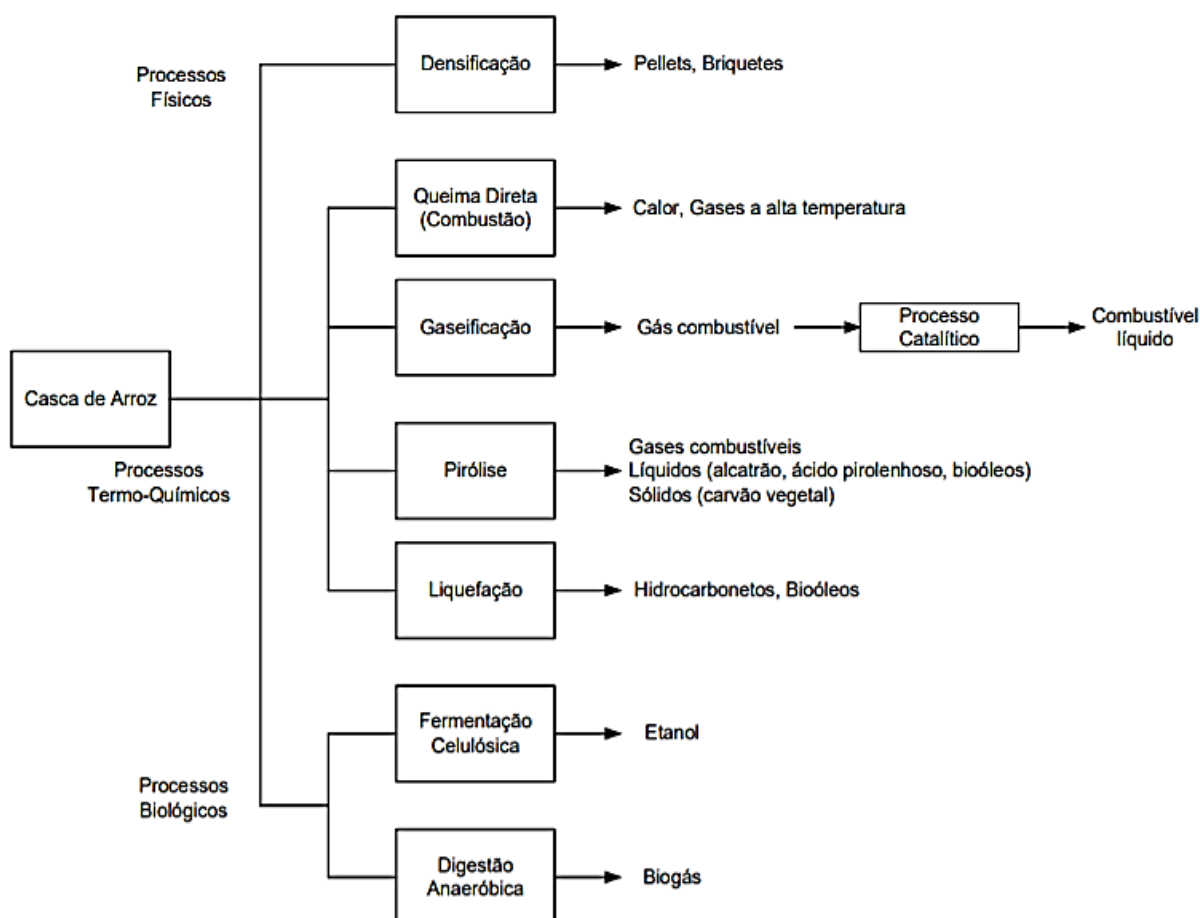
Em comparação, o seu potencial energético representa 50% de um carvão betuminoso e 33% do petróleo (VALE *et al*, 2014).

As empresas estão buscando formas sustentáveis e economicamente viáveis de reaproveitar de fontes naturais de energia que atendam os quesitos ambientais da legislação vigente e que tenha um retorno financeiro, que é o caso da reutilização da biomassa da casca do arroz para a geração da própria energia (MAYER, HOFFMAN e RUPPENTHAL, 2006).

2.2.1 Alternativas tecnológicas para o aproveitamento energético da casca

A figura 2, a seguir, representa quais os tipos de processos para reaproveitamento da casca do arroz e o produto final de cada processo.

Figura 2: Processos de reaproveitamento da casca de arroz

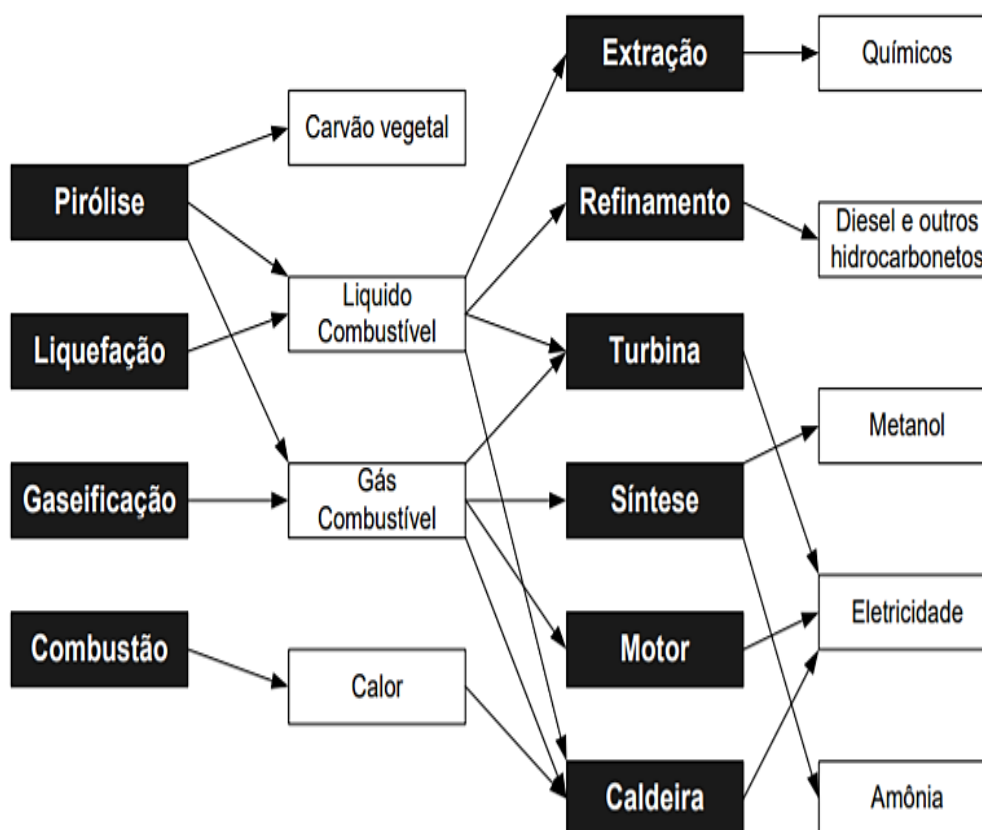


Fonte: Balanço Energético Nacional (2004) (Adaptado)

Os processos mais utilizados atualmente são o de combustão e densificação, pois se tratam de processos mais viáveis economicamente (MAYER, HOFFMAN e RUPPENTHAL, 2006).

Como o principal foco no presente trabalho é a utilização dessa biomassa em caldeiras do tipo aquatubular, o processo que iremos abordar será o de queima direta, ou seja, combustão.

Ela se trata de uma operação termoquímica pois ocorre uma queima direta da matéria prima, assim é possível gerar energia térmica e conseqüentemente energia elétrica como é mostrado no esquema da figura 3:

Figura 3: Processamento termoquímico da biomassa e produtos

Fonte: Bridgewater et al (1999) (adaptado).

O reaproveitamento pode ser resumido em uma etapa simples, se baseando na queima ou combustão do descarte, geração e utilização de vapor e geração de eletricidade (HOFFMANN, 1999).

Pode-se observar, na tabela 5 a seguir, que a biomassa da casca do arroz representa um ótimo poder calorífico comparado a outros materiais:

Tabela 5: Poder Calorífico de Biomassas

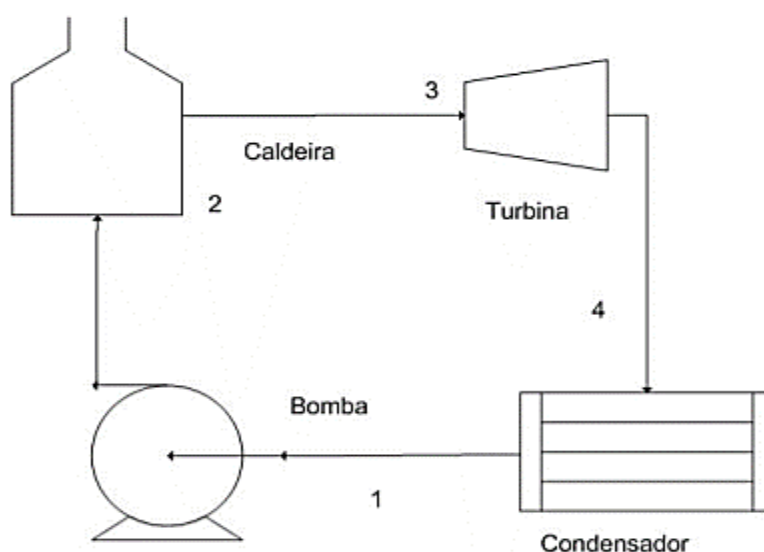
Biomassa	Poder Calorífico Inferior (kcal/kg)
Casca de arroz (12% de água)	3300
Casca de Eucalipto	3750
Casca de Soja	3300
Cavaco Eucalipto	4300

Fonte: Arauterm, 2006.

2.3 CICLO TERMODINÂMICO E EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSO

O ciclo termodinâmico apresentado para esse sistema se baseia em uma caldeira para a combustão do material, turbina a vapor que transforma a energia gerada pela caldeira em energia cinética, condensador e bomba. Como mostra o esquema na figura 4 a seguir:

Figura 4: Processo de Geração

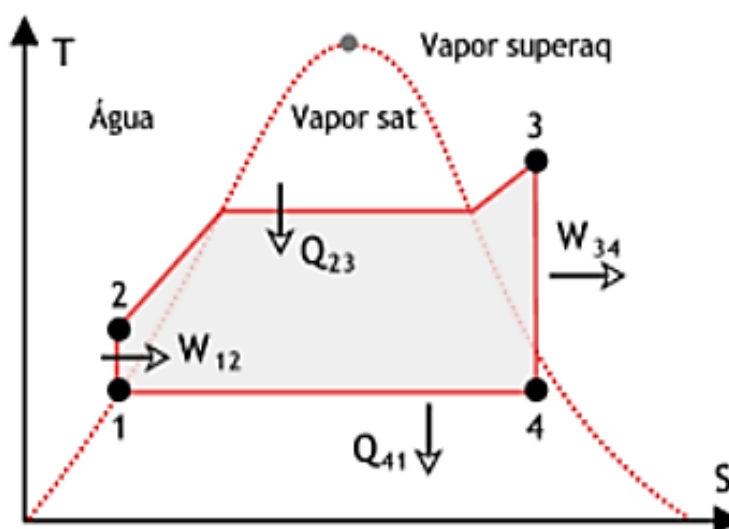


Fonte: Adaptado de VAN WYLEN (1997).

- 1-2) Processo de compressão adiabático, na bomba;
- 2-3) Transferência de calor a pressão constante, na caldeira;
- 3-4) Expansão adiabática, na turbina;
- 4-1) Transferência de calor a pressão constante, no condensador.

Esse esquema pode ser representado por um diagrama de processo termodinâmico entre temperatura e entropia (VAN WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 1997 – vide figura 5).

Figura 5: Diagrama temperatura e entropia



Fonte: Adaptado de VAN WYLEN, (1997).

O diagrama, mais conhecido como ciclo de Rankine, faz uma representação da queima da casca de arroz gerando vapor superaquecido, onde é fornecida energia ao sistema gerador nomeado Q_{2-3} , esse vapor é direcionado para a turbina em forma de trabalho para a turbina W_{3-4} encaminhando a pressão baixa para o condensador, nesse ponto é retirado o excesso de energia do sistema Q_{4-1} . Logo após a passagem pelo condensador o processo segue para o tanque principal que junto com a água para a reposição de perdas são bombeadas até a caldeira principal W_{1-2} , finalizando o ciclo termodinâmico (Pretz, 2001).

2.3.1 Turbinas a vapor

Basicamente seu funcionamento se baseia em um motor térmico rotativo que sua energia térmica é convertida em energia cinética causado pela expansão através dos bocais, dando continuidade essa energia sofre mais uma transformação que é a mecânica causada pela força do vapor nas pás rotativas da turbina (LORA et al, 2004).

O seu funcionamento é classificado por arranjos ou por estágios:

- De ação: Seu funcionamento acontece quando ocorre a perda de pressão do vapor vinda dos bocais e por esse motivo a energia do vapor reduz juntamente (entalpia). Verifica-se que essa energia é convertida em energia cinética que aumenta a velocidade do vapor que

passara pelas pás da turbina ocasionando a conversão de energia cinética em energia mecânica (PAZ, 2002).

- De reação: Ocorre a conversão de energia térmica do vapor em energia cinética parte por palhetas móveis e outra parte por palhetas fixas. Essa conversão é aplicada pela pressão do vapor e a expansão causada (PAZ, 2002).

Durante o processo grande parte da energia interna pode ser perdida por causa do condensador de calor (PAZ, 2002).

2.3.2 Caldeira a vapor

2.3.2.1 Desenvolvimento das caldeiras

A água sempre esteve presente em abundância no nosso planeta, logo criaram-se equipamentos que pudessem se aproveitar desse bem na utilização e geração de energia. Portanto, novas ideias surgiram utilizando o vapor da água. Qualquer setor industrial pode utilizar o vapor para geração de energia em diversos processos para produção, seja ele metalúrgico, metal-mecânico, eletrônica e química (BIZZO,2001).

Um dos primeiros experimentos foram no século II, quando Heron, de Alexandria, inventou um equipamento denominado Eolípia, que se baseava em evaporar a água e com isso movimentar uma esfera em torno de um eixo (GYURKOVITS, 2004).

Mas as primeiras utilizações industriais foram no século XVII (17), começando por Thomas Savery, um inglês que desenvolveu um método em 1698 de força motriz utilizando um bombeamento de água gerando vapor. Logo em seguida, no ano de 1711, Newcomen desenvolveu um equipamento com a mesma finalidade, porém com melhorias, e sua invenção era apenas um reservatório esférico com aquecimento ao fundo do recipiente, esse método ficou conhecido como caldeira de Haycock. Em 1769, James Watt, projetou a primeira caldeira utilizada em locomotivas, conhecida como caldeira vagão. (BIZZO, 2001).

Todos esses modelos citados acima causaram grandes explosões, o motivo era a queima direta que causava o acúmulo de vapor nos vasos de pressão (BIZZO, 2001).

Os primeiros modelos de caldeiras com tubos de água surgiram nos finais do século 18 e início do século 19. John Stevens, desenvolveu um modelo que movimentou um barco a vapor no rio Hudson. Já em 1856, Stephen Wilcox, projetou um gerador a vapor com tubos inclinados e que tiveram sucesso comercial. E um dos projetos que usamos as concepções básicas ainda hoje, é o modelo de Alan Stirling, que em 1880 criou uma caldeira de tubos curvados (BIZZO, 2001).

Logo, caldeira é um recipiente metálico cuja função é a troca de calor trabalhando com pressão acima da pressão atmosférica, seu vapor é produzido a partir de uma fonte qualquer que possa oferecer energia térmica (NOGUEIRA et al., 2005).

Para a queima de biomassas, as caldeiras operam com o vapor entre 340 °C a 440°C, um dado também importante é sua pressão de 21 a 81 bar e sua vazão de vapor ao longo de 40 t/h a 140 t/h (LORA et al, 2004)

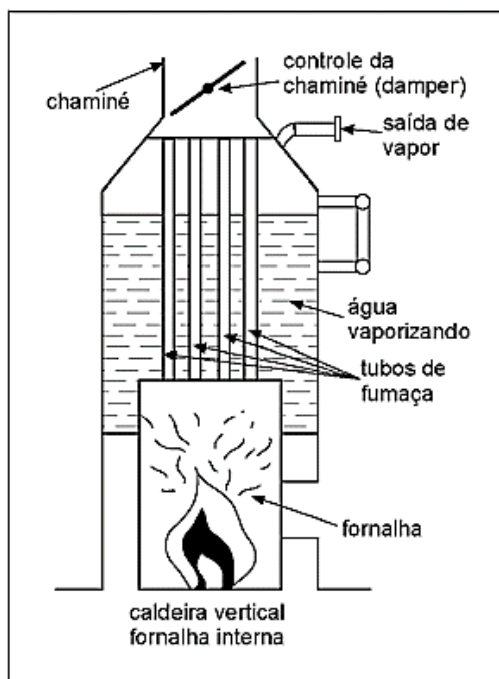
2.3.2.2 Classificações das caldeiras

Existem diversos tipos de caldeiras, nos dias de hoje classificamos em dois modelos diferentes: Flamotubulares e Aquatubulares.

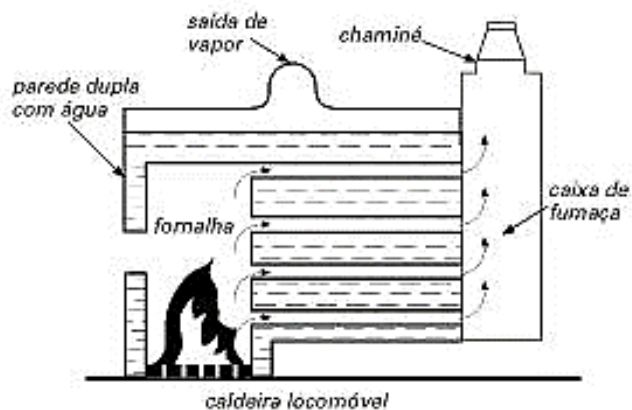
2.3.2.2.1 Caldeiras flamotubulares

Esse tipo de caldeira ocorre a combustão dos gases que vão circular por dentro de tubos e assim acabam evaporizando a água que fica por fora dos mesmos. Também são conhecidas como "*tubos de fogos*" (GYURKOVITS, 2004).

Normalmente os tubos são instalados verticalmente (figura 6) facilitando a passagem do vapor, mas ainda assim existem caldeiras com tubos horizontais (figura 7).

Figura 6: Caldeira em tubos verticais

Fonte: GYURKOVITS, 2004

Figura 7: Caldeira em tubos horizontais

Fonte: GYURKOVITS, 2004

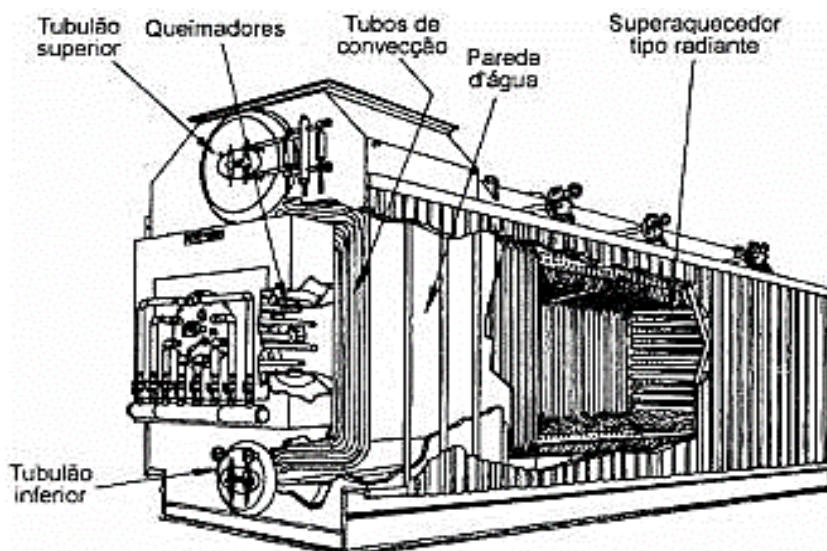
Elas são fabricadas para processos em que operam em pressões limitadas, o vaso em que é aplicada a pressão tem um tamanho muito grande, dessa forma se torna inviável a instalação de chapas de maiores espessuras (GYURKOVITS, 2004).

2.3.2.2.2 Caldeiras aquatubulares

São caldeiras com processos opostos a flamotubulares, onde os gases vão circular por fora dos tubos, e vaporização ocorre por dentro dos mesmos.

Os tubos são instalados curvamente que acabam formando sistemas mais complexos (figura 8), mas inicialmente eles eram colocados retos e inclinados.

Figura 8: Caldeira Aquatubular



Fonte: GYURKOVITS, 2004

Nesse modelo temos uma utilização mais ampla por se tratar de vasos pressurizados (tubulões) que possuem menores dimensões, podendo ser fabricados com chapas de maiores espessuras sendo resistentes a maiores pressões. Um dos fatores positivos é a possibilidade de adaptação de acessórios, que acabam fornecendo o vapor superaquecido, esse vapor é útil para funcionamentos de turbinas e procedimentos que necessitam de temperaturas constantes (GYURKOVITS, 2004).

3 METODOLOGIA

Esse trabalho de graduação tem como objetivo o estudo de um sistema de queima da biomassa proveniente da casca de arroz em caldeira do tipo aquatubular para obtenção de energia térmica. Conforme apresentado a finalidade desse projeto, este trabalho se compreende em uma pesquisa exploratória e relacionado aos procedimentos técnicos utilizados para o seu desenvolvimento, este se enquadra também em uma pesquisa bibliográfica.

Uma pesquisa exploratória ocorre quando há pouco conhecimento sobre o assunto abordado, indo mais a fundo nos estudos do tema escolhido buscando uma conclusão e esclarecimento na pesquisa.

Para Gil (2002), é o desenvolvimento para proporcionar uma visão geral cercado um assunto específico, sendo esse tema não muito usual e pouco explorado. Consiste em um aprofundamento de um assunto não esclarecido anteriormente.

De acordo com a abordagem técnica o trabalho foi feito a partir da pesquisa bibliográfica, que depende da análise de materiais já realizados, como trabalhos acadêmicos, livros, revistas, artigos e materiais disponíveis na Internet.

Para Severino (2007), a pesquisa bibliográfica se realiza a partir do registro disponível de materiais como, teses, livros, artigos, etc. Utiliza-se de dados teóricos já trabalhados por outros pesquisadores. O pesquisador trabalha a partir do auxílio dos autores de estudos anteriores registrados.

A primeira fase para elaboração dessa pesquisa foi reunir as principais e mais relevantes literaturas já publicadas relacionadas ao estudo abordado, sendo eles, a biomassa como fonte renovável de energia e os tipos de caldeiras existentes, também foi realizada uma pesquisa acadêmica, onde coletamos através de livros, teses, dissertações, artigos e textos análises técnicas. Estes artigos foram retirados de fontes confiáveis e de renomados autores que contribuiriam com a divulgação de seus livros, pesquisas e artigos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Através de uma pesquisa bibliográfica foram coletadas informações da produção média anual da área plantada e da quantidade produzida de arroz em casca no período do ano 2000 – 2015 (figura 14).

Figura 9: Quantidade de produção de arroz em casca

Ano	Brasil		Rio Grande do Sul	
	Área plantada (ha)	Quantidade produzida (t)	Área plantada (ha)	Quantidade produzida (t)
2000	3.704.863	11.134.588	959.039	4.981.014
2001	3.171.300	10.184.185	953.583	5.256.301
2002	3.171.955	10.445.986	983.178	5.486.333
2003	3.193.936	10.334.603	962.210	4.697.151
2004	3.774.215	13.277.008	1.056.098	6.338.139
2005	3.999.315	13.192.863	1.055.229	6.103.289
2006	3.010.169	11.526.685	1.023.330	6.784.236
2007	2.915.316	11.060.741	942.151	6.340.136
2008	2.869.285	12.061.465	1.065.633	7.336.443
2009	2.905.202	12.651.144	1.110.601	7.977.888
2010	2.778.173	11.235.986	1.101.311	6.875.077
2011	2.855.312	13.476.994	1.169.849	8.940.432
2012	2.443.182	11.549.881	1.042.560	7.692.223
2013	2.386.821	11.782.549	1.085.648	8.099.357
2014	2.347.460	12.175.602	1.114.132	8.241.840
2015	2.162.178	12.301.201	1.127.916	8.679.489

Fonte: IBGE/Pesquisa Agrícola Municipal

Como se referênciava, Cardoso (2012), o peso da palha do arroz representa um percentual de 38% para cada tonelada de arroz produzido, sendo que parte do resíduo gerado permanece no campo e a casca bruta coletada equivale a 22% do arroz, a qual poderemos usar no processo de combustão.

A equação (1) a seguir calcula a estimativa do potencial de geração da energia a partir da casca de arroz, sendo relacionada com a quantidade em toneladas, poder calorífico inferior (PCI), fazendo a conversão para *MW/h* e multiplicando por um ano em operação.

$$E \left(\frac{MW}{ano} \right) = \frac{[(t_{arroz} * 0,22) * PCI \left(\frac{kcal}{kg} \right) * 0,15]}{(860 * 8760)} \quad (1)$$

E = Potencial Energético gerado em Megawatts por ano

t_{arroz} = quantidade de arroz em toneladas

PCI = Poder Calorífico Inferior

Calculando uma média geral de arroz produzido em cascas de 2000 a 2015, obtivemos 11.774.467,56 toneladas.

Iremos simular uma caldeira trabalhando 24 horas por dia durante o período de um ano completo, substituindo os dados obtivemos o valor de 170 MW/ano.

4.1 CALDEIRA

A energia gerada pelo combustível, Q_c [W], depende do poder calorífico inferior da casca de arroz, PCI [J/kg], da vazão mássica da casca, \dot{m}_{casca} [kg/s] e da eficiência do equipamento, n [%], conforme Equação 2 (Energia Gerada pelo Combustível). Podemos calcular a vazão de vapor gerado pelo combustível, \dot{m}_{vapor} [kg/s], através da Equação 3, utilizando o resultado obtido pela equação 2, pois teremos o valor de energia liberado na queima da casca de arroz. Os valores de entalpia de entrada de água saturada, H_2 [J/kg] e entalpia de saída do vapor, H_3 [J/kg], foram obtidos através das pressões e temperaturas de trabalho (VIEIRA, 2011).

$$Q_c = \dot{m}_{casca}(n)(PCI) \quad (2)$$

$$Q_c = \dot{m}_{vapor}(H_3 - H_2) \quad (3)$$

Para efeito de cálculos, o poder calorífico inferior (PCI) utilizado foi 3300 kcal/kg. Em uma pequena escala, a pressão do vapor da saída da caldeira utilizada foi apontada como sendo 10 bar (Arauterm, 2016). Já para escalas maiores foi considerado à pressão de 45 bar (LORA et al, 2004).

4.2 TURBINA A VAPOR

Para o cálculo da potência gerada pela turbina, P_t [W], foi considerado uma turbina isentrópica, ou seja, a entropia do sistema permanece constante. Através da eficiência isentrópica da turbina, η_{tv} [%], foi obtida a entalpia do fluido de trabalho na saída do equipamento, H_4 [J/kg], conforme Equação 4 (Eficiência Isentrópica da turbina), onde H_{4s} [J/kg] é a entalpia do processo isentrópico. O trabalho real do equipamento, W_t [J/kg], foi calculado através da Equação 5 (Trabalho Real do Equipamento) Posteriormente foi possível o cálculo da potência da turbina, através da Equação 6 (Calculo da Potência) (VIEIRA, 2011). A pressão do fluido na saída do equipamento foi adotada como 0,008 MPa (PAZ, 2002).

$$\eta_{tv} = \frac{(H_3 - H_4)}{(H_3 - H_{4s})} \quad (4)$$

$$W_t = (H_3 - H_4) \quad (5)$$

$$P_t = W_t(\dot{m} \text{ vapor}) \quad (6)$$

4.3 CONDENSADOR

A princípio, é importante a definição da pressão no condensador. Com a pressão definida foi possível encontrar a temperatura de saturação de saída da água condensada, T_1 [K] e conseqüentemente a entalpia do fluido de trabalho na saída do equipamento, H_1 [J/kg]. Logo, a energia retirada do fluido de trabalho, Q_{rfw} [J/kg], foi calculada através da Equação 7 (Energia Retirada do Fluido do Trabalho) (VIEIRA, 2011).

$$Q_{rfw} = (H_4 - H_1) \quad (7)$$

4.4 BOMBA

Para se calcular o trabalho realizado pela bomba (equação 8), W_b [J/kg], é necessário o rendimento da bomba, η_b [%], que é fornecido pelo fabricante. Os

demais valores, de pressão de entrada na bomba, P_1 [Pa], pressão de saída da bomba, P_2 [Pa] e o volume específico na entrada, V_1 [m³/kg], são conhecidos (VIEIRA, 2011).

$$W_b = \frac{v (P_2 - P_1)}{n_b} \quad (8)$$

4.5 PERDAS NO PROCESSO

A figura 15 a seguir, mostra a eficiência dos equipamentos principais do processo no ciclo de Rankie.

Figura 10: Eficiência dos principais equipamentos de uma unidade termoelétrica

Equipamento	Eficiência (n)	Fonte
Caldeira	84 %	Prasad, 1995
Turbina	85%	Hoffmann, 1999
Gerador	94%	Hoffmann, 1999
Bomba	85%	Hoffmann, 1999

Fonte: CAMPOS, 2016.

5 CONCLUSÕES

Tendo em vista a imensa quantidade de casca de arroz gerada anualmente no Brasil, o que já consta como uma justificativa de viabilizar maneiras de reutilização desse material evitando um grande grau poluidor, pois, conforme dito anteriormente, o descarte incorreto dessa biomassa é prejudicial ao meio ambiente, e o rejeito, anteriormente descartado, podendo amenizar os impactos ambientais pelo uso da casca do arroz, como vantagens para esse processo temos:

- Diminuição da casca do arroz em aterros, pois possui longo período de decomposição (cerca de 5 anos);
- Gera a diminuição de CH₄ (Gás Metano) pela decomposição
- Diminuição da forma de descarte ilegal, pois na maioria dos engenhos de arroz, quase todo esse material tem como destino as lavouras e o fundo de rios, em um descarte prejudicial e criminoso
- Produto disponível de forma homogênea no decorrer não só do período de safra, mas ao longo do ano.
- Evita a emissão de SO₂ (Dióxido de Enxofre), tendo em vista que a biomassa apresenta teor de enxofre desprezível.
- A casca do arroz está dentre os produtos que se destacam no âmbito do aproveitamento e utilização, como forma alternativa na produção de energia.
- Diminuição da emissão de CO₂ (Dióxido de Carbono) pela autoprodução de energia.

Além de termos o Tratado de Quioto, onde:

Processo de estabilização das emissões de GEE (Gases de efeito estufa) por parte dos países desenvolvidos, limitando essas em 5,2% abaixo das registradas em 1990.

Os países signatários foram divididos em dois grupos, de acordo com seu nível de industrialização. Cada grupo tem obrigações distintas em relação ao Protocolo, sendo que os mesmos foram divididos então em grupo de países desenvolvidos e grupo dos países em desenvolvimento, entre eles o Brasil

Sendo assim, torna-se uma vantagem competitiva no mercado atual o investimento na instalação de um processo em caldeiras para biomassa, que a princípio poderá ter um custo elevado, com todas as despesas de transporte, armazenamento, porém o descarte e o custo em eletricidade irão diminuir gradativamente, tornando um projeto viável em todos quesitos ao longo dos anos, porque é de grande interesse que as empresas invistam em biomassa, pois lhe fornecerá vantagens ainda de:

- Oportunidade de vantagem competitiva
- Alavancando sua marca através de ações ambientalmente corretas
- Diminuição significativa dos custos de produção devido a geração própria de eletricidade e calor de processo (cogeração)

REFERENCIAS

AGRONEGÓCIOS e tecnologias. Gazeta Mercantil, 24 maio 2006, p. A-3.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap2.pdf. Acesso em: 26/abr/2019

ARAUTERM. **Poder Calorífico Inferior**. 2016.

BIZZO, Waldir A. EM 722 - geração, distribuição e utilização de vapor. Ca 4. UNICAMP, 2001. Disponível em <http://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP4.pdf>. Acesso em 16/05/2019.

CAMPOS, Gabriel Silveira de. **Avaliação do reaproveitamento energético da casca de arroz: um estudo de caso no município de Santo Antônio de Patrulha**. 2016. 56f. Projeto de graduação em Engenharia Agroindustrial Agroquímica, UFRG, Santo Antônio da Patrulha.

CARDOSO, Bruno Monteiro. **Uso da biomassa como alternativa energética**. 2012. 112f. Projeto de Graduação em Engenharia Elétrica, UFRJ, Rio de Janeiro.

CORTEZ, L.; Lora, E.; Gómez, E. **Biomassa para energia**: Campinas/SP: Editora da Unicamp, 2008.

GIL, Antonio Carlos. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.

GYURKOVITS, José L. **Caldeiras**. Apostila: (S.L) 2004. Disponível em https://www.slideshare.net/educacaof/caldeiras-3485277?from_search=7. Acesso em 16/05/2019.

HOFFMANN, R. **Método avaliativo da geração regionalizada de energia, em potências inferiores a 1MW, a partir da gestão dos resíduos de biomassa – o caso da casca de arroz**. 1999. 211 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.

LORA, Electo Eduardo Silva et al. **Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação**. Rio de Janeiro: Interciência, v. 2, p. 2, 2004.

MAYER, Flávio Dias; HOFFMANN, Ronaldo; RUPPENTHAL, Janis E. **Gestão energética, econômica e ambiental do resíduo casca de arroz em pequenas e médias agroindústrias de arroz**. 2006. 11 f. XIII SIMPEP, Bauru.

MAYER, F. D. **Aproveitamento da Casca do Arroz em uma micro central termoeétrica-Avaliação dos impactos econômicos e locais para o setor arroezeiro do Rio Grande do Sul**. UFMS-Santa Maria, Brasil, 2009.

MOTA, K, et al. **PRODUÇÃO DE BIOCÓMPÓSTOS A PARTIR DA BIOMASSA: PROSPECÇÃO DE PATENTES NO BRASIL**. GEINTEC. Aracaju/SE, Vol.7, nº4, p.4089-4099, out/nov/dez - 2017.

NOGUEIRA, Luiz Augusto Horta et al. Eficiência energética no uso de vapor: manual prático. Eletrobrás, 2005.

NUNES, O. et al. **O uso da casca de arroz como alternativa energética: um estudo de caso no município de Dom Pedrito – RS**. Gepec, v. 21, n.2, p. 42-62, jul./dez. 2017.

PACHECO, F. **Conjuntura e Planejamento**, Salvador: SEI, 149, p.4-11, Outubro/2006

PAZ, A.E.C. **Simulação de sistemas térmicos de potência para geração de energia elétrica**. 2002. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002

PRETZ, R. **Potencial bioenergético do setor arrozeiro do Rio Grande do Sul: uma abordagem termelétrica**. 2001. 78 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande, Porto Alegre, 2001.

SEVERINO, Antônio Joaquim. **Metodologia do trabalho científico**. São Paulo: Cortez, 2007.

VALE, C. S. A.; DWECK, J.; CAST. ELLÓ, M. L.; VIANA, M. M.; IX congresso brasileiro de análise térmica e calorimetria. **Estimativa da eficiência de queima de casca de arroz durante o processo de sua combustão industrial**. São Paulo, 2014.

VAN WYLEN, G; SONNTAG, R; BORGNAKKE, C. **Fundamentos da Termodinâmica Clássica**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1997.

VIEIRA, Julio Cesar da Silva Freitas. **Avaliação do potencial de geração de energia elétrica a partir dos resíduos do couro do Vale dos Sinos – RS**. 2011. 27 f. Trabalho de conclusão (Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.