



UNIVERSIDADE DO VALE DO RIO DOS SINOS
CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO USO DA CASCA DE
ARROZ COMO BIOMASSA PARA FINS ENERGÉTICOS
E DO COPRODUTO CINZA APLICADO AO CONCRETO**

Magali Rejane Rigon

São Leopoldo, Julho de 2015.

MAGALI REJANE RIGON

**AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO USO DA CASCA DE ARROZ
COMO BIOMASSA PARA FINS ENERGÉTICOS E DO
COPRODUTO CINZA APLICADO AO CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - UNISINOS como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes
Co-Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio

Banca examinadora:

Prof. Dr. Armando de Azevedo Caldeira Pires
Prof^ª. Dra. Feliciane Andrade Brehm
Prof^ª. Dra. Regina Espinosa Modolo

São Leopoldo, Julho de 2015.

R572a

Rigon, Magali Rejane.

Avaliação ambiental do uso da casca de arroz como biomassa para fins energéticos e do coproduto cinza aplicado ao concreto / Magali Rejane Rigon. – 2015.

118 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2015.

"Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes ; co-Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio."

1. Casca de arroz. 2. Cinza de casca de arroz. 3. Impacto ambiental. 4. Cimento. 5. Concreto. I. Título.

CDU 624

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Bibliotecário: Flávio Nunes – CRB 10/1298)

MAGALI REJANE RIGON

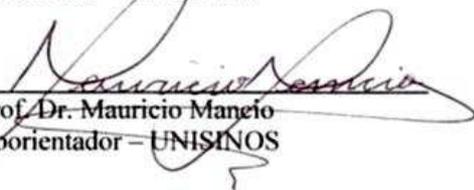
**"AVALIAÇÃO AMBIENTAL DO USO DA CASCA DE ARROZ
COMO BIOMASSA PARA FINS ENERGÉTICOS E DO
COPRODUTO CINZA APLICADO AO CONCRETO"**

Dissertação apresentada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração: Gerenciamento de Resíduos, da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS.

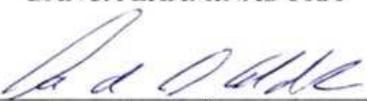
Aprovada em 14 de agosto de 2015


Prof. Dr. Carlos Alberto Mendes Moraes
Orientador – UNISINOS

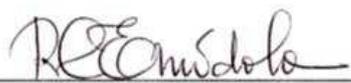

Prof.ª Dr.ª Luciana Paulo Gomes
Coordenadora do PPGEC – UNISINOS


Prof. Dr. Mauricio Mancio
Coorientador – UNISINOS

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. Armando de Azevêdo Caldeira Pires - UnB


Prof.ª Dr.ª Feliciane Andrade Brehm - UNISINOS


Prof.ª Dr.ª Regina Célia Espinosa Modolo - UNISINOS

Aos meus pais, Josemar e Solange.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida, pela saúde e por me dar o privilégio de conviver com pessoas especiais.

Ao professor Carlos, obrigada pela oportunidade, orientação constante e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao professor Mauricio, pela orientação e contribuição para minha formação profissional.

Aos meus pais, Josemar e Solange, pelo amor e principalmente pela doação de vida.

Aos meus irmãos Charles e Franchesco, vocês são a alegria dos meus dias.

Ao meu noivo, Luiz Gustavo, pela cumplicidade, apoio e por ser essa pessoa amável que tanto amo.

As Avós, Elsa e Maria Iracema, pelo jeito discreto de torcer e rezar.

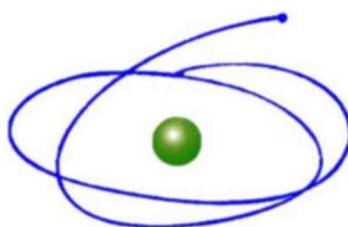
A tia Viviana, que ofereceu o seu lar e amizade durante essa jornada, e por ter me incentivado a prosseguir na vida acadêmica.

Aos colegas do PPGEC, pela amizade fortalecida durante a caminhada, em especial a Alice, Cris e Michele.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

FONTES DE FINANCIAMENTO DA PESQUISA

A realização desse trabalho foi possível com o apoio das seguintes fontes financiadoras:



C A P E S
Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	JUSTIFICATIVA	21
1.2	OBJETIVOS	23
1.2.1	<i>Objetivo geral</i>	23
1.2.2	<i>Objetivos específicos</i>	23
1.3	ESTRUTURA DA PESQUISA	23
1.4	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO	24
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	25
2.1	AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)	25
2.1.1	<i>Estrutura da ACV</i>	27
2.2	IMPACTOS AMBIENTAIS	31
2.3	PRODUÇÃO DE ARROZ	35
2.4	BIOMASSA CASCA DE ARROZ PARA GERAÇÃO DE ENERGIA	39
2.4.1	<i>Processos de combustão de casca de arroz</i>	41
2.5	CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA) E APLICAÇÕES	45
2.6	COMPROVAÇÃO TÉCNICA DA APLICAÇÃO DE CCA NA CONSTRUÇÃO CIVIL	48
2.7	IMPACTOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	51
2.7.1	<i>Cimento versus impactos ambientais</i>	51
2.7.2	<i>Concreto versus impactos ambientais</i>	53
2.7.3	<i>ACV na construção civil</i>	55
3	MÉTODO DE PESQUISA	57
3.1	ETAPA 01	58
3.1.1	<i>Definição do objetivo e escopo</i>	58
3.1.2	<i>Características da CCA</i>	64
3.1.3	<i>Massa Unitária</i>	65
3.2	ETAPA 02	65
3.2.1	<i>Visita às Usinas Termoeletricas</i>	65
3.2.2	<i>Mapeamento da geração e aplicação da CCA</i>	65
3.3	ETAPA 03	66
3.3.1	<i>Avaliação dos aspectos e impactos ambientais dos processos de combustão da casca de arroz</i>	66
3.4	ETAPA 04	68
3.4.1	<i>Análise do inventário do ciclo de vida</i>	68
3.5	ETAPA 05	72
3.6	ETAPA 06	74
4	APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	75
4.1	GERAÇÃO E MAPEAMENTO DA CASCA DE ARROZ	75
4.2	MASSA UNITÁRIA DA CCA	78
4.3	ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTAIS QUALITATIVOS DOS PROCESSOS DE COMBUSTÃO DA BIOMASSA CASCA DE ARROZ	79
4.4	AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS SIGNIFICATIVOS	87
4.4.1	<i>Transporte da biomassa até às UTES</i>	87
4.4.1	<i>Transporte da CCA até às ESC</i>	90
4.4.1	<i>Concreto</i>	94
5	CONCLUSÕES	101
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	103
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	105
	APÊNDICE 01	113
	APÊNDICE 02	117

LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Métodos de AICV e suas categorias de impactos tradicionais.	29
Tabela 2 – Potencial de aquecimento global dos GEE.	33
Tabela 3- Capacidade de energia gerada a partir da combustão de biomassa casca de arroz no Estado do Rio Grande do Sul	40
Tabela 4 – Composição química em base óxido da CCA (%).	48
Tabela 5 – Composição química elementar da CCA (%).	49
Tabela 6 – Identificação das cinzas em estudo.	61
Tabela 7 - Critérios de abrangência.	67
Tabela 8 – Critérios de Severidade.	67
Tabela 9 - Critérios de frequência.	67
Tabela 10 – Classificação dos aspectos e impactos ambientais.	68
Tabela 11 – Modelo de planilha de avaliação de aspectos e impactos ambientais	68
Tabela 12 – Categorização da frota de veículos	69
Tabela 13 – Quantitativo de materiais para produção do concreto com fc de 35 MPa.....	71
Tabela 14 – Emissões atmosféricas para a produção de cimento Portland	71
Tabela 15 – Emissões atmosféricas para a produção dos agregados.....	71
Tabela 16 – Produção de arroz por regiões, safra 2013/2014.	77
Tabela 17 – Estimativa de produção da casca de arroz, safra 2013/2014.	78
Tabela 18 – Massa Unitária	79
Tabela 19- Avaliação de aspectos e impactos ambientais do processo de combustão da biomassa em grelha	81
Tabela 20- Avaliação de aspectos e impactos ambientais do processo de combustão da biomassa em leito fluidizado	83
Tabela 21 – Aspectos e impactos ambientais qualitativos identificados nos processos de combustão da casca de arroz.	85
Tabela 22 – Contribuição nas emissões de CO ₂ eq dos materiais que constituem os concretos.	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Fases de uma ACV	27
Figura 2 – Maiores produtores mundiais de arroz.	35
Figura 3 – Produção de arroz nas regiões do Brasil	36
Figura 4 – Série histórica de produção de arroz na região Sul do Brasil e do estado Rio Grande do Sul	36
Figura 5 – Processo de beneficiamento do arroz.	38
Figura 6 – Regimes de fluidização.	42
Figura 7 – Exemplo de combustão de biomassa em grelha.	45
Figura 8 – Soluções de valorização de CCA.	47
Figura 9 – Fluxograma de trabalho.	57
Figura 10 – Limites do sistema de ACV pelo processo de grelha.	59
Figura 11 – Limites do sistema de ACV pelo processo de leito fluidizado.	60
Figura 12– Localização geográfica das CCA em estudo.	61
Figura 13– Cinza obtida através da tecnologia de combustão em leito fluidizado borbulhante.	62
Figura 14– Cinza obtida através da tecnologia de combustão em grelha basculante.	62
Figura 15 – Fluxograma do processo de combustão da casca de arroz por grelha.	63
Figura 17– Diagrama de blocos para o inventário do ciclo de vida do transporte da casca de arroz.	69
Figura 18– Diagrama de blocos para o inventário do ciclo de vida do processo de combustão por leito fluidizado.	70
Figura 19– Diagrama de blocos para o inventário do ciclo de vida do processo de combustão por grelha.	70
Figura 20 – Divisão de regiões produtoras de arroz no estado do RS.	75
Figura 21 – Empresas beneficiadoras de arroz do estado do RS.	76
Figura 22 – UTEs do estado do RS	77
Figura 23 – Coproduto disponível no mercado para uso na construção civil.	86
Figura 24 – Diagrama de blocos para o inventário do ciclo de vida do transporte da casca de arroz.	86
Figura 25 – Diagrama de blocos para o inventário do ciclo de vida do processo de combustão por grelha.	87
Figura 26 – Diagrama de blocos para o inventário do ciclo de vida do processo de combustão por leito fluidizado	87
Figura 27 – Raio de influencia das empresas fornecedoras de biomassa.	88
Figura 28 – Emissões de CO ₂ através do transporte da biomassa casca de arroz para distância de 250 km.	89
Figura 29 – Geração da CCA através dos sistemas de GR e LF	90
Figura 30 – Empresas de concretagem do estado do RS no ano 2015	91
Figura 31 – Emissões de CO ₂ pelo transporte da CCA LF e CCA GR até as ESC.	92
Figura 32 – Massa de CCA LF e CCA GR transportada.	93
Figura 33 – Emissões de CO ₂ do concreto produzido com CCA LF e CCA GR oriundas do transporte 100 km, 200 km, 300 km e 400 km de distância.	95
Figura 34 – Emissões de CO ₂ eq do concreto produzido com 100% cimento Portland e do concreto produzido com CCA LF oriundas do transporte 100 km, 200 km, 300 km e 400 km de distância.	96

Figura 35 – Emissões de CO₂ eq do concreto produzido com 100% cimento Portland e do concreto produzido com CCA GR oriundas do transporte 100 km, 200 km, 300 km e 400 km de distância..... 97

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACV – Avaliação do Ciclo de Vida
AICV – Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida
Al – Alumínio
Al₂O₃ – Óxido de Alumínio
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
C – Carbono
Ca – Cálcio
CA – Casca de Arroz
CCA – Cinza de Casca de Arroz
CCA GR - Cinza de Casca de Arroz produzida por queima em reator de grelha
CCA LF – Cinza de Casca de Arroz produzida por queima em reator de leito fluidizado
CFCs – clorofluorcarbonos
CH₄ – Metano
CO – Monóxido de Carbono
CO₂ – Dióxido de Carbono
CT – Carbono Total
EPA – Environmental Protection Agency
ESC – Empresas de Serviços de Concretagem
FAO – Food and Agriculture Organization of the United Nations
FAOSTAT – Food and Agriculture Organization of the United Nations: Statistics
Fe – Ferro
Fe₂O₃ – Óxido de Ferro
GEE – Gases de Efeito Estufa
MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuário e Abastecimento
Mg – Magnésio
MgO – Óxido de Magnésio
MnO – Óxido de Manganês
Na₂CO₃ – Carbonato de Sódio
Na₂O – Óxido de Sódio
NaOH - Hidróxido de Sódio
Ni – Níquel
P – Fósforo
P₂O₅ – Óxido Fosfórico
Pb – Chumbo
PBT – Peso Bruto Total
PF – Perda ao Fogo
PPM – Parte Por Milhao
S – Enxofre
Si – Silício
SiO₂ – Óxido de Silício ou Sílica
SO₃ – Trióxido de Enxofre
Ti – Titânio
TiO₂ – Óxido de Titânio
UFRGS – Universidade Federal do Rio Grande do Sul
UNISINOS – Universidade do Vale do Rio dos Sinos
UTE – Usinas Termelétricas
Zn – Zinco

RESUMO

RIGON, R.R. **Avaliação ambiental do uso da casca de arroz como biomassa para fins energéticos e do coproduto cinza aplicado ao concreto**. São Leopoldo, 2015. 124 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2015.

A partir da idéia precursora do desenvolvimento sustentável e com a crescente preocupação com relação à geração de impactos ambientais, as empresas, para que se mantenham competitivas no mercado, necessitam melhorar seu desempenho ambiental, uma vez que esse se torna cada vez mais importante. Com essa perspectiva, a avaliação do ciclo de vida (ACV) vem se tornando importante entre as ferramentas utilizadas para auxiliar na compreensão, controle e redução dos impactos ambientais. Ela permite identificar os processos que contribuem de forma mais significativa para o impacto ambiental de um produto, ao longo do seu ciclo de vida, oferecendo suporte na tomada de decisões ambientalmente adequadas. Sendo a indústria da construção civil responsável por uma parcela significativa dos impactos ambientais negativos causados ao meio ambiente, estudos voltados para questões ambientais são cada vez mais requisitados e essa metodologia se insere como uma ferramenta indispensável para o desenvolvimento sustentável do setor. A Cinza de Casca de Arroz (CCA), um resíduo gerado em usinas termelétricas, possui potencial para ser utilizado como um coproduto no concreto, em substituição de parte do cimento. Diante do contexto apresentado, esse trabalho teve como objetivo avaliar ambientalmente o uso da casca de arroz como biomassa para fins energéticos e do coproduto cinza aplicado ao concreto. Para que o objetivo do trabalho fosse atingido, foram levantados os aspectos e impactos ambientais significativos dos processos de combustão da biomassa em grelha e leito fluidizado, através de uma planilha de avaliação de aspectos e impactos ambientais. A partir da identificação dos impactos significativos procederam-se o levantamento dos dados junto às Usinas Termelétricas (UTE) em estudo. Com o apoio do Software ArcGis 10.0, foram mapeadas as empresas beneficiadoras de arroz do Rio Grande do Sul, as UTEs e as concreteiras distantes 100 km, 200 km, 300 km e 400 km das geradoras da CCA. Os resultados obtidos mostram que a substituição de cimento Portland por 20% de CCA LF contribui para a redução de cerca de 24% das emissões de CO_2_{eq} do concreto em estudo, sendo que os benefícios ambientais obtidos são mantidos mesmo com a cinza distante 400 km da concreteira. Já para o concreto produzido com 20% de CCA GR os resultados mostraram uma redução de 7,7% nas emissões de CO_2_{eq} . Os resultados foram influenciados pela qualidade da cinza gerada, que por sua vez, se relaciona aos processos de combustão da biomassa. O processo de combustão da biomassa sobre a grelha promove a combustão da casca sobre diferentes gradientes de temperatura, já o processo de combustão em leito fluidizado, gera uma combustão mais uniforme da biomassa, promovido pelo perfil de temperatura relativamente constante. Assim, a cinza gerada pelo processo de combustão da casca de arroz em leito fluidizado, além de reduzir as emissões de CO_2_{eq} do concreto, contribui para a redução do consumo de materiais utilizados na sua fabricação, quando comparado ao concreto produzido com a cinza gerada pelo processo de combustão da casca de arroz em grelha.

Palavras-chave: avaliação ambiental, avaliação do ciclo de vida; casca de arroz, energia, cinza de casca de arroz, impactos ambientais, coproduto, cimento, concreto.

ABSTRACT

RIGON, R.R. **Environmental assessment of the use of rice husk as biomass for energy purposes and gray coproduct applied to concrete.** São Leopoldo, 2015. 124 p. Dissertação (Master Degree in Civil Engineering) – Postgraduate Civil Engineering Program, Unisinos, São Leopoldo.

From the precursor idea of sustainable development and the growing concern about the generation of environmental impacts, companies to remain competitive in the market, need to improve their environmental performance, as this becomes increasingly important. With this perspective, Life Cycle Assessment (LCA) has been gaining strength among the tools used to assist in understanding, controlling and reducing environmental impacts, since it identifies the processes that contribute most significantly to the environmental impact of a product throughout its life cycle, offering support in making environmentally sound decisions. As the construction industry accounts for a significant portion of the negative environmental impacts caused to the environment, studies focused on environmental issues are increasingly required and this methodology is included as an indispensable tool for sustainable development of the sector. The rice husk ash (RHA), a residue generated in thermal power plants, has the potential to be used as a co-product in concrete, cement replacement part. In front of the context presented, the aimed to evaluate the use of environmentally rice husks as biomass for energy purposes and gray coproduct applied to the concrete. For the purpose of the work was reached, the significant environmental aspects and impacts of processes combustion of biomass in grate and fluidized bed were raised through a spreadsheet evaluation of environmental aspects and impacts. From the identification of significant impacts the data collection is procedure together to power plants under study. With the support of Software ArcGIS 10.0, mapped the rice processing companies of Rio Grande do Sul, the thermal power plants and concrete producers distant 100 km, 200 km, 300 km and 400 km from the RHA generators. The results show that the replacement of Portland cement with 20% RHA FB contributes to a reduction of about 24% of CO₂ eq concrete under study, and the environmental benefits achieved are maintained even with the distant gray 400 km of service concreting plant. As for the concrete produced with 20% RHA GR results showed a reduction of about 7,7% of CO₂ eq concrete under study. The results were influenced by the quality of ash generated, which in turn, relates to the biomass combustion processes. The process of combustion of the biomass over the grid promotes the combustion of the shell over various temperature gradients, since the process of fluidized bed combustion, produces a more uniform combustion of biomass, promoted by the relatively constant temperature profile. Thus, the ash generated by the combustion process of rice husk fluidized bed, and reduce emissions of CO₂ eq concrete, helps to reduce the consumption of materials used in its manufacture when compared to concrete produced with the ash generated by the combustion process of rice husk grid.

Key-words: environmental assessment, LCA; rice husk, energy, rice husk ash, environmental impacts, co-product, cement, concrete.

1 INTRODUÇÃO

Através da necessidade de mudar os padrões de desenvolvimento, foi definido o conceito de desenvolvimento sustentável em 1987, como sendo “o desenvolvimento que encontra as necessidades atuais sem comprometer a habilidade das futuras gerações de atender suas próprias necessidades”. Esse conceito foi apresentado no relatório ‘Nosso Futuro Comum’, da Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, também conhecida como Comissão Brundtland. (ONU, 2014).

A partir da idéia precursora do desenvolvimento sustentável e com a crescente preocupação com relação à geração de impactos ambientais, as empresas, para que se mantenham competitivas no mercado, necessitam de adaptação às questões ambientais, uma vez que essas se tornaram cada vez mais importantes. (CHEHEBE, 1997). Nesse contexto, o desenvolvimento de novas ferramentas e métodos que visam auxiliar na compreensão do controle, e em especial da redução desses impactos, são essenciais para auxiliar na adequação desse novo padrão de desenvolvimento.

A Avaliação do Ciclo de Vida (ACV), uma dessas ferramentas, propõe-se a contribuir para a identificação dos aspectos ambientais e impactos potenciais associados a um produto ou processo, ao longo do seu ciclo de vida, permitindo verificar quais fases são responsáveis pelos maiores impactos e quais são passíveis de serem atenuadas. (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 2009, p. 1).

Padronizada pela International Organization for Standardization (ISO) através da norma ISO 14.040, a qual é representada no Brasil pela norma correspondente, ABNT NBR ISO 14.040:2009, a ACV é uma entre as várias ferramentas de gestão ambiental e sua metodologia de aplicação compreende quatro fases principais: definição do objetivo; definição do escopo; análise de inventário e avaliação de impacto. (ABNT, 2009).

A aplicação dessa metodologia nesse setor possibilita que o desempenho ambiental de materiais e sistemas construtivos sejam comparados, fornecendo subsídios à tomada de decisão ambientalmente mais adequada, contribuindo para o estabelecimento de estratégias ambientais e para o desenvolvimento do setor.

1.1 JUSTIFICATIVA

A ACV é uma ferramenta capaz de comparar ambientalmente produtos ou processos que desempenham a mesma função por ter o conceito de ciclo de vida inserido nos

propósitos de sua metodologia. Essa característica de avaliação evita que, na solução de um problema, um novo problema seja criado pela transferência ou surgimento de novos impactos ambientais entre diferentes fases do ciclo de vida. Assim, analisar informações sobre os aspectos e impactos ambientais dos produtos ou processos produtivos, através da ferramenta de ACV, permite identificar pontos críticos com potencial de melhoria, fundamentando decisões para melhores práticas ambientais.

Visto que as questões ambientais tornam-se cada vez mais importantes, o aproveitamento integral de resíduos é uma necessidade da indústria moderna. A cinza de casca de arroz (CCA) é um resíduo de expressiva geração no Brasil, principalmente no estado do Rio Grande do Sul. Gerado pelos processos de queima da casca de arroz, esse resíduo é composto basicamente por sílica, carbono e outros elementos como potássio, fósforo, cálcio, magnésio, ferro e sódio. (ARMESTO et al., 2002). Devido às particularidades apresentadas por esse resíduo, como alto teor de sílica e características inertes, a CCA possui potencial para ser transformada em coproduto para diversas indústrias.

Entre as indústrias com potencial para absorver esse resíduo em sua cadeia produtiva, a indústria da construção civil é uma daquelas com maior número de aplicações possíveis. Esse setor industrial é responsável pela geração de impactos ambientais significativos, por consumir grande quantidade de matérias-primas e de recursos naturais extraídos do meio ambiente, por ser importante geradora de resíduos e consumidora de uma grande quantidade de energia.

O concreto, um dos produtos com potencial de aplicação da CCA é o material de construção mais utilizado do mundo, e seu consumo anual é de aproximadamente 1 m³ para cada ser humano. A indústria do cimento é responsável por 5% a 7% das emissões globais de CO₂, sendo que este componente é o maior contribuinte das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) na produção do concreto. (MEHTA, 2001; FLOWER & SANJAYAN, 2007; MEHTA, 2009). O Brasil aparece hoje em quarto lugar na lista de maiores produtores de cimento do mundo, perdendo somente para China, Índia e Estados Unidos, respectivamente (SNIC, 2013). Mundialmente, a produção de cimento já chega a 4 bilhões de toneladas/ano (USGS, 2015).

Assim, a substituição de parte do cimento por coprodutos, como a CCA, pode ser uma das formas de minimizar os impactos ambientais causados pelo setor. Além dos benefícios ambientais gerados pela substituição e, conseqüentemente, na redução de matérias-primas não renováveis em diferentes aplicações, os impactos ambientais negativos

provocados pelo descarte inadequado desse resíduo e a redução dos custos de disposição em aterros industriais serão minimizados.

Considerando as diversas possibilidades de aplicação desse coproduto, a opção ambientalmente mais adequada para o uso da CCA pode ser obtida através do uso de ferramentas como a ACV, que auxilia na avaliação dos efeitos ambientais associados à inserção da CCA em um novo ciclo produtivo e na mensuração dos reais ganhos ambientais obtidos.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral e os objetivos específicos desse trabalho estão descritos a seguir.

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar ambientalmente o uso da casca de arroz como biomassa para fins energéticos e do coproduto cinza aplicado ao concreto.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- a) Avaliar os aspectos ambientais e os impactos potenciais associados ao ciclo de vida da geração da cinza de casca de arroz.
- b) Avaliar, comparativamente, os aspectos e impactos potenciais ambientais de dois processos geradores de CCA, por grelha e leito fluidizado.
- c) Verificar os benefícios ambientais obtidos através da substituição do cimento Portland, por CCA geradas pelos processos de grelha e leito fluidizado.

1.3 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esse trabalho está estruturado em cinco capítulos. No primeiro capítulo, apresenta-se a introdução, justificativa, objetivo e delimitações do tema. O segundo capítulo apresenta uma revisão bibliográfica referente ao tema do trabalho. Posteriormente, a terceira parte consiste em apresentar a metodologia utilizada. Os resultados obtidos são apresentados, discutidos e analisados no capítulo quatro. Por fim, o quinto capítulo relata as conclusões, considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

1.4 DELIMITAÇÕES DO TRABALHO

A avaliação do ciclo de vida realizada nesse trabalho se refere aos processos de geração da CCA em leito fluidizado e grelha, onde as instalações estão localizadas no estado do Rio Grande do Sul. Ainda, o objetivo de uso da CCA é o de um coproduto em concretos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os principais itens da revisão bibliográfica necessários para o embasamento ao tema do trabalho.

2.1 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA (ACV)

A avaliação do ciclo de vida (ACV) é a ferramenta utilizada para quantificar o impacto ambiental de um produto ao longo do seu ciclo de vida, isto é, desde a aquisição da matéria-prima ou de sua geração a partir de recursos naturais, passando por produção, uso e disposição final. Essa ferramenta tem por base a medida das trocas de massa e energia associadas a cada etapa do ciclo de vida do produto (inventário). Os impactos ambientais referentes a essas trocas são estimados a partir desses valores. (JOHN, 2010).

Os primeiros estudos envolvendo a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) tiveram início entre o final da década de 1960 e o início da década de 1980, durante a primeira crise do petróleo. Essa crise despertou o mundo para a necessidade de melhor utilização dos seus recursos naturais e motivou uma busca frenética por formas alternativas de energia. (CHEHEBE, 1997).

Nesse período, vários estudos foram realizados, entre eles, o estudo elaborado pela Coca-cola, em 1969, que teve como objetivo medir o impacto ambiental de suas embalagens, lançando as bases para os métodos atuais de análise de inventário do ciclo de vida. (EPA, 2006).

Em 1991, quando relatórios ambientais de produtos similares contiveram discrepâncias nos resultados, surgiu a necessidade de uma padronização dos termos e critérios utilizados, pois esses se baseavam em diferentes metodologias, dados e terminologias. (EPA 2006).

Com o objetivo de desenvolver um método padronizado de ACV, a *Society of environmental toxicology and chemistry* (Setac), em 1990, organizou oficinas e se tornou o principal fórum de discussão científica sobre o assunto, o que veio a servir de base para a série ISO 14040 (UNEP, 2011). Assim, os estudos de ACV foram normatizados pela NBR ISO 14040:2009, a qual traz diretrizes para a condução das avaliações.

Atualmente, essa é a única ferramenta que permite a tomada de decisão com base em um entendimento sistêmico da questão ambiental. Ao mesmo tempo, decisões

equivocadas podem ser tomadas quando definições e listas de materiais ecoeficientes são baseadas somente em um ou dois atributos, como por exemplo, conteúdo de material reciclado, não utilização de pigmentos de metais pesados e energia incorporada. (JOHN, 2010).

Além disso, a utilização dessa ferramenta de gestão ambiental permite uma avaliação minuciosa dos materiais e processos envolvidos nas etapas produtivas, possibilitando identificar os efeitos ambientalmente críticos de cada alternativa analisada. (CAMPOS, 2012). Assim, é possível identificar oportunidades para melhorar o desempenho ambiental de produtos em vários pontos de seu ciclo de vida, selecionar indicadores pertinentes de desempenho ambiental, incluindo técnicas de medição e marketing das instituições. (ABNT, 2009).

Deve ser observado que a ACV não aborda os aspectos econômicos ou sociais de um produto; no entanto, a abordagem de ciclo de vida e as metodologias descritas na norma ISO 14040 podem ser aplicadas a esses aspectos. (ABNT, 2009). Prassara-A e Grant (2011) fazem observação sobre esse aspecto, ao mencionar que os resultados apresentados em seu estudo de ACV fornecem suporte à tomada de decisão quanto às questões ambientais, e que seria necessário o relato das implicações sociais e econômicas.

Entre as limitações referentes à técnica, Oliveira (2007) aponta que a maior dificuldade encontrada para a aplicação da ferramenta de ACV no Brasil, de forma que gere resultados confiáveis, é a falta de dados sobre fluxos existentes durante o ciclo de vida dos produtos. A fim de resolver o problema, o autor sugere a exigência, no momento do licenciamento ambiental das indústrias, de informações sobre a geração de resíduos e o consumo de materiais na manufatura dos produtos.

Carvalho (2002) faz observação semelhante ao se referir à falta de dados confiáveis e representativos de fluxos das indústrias brasileiras. Da mesma forma, o autor coloca que esses dados poderiam ser gerados em nível empresarial, para fins de competição mercadológica e/ou em nível setorial para organização e divulgação dos produtos e tecnologias ambientalmente positivas.

Para Perilhon et al. (2012), a principal limitação da ACV é que as suposições e escolhas feitas ao longo do estudo podem afetar os resultados. Por essa razão, os autores sugerem que as escolhas sejam registradas e justificadas.

Dessa forma, a falta de informações sobre os impactos ambientais de produtos e processos industriais afetam todos os níveis de decisão, desde a elaboração do planejamento de empreendimentos até a simples decisão de comprar um produto.

2.1.1 Estrutura da ACV

A norma ISO 14040 (ABNT, 2009) traz a estrutura metodológica para a realização da ACV, que compreende 4 fases principais: definição de objetivo e escopo, análise do inventário, avaliação de impacto e interpretação dos resultados.

A ACV tem início com a definição dos objetivos e escopo do trabalho, incluindo as razões para a realização do estudo e a profundidade e extensão do mesmo. Em seguida, são identificados e quantificados os fluxos de insumos e emissões de cada etapa do ciclo de vida do produto, através da análise do inventário do ciclo de vida. Então, os resultados do inventário são transformados em impactos ambientais, ou seja, nos efeitos que o ciclo de vida do produto causa ao meio ambiente. Por fim, os dados precisam ser interpretados visando a tomada de decisão. (JOHN, 2010).

A metodologia da ACV é iterativa, estando as quatro fases inter-relacionadas, como ilustrado na Figura 1. Por isso, faz parte da sua metodologia a revisão do planejamento inicial, quando necessário (CHEHEBE, 1997).

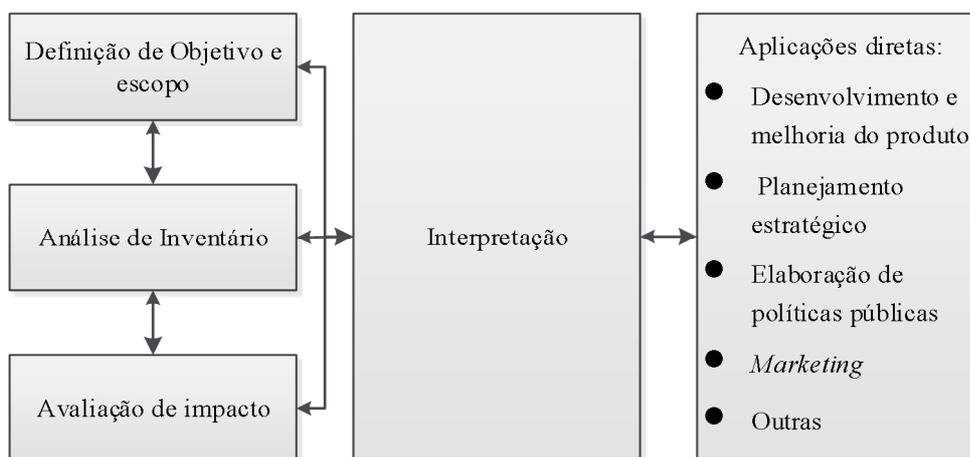


Figura 1- Fases de uma ACV

Fonte: NBR ISO 14040 (ABNT, 2009)

Definição do objetivo e escopo

Para garantir a qualidade do estudo, na primeira etapa são definidos a aplicação pretendida, incluindo as razões para a realização do estudo e o público-alvo, ou seja, para quem se pretende comunicar os resultados do estudo, sua abrangência e limites, a unidade

funcional, a metodologia e os procedimentos considerados necessários. (CHEHEBE, 1997; NBR ISO 14040, 2009).

A ACV pode ter diferentes objetivos e, dependendo desses, podem ser adotadas estratégias e simplificações no processo. Quando necessária a comparação de duas opções de processos de produção, a avaliação pode ser mais simples, focada apenas nas diferenças entre ambas e nos aspectos pertinentes. (JOHN, 2010).

Inventário do ciclo de vida

Essa fase tem por objetivo quantificar todos os fluxos, dentro dos limites do sistema definido, envolvidos durante o ciclo de vida de um produto, processo ou atividade (CHEHEBE, 1997; JOHN, 2010). Em outras palavras, todos os recursos extraídos do meio ambiente e as emissões liberadas ao longo do ciclo de vida de um produto são agrupados em uma base de dados, chamada de inventário do ciclo de vida.

O levantamento de dados envolve medidas de campo, a coleta de dados de fornecedores e buscas bibliográficas (JOHN, 2010). Devido à diversidade e volume de dados obtidos nessa fase, Chehebe (1997) sugere que esses dados sejam organizados de acordo com grandes títulos como, por exemplo, energia, matérias-primas, materiais auxiliares e outras entradas físicas, produtos, emissões para a atmosfera, geração de efluentes líquidos e resíduos sólidos e outras emissões. Posteriormente, dentro desses títulos e de acordo com os objetivos, as categorias individuais podem ser detalhadas.

Os resultados do inventário das entradas e saídas fornecidos pela análise de ciclo de vida dos produtos podem ser utilizados de várias formas: (CHEHEBE, 1997).

- a) fornecer informações sobre as necessidades totais de recursos, consumo de energia e emissões;
- b) identificar pontos dentro do ciclo de vida como um todo, ou dentro de um determinado processo, onde seja possível consideráveis reduções nas necessidades de recursos e emissões
- c) comparar as entradas e saídas do sistema associadas com produtos alternativos, processos ou atividades.
- d) auxiliar no desenvolvimento de novos produtos, processos ou atividades visando uma redução das necessidades de recursos e/ou emissões.

Avaliação de impacto do ciclo de vida

A terceira fase da ACV é constituída pela avaliação do impacto do ciclo de vida, a qual compreende um processo qualitativo e quantitativo de entendimento e avaliação da magnitude e significância dos impactos ambientais potenciais de um produto ou serviço, identificados na análise do inventário do ciclo de vida. (CHEHEBE, 1997; ISO 14040).

Nessa fase, todos os dados coletados referentes às entradas e saídas dos fluxos elementares são transformados em indicadores de impactos relacionados à saúde humana, meio ambiente e esgotamento de recursos. Os resultados obtidos nessa etapa devem ser vistos como potenciais indicadores ambientais e não como previsões reais de efeitos ambientais (MENDES, 2013).

A seleção de categorias de impacto é o primeiro passo dessa fase. Para os estudos de ACV, os impactos ambientais são classificados em categorias de acordo com a metodologia de avaliação de impacto. Os principais métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) e suas categorias estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1– Métodos de AICV e suas categorias de impactos tradicionais.

Métodos de AICV	Categorias de impacto								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
CML 2002	x	x	X	x	x	x	x	x	x
Eco indicator 99	x	x	X	x		x	x	x	x
Ecological Scarcity	x	x			x		x	x	x
EDIP 97	x	x	X	x	x	x	x	x	
EDIP 2003	x	x	X	x	x	x	x		
EPS 2000							x	x	
Impact 2002+	x	x	X	x	x	x	x	x	x
LIME	x	x	X	x	x	x	x	x	x
LUCAS	x	x	X	x	x	x	x	x	x
MEEuP	x	x	X	x	x		x	x	
ReCiPe	x	x	X	x	x	x	x	x	x
TRACI	x	x	X	x	x	x	x	x	x
USEtox							x	x	
IMPACT World +	x	x	X	x	x	x	x	x	x

- (1) Mudanças climáticas; (2) Depleção da camada de ozônio; (3) Acidificação; (4) Eutrofização; (5) Formação de Fotooxidantes, (6) Ecotoxicidade; (7) Toxicidade Humana; (8) Consumo de Recursos Naturais; (9) Ocupação do solo

Fonte: Adaptado de Mendes (2013).

A decisão sobre quais categorias de impactos ambientais devem ser analisadas depende da abrangência e da agenda ambiental de cada região ou mesmo de cada setor industrial.

Como observado, existem diversos métodos de AICV disponíveis, e a variedade das características e particularidades desses possuem grande potencial de interferir nos resultados finais da avaliação dos impactos (MENDES, 2013).

Buscando subsídios para a aplicação dos principais métodos e modelos de AICV no Brasil, Mendes (2013) avaliou as características e aplicabilidade desses métodos. A partir das suas observações, ele constatou que a maioria dos métodos avaliados foram criados considerando escopos regionais específicos. Dessa forma, os métodos recomendados para aplicação no Brasil são aqueles que apresentam uma abrangência classificada como global para o escopo de aplicação de suas categorias de impacto, sendo eles: CML 2002 (*Center for Environmental Science*), EDIP 97 (*Environmental Desing of Industrial Products*), EPS 2000 (*Environmental Priority Strategies in product development*), USEtox e IMPACT World+.

Mendes (2013) também avaliou o modelo de caracterização dos métodos de AICV para a categoria de impacto acidificação. A partir da análise, o autor indica a utilização do modelo que compõe o método IMPACT world+, por ser o único entre os modelos analisados que apresenta um escopo de aplicação com abrangência global e que considera fatores de sensibilidade do solo e de destino e efeito atmosférico durante a caracterização. O autor observa a necessidade de desenvolver bases metodológicas com informações sobre a sensibilidade ecológica em continentes fora da Europa e da América do Norte, visto que a maioria dos modelos analisados representam as emissões de substâncias acidificantes que ocorrem nesses continentes.

Silva (2012) optou por utilizar em seu estudo mais de um método de AICV, dentre eles CML (2001), o método EDIP (1997) e USEtox (2008), devido à inexistência de um método de avaliação de impactos que leve em consideração as especificidades brasileiras. Para os resultados em todas as categorias de impacto analisadas, as constatações foram equivalentes para os métodos de AICV CML (2001) e EDIP (1997), exceto para as categorias de ecotoxicidade e toxicidade humana, onde se considerou os resultados obtidos pelo método USEtox, por ser considerado atual e o mais aconselhável ao se avaliar essas categorias de impacto.

Interpretação

Essa fase consiste em identificar e analisar os resultados obtidos nas fases de inventário e da avaliação de impacto de acordo com o objetivo e o escopo previamente definidos para o estudo (CHEHEBE, 1997).

Outras técnicas de avaliação ambiental podem ser necessárias nessa fase de interpretação dos resultados para complementar as conclusões tiradas na ACV, tais como avaliação de risco e avaliação de impacto ambiental. (CHEHEBE, 1997).

2.2 IMPACTOS AMBIENTAIS

Para se desenvolver uma ACV, é essencial o conhecimento dos impactos ambientais potenciais relacionados a toda cadeia produtiva de obtenção de um produto. Dessa forma, os principais impactos ambientais serão brevemente descritos para seu melhor entendimento.

Mudanças climáticas ou aquecimento global

As mudanças climáticas podem ser atribuídas às atividades humanas que impactam e alteram a composição da atmosfera, como também podem ser resultantes de forças naturais externas, como variáveis orbitais da terra, emissão solar e outros processos naturais. (OLIVEIRA; VECCHIA, 2013).

Historicamente, o planeta já passou por mudanças climáticas, entre os séculos XV e XVIII, devido a fatores naturais. No entanto, é praticamente consenso no meio científico que o quadro atual das mudanças climáticas está fortemente ligado às atividades antrópicas. (USEPA, 2014; IPCC, 2014).

O aumento da concentração dos Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera tem se intensificado nas últimas décadas. A temperatura média da atmosfera ao longo do século XX aumentou cerca de 0,8°C, e as previsões para o século XXI são de que a temperatura média da terra aumente entre 1,4 °C e 5,8°C. A partir do aumento da temperatura média do planeta, espera-se que impactos importantes ocorram, como alteração no regime de chuvas e secas, desertificação, derretimento de geleiras, aumento no nível dos oceanos, etc. (DHILLON; WUEHLISCH, 2013). Esse conjunto de eventos é conhecido também como aquecimento global, embora a designação mais adequada seja o termo mudanças climáticas. (USEPA, 2014).

O efeito estufa é um fenômeno natural pelo qual a atmosfera é mantida numa temperatura onde é possível existir vida, aproximadamente a 15°C, em vez de -18°C, que seria a temperatura na ausência do efeito de estufa. Esse fenômeno ocorre através do aquecimento da superfície do planeta, devido à presença de gases na atmosfera que absorvem e emitem radiação infravermelha emitida pelo sol. Aproximadamente 50% da radiação solar que atinge a superfície da Terra é refletida de volta ao espaço. Os outros 50% são absorvidos

pela superfície do planeta que é aquecida e, em seguida, emite uma forma menos intensa de energia em comprimentos de onda mais longos. Os GEE na atmosfera impedem que essa radiação de comprimento de onda mais longo escape do sistema e absorva a maior parte dessa energia. Em seguida, reemitem essa energia em todas as direções, aquecendo a superfície da terra. (DHILLON; WUEHLISCH, 2013).

Segundo Oliveira e Vecchia (2013), um dos fatores importantes na questão das mudanças climáticas é a força radioativa (medido na unidade w/m^2), que se refere a um processo que perturba o balanço da radiação recebida do sol e da radiação de saída da terra. Esse forçamento pode ser positivo, quando leva ao aquecimento da superfície terrestre, ou negativo, quando tende a provocar o resfriamento da superfície terrestre.

O forçamento radioativo do sistema climático é determinado pelos Gases de Efeito Estufa, pois esses possuem a capacidade de reter radiação solar incidente na superfície terrestre, como vapor de água, gás carbônico (CO_2), metano (CH_4), e óxido nitroso.

O dióxido de carbono (CO_2) está naturalmente presente na atmosfera como parte do ciclo do carbono. No entanto, as atividades antrópicas, como a queima de combustíveis fósseis, de resíduos de biomassa e mudanças no uso da terra são responsáveis pelo aumento da concentração desse gás na atmosfera, tornando o CO_2 o principal gás causador de efeito estufa. (USEPA, 2014).

As concentrações de CO_2 na atmosfera aumentaram aproximadamente 40% desde o período pré-industrial (século 18), passando de 280 ppm (período anterior a 1750) para 390 ppm (em 2010), sendo que essa concentração excede as concentrações dos últimos 800.000 anos, quando variaram entre 180 e 300 ppm. (USEPA, 2014).

Da mesma forma que o CO_2 , o metano (CH_4) pode ser encontrado na atmosfera pela emissão a partir de fontes naturais e pelas atividades antrópicas, que correspondem a 60% das emissões globais de CH_4 . Entre as atividades antrópicas responsáveis pela emissão do metano à atmosfera estão a produção e transporte de carvão, a queima de combustíveis como gás natural, carvão e petróleo, assim como a criação de animais ruminantes e a decomposição da matéria orgânica em aterros sanitários. (USEPA, 2014).

O óxido nitroso (N_2O) é emitido principalmente pelas atividades agrícolas com o uso de fertilizantes, sendo essa a fonte primária de emissão desse gás. Outros gases do efeito estufa, como halocarbonos (grupo de gases que contém flúor, cloro e bromo, como os

clorofluorcarbonos) são emitidos principalmente por processos industriais, refrigeração e pelo uso de uma variedade de produtos. (USEPA, 2014).

Os gases de efeito estufa apresentam influências distintas sobre as mudanças climáticas, que podem ser medidas pelo potencial de aquecimento global. O potencial de aquecimento global de um gás é medido pela energia total que ele absorve durante um determinado período de tempo (geralmente 100 anos), em comparação com o dióxido de carbono. (USEPA, 2014).

O potencial de aquecimento global comparativo do CH₄ sobre as mudanças climáticas é 21 vezes maior do que o CO₂ durante um período de 100 anos. Ainda depois de emitidos, muitos dos principais gases causadores do efeito estufa podem permanecer por dezenas ou centenas de anos na atmosfera, fazendo com que os efeitos do aquecimento sobre o clima persistam por um longo tempo. (USEPA, 2014).

Considerando os diferentes potenciais de aquecimento global pelos GEE, as emissões são comumente expressas em CO₂ equivalente, que representa a quantidade de CO₂ necessária para causar a mesma força radioativa causada por uma determinada mistura de diferentes gases do efeito estufa. (LIMA, 2010). A Tabela 2 apresenta o potencial de aquecimento global dos principais GEE.

Tabela 2 – Potencial de aquecimento global dos GEE.

GEE	Fonte de emissão	Tempo médio de vida na atmosfera (anos)	Potencial de aquecimento global- 100 anos
CO ₂	Emitido principalmente através da queima de combustíveis fósseis, de resíduos de biomassa e mudanças no uso do solo e desmatamento	*	1
CH ₄	Emitido principalmente na produção e transporte de carvão e na queima de combustíveis como gás natural, carvão, petróleo, etc. e também na criação de animais em atividades agrícolas e em aterros de resíduos sólidos urbanos	12	21
N ₂ O	Emitido por atividades agrícolas, indústrias e na queima de combustíveis e resíduos sólidos	114	310

*O tempo médio de vida do dióxido de carbono é mal definido, pois esse gás não é destruído ao longo do tempo, por se movimentar entre as diferentes partes do sistema oceano-atmosfera-sistema terrestre.

Fonte: Adaptado USEPA (2014).

Eutrofização

A eutrofização está diretamente relacionada ao enriquecimento de nutrientes na água ou no solo, especialmente a partir de substâncias a base de nitrogênio ou fósforo. A eutrofização pode alterar a biodiversidade nos ecossistemas. Na água, pode conduzir a uma

redução da concentração de oxigênio dissolvido, afetando os diversos microorganismos presentes. (SILVA, 2012).

Acidificação

A acidificação é um impacto causado sobre os ecossistemas, por deposições ácidas na água e no solo, motivada pelo aumento das emissões atmosféricas provenientes das atividades antrópicas. As principais substâncias que contribuem para a acidificação provêm das emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x) e de enxofre (SO_x) e amônia (NH_3). Os compostos ácidos podem ser depositados sobre a superfície terrestre através de chuva, neve e neblina. A chuva ácida é o fenômeno mais comum de precipitação dos gases dissolvidos. Nessa categoria de impacto, os resultados são expressos em dióxido de enxofre equivalente, em $\text{kg SO}_{2\text{-eq}}/\text{kg}$ de emissão. (SILVA, 2012).

Depleção da camada de ozônio

A camada de ozônio atua como um escudo contra a radiação ultravioleta prejudicial à saúde dos seres vivos. As alterações na concentração de ozônio (O_3) na estratosfera são provocadas pela emissão de substâncias denominadas clorofluorcarbonos (CFCs). A depleção do ozônio propicia uma maior incidência da radiação ultravioleta sobre a superfície da terra, podendo aumentar o risco de câncer de pele e causar desequilíbrio nos ecossistemas, entre outros malefícios. Em geral, a depleção de ozônio normalmente é expressa em escala de $\text{kg de CFC -11}_{\text{-eq}}$. Ou $\text{R- 11}_{\text{-eq}}/\text{kg}$ de emissão. (SILVA, 2012).

Ecotoxicidade

Há inúmeras substâncias químicas produzidas e introduzidas ao meio natural oriundas das atividades antrópicas. Algumas dessas substâncias são essencialmente artificiais; outras, apesar de terem ocorrência natural, tiveram sua concentração aumentada no meio ambiente. Dessa forma, a ecotoxicidade é a relativa ação prejudicial, algumas vezes irreversível, de substâncias tóxicas à fauna e à flora, que podem afetar os organismos vivos, a função e a estrutura do ecossistema. A unidade de referência para a ecotoxicidade depende do método de avaliação de impacto do ciclo de vida adotado. (SILVA, 2012).

Formação fotoquímica de ozônio troposférico

Sobre a influência dos raios ultravioletas, os óxidos de nitrogênio (NO_x) reagem com as substâncias orgânicas voláteis, produzindo oxidantes que causam nevoeiro fotoquímico (ou smog). A inalação desse nevoeiro é considerada danosa à saúde humana e

pode alterar o nicho ecológico de outros organismos vivos. Seu fator de caracterização, em geral, é expresso em Kg de etileno (C_2H_4) equivalente, C_2H_4 -eq./Kg de emissão. (SILVA, 2012; CHEHEBE, 1997).

2.3 PRODUÇÃO DE ARROZ

O Brasil é o maior produtor de arroz fora da Ásia, ocupando a nona posição no ranking mundial de produção, como visto na Figura 5, que apresenta os dez maiores produtores de arroz com suas respectivas produções. Em 2012, o país colheu 11,5 milhões de toneladas do grão. (FAOSTAT, 2012).

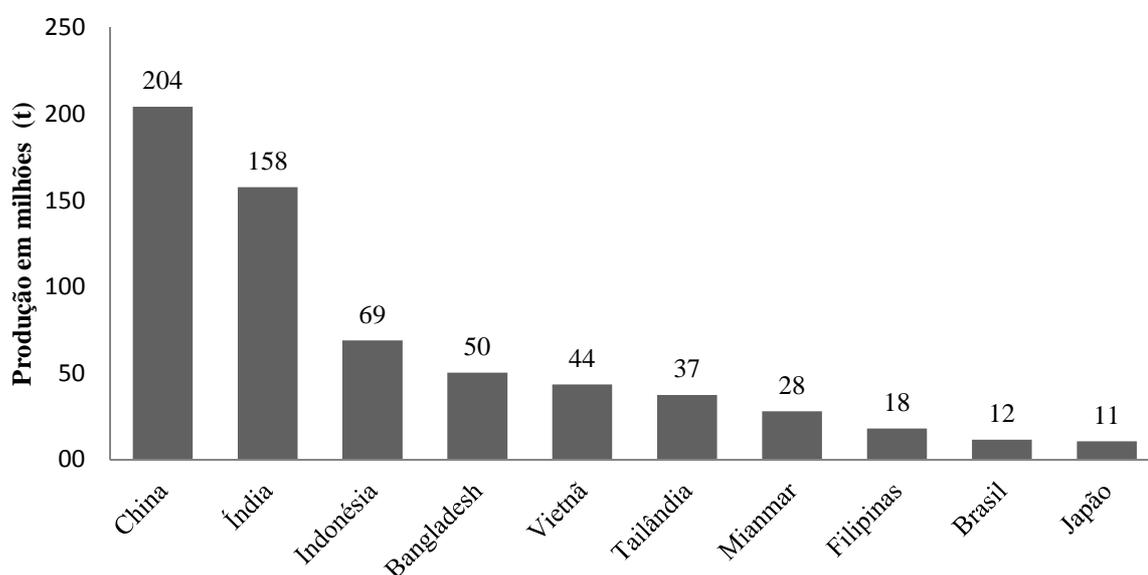


Figura 2 – Maiores produtores mundiais de arroz.

Fonte: (FAOSTAT, 2012).

A produção está distribuída principalmente na região Sul do Brasil (Figura 3), no estado do Rio Grande do Sul, o maior produtor nacional de arroz com 66,5% da produção em 2013, seguido pelos estados de Santa Catarina (8,6%), Maranhão (5,3%), Mato Grosso, (4,4%) e Tocantins (4,7%) com suas respectivas produções. (MAPA, 2013).

O estado do Rio Grande do Sul conta com aproximadamente 225 indústrias que beneficiam o arroz. Em 2013, cerca de 5,6 milhões de toneladas do grão foram beneficiadas (IRGA, 2013). Nota-se uma tendência de aumento na produção de arroz na região Sul do Brasil, como pode ser visto na Figura 4. Dessa forma, cabe observar as estimativas, que prevêem um aumento de 11,1% da produção nos próximos 10 anos, período de 2012/2013 a 2022/2023. (MAPA, 2013).

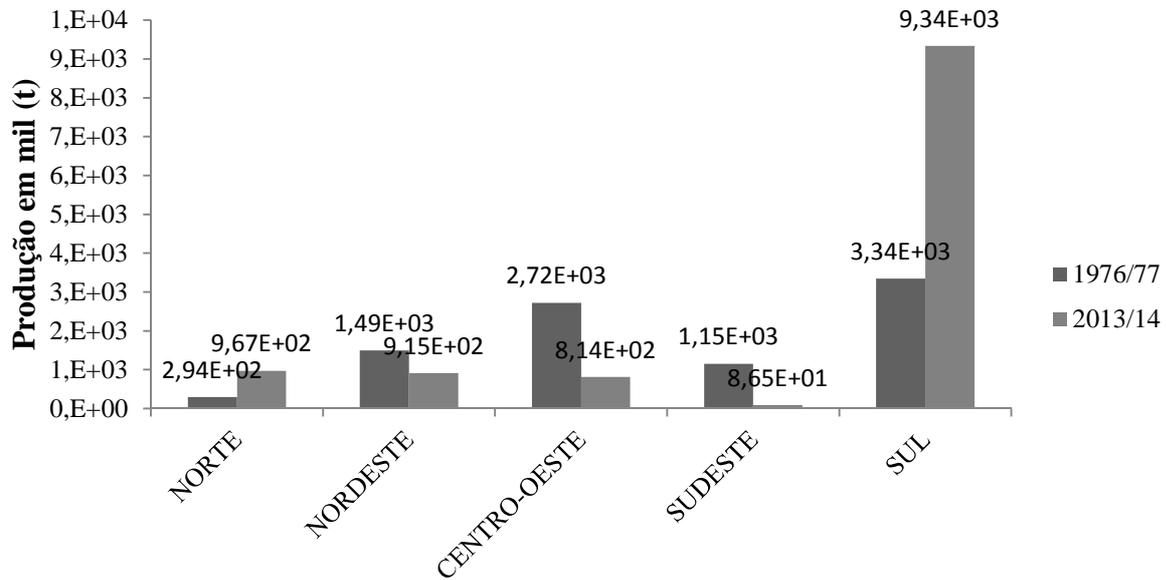


Figura 3 – Produção de arroz nas regiões do Brasil

Fonte: (CONAB, 2015).

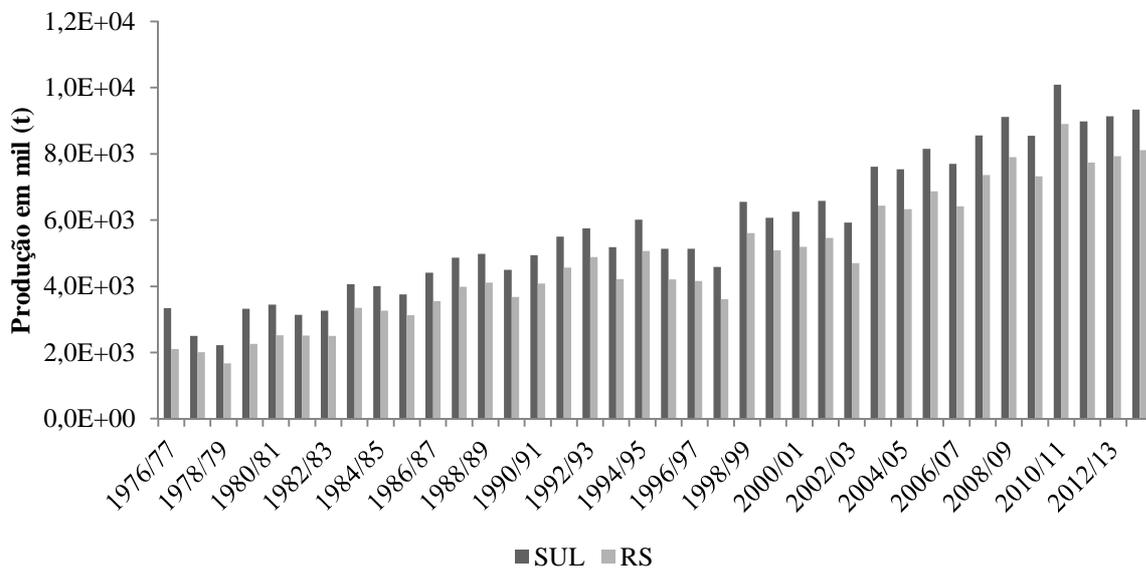


Figura 4 – Série histórica de produção de arroz na região Sul do Brasil e do estado Rio Grande do Sul

Fonte: (CONAB, 2015).

Sendo a cultura do arroz a que produz maiores quantidades de resíduos, uma consequência do aumento da produção do grão será um aumento na geração dos resíduos agrícolas envolvidos no processo.

Assim, com o objetivo de entender os principais resíduos gerados no processo de produção e beneficiamento do arroz, as etapas envolvidas estão brevemente descritas a seguir e esquematizadas na Figura 5 (LIM et al., 2012; SAIDELLES et al., 2012):

- Colheita: o objetivo da colheita é assegurar máxima produtividade de grãos. Os sistemas de colheita podem variar de região para região e incluem diferentes métodos para colheita e debulha. É nesse processo que a palha do arroz é gerada.
- Transporte e recepção: os grãos colhidos são levados da área de produção para a unidade de recebimento.
- Pré-limpeza: essa etapa tem como principal objetivo retirar as impurezas através de equipamentos como peneiras e ventiladores. O principal resíduo gerado nesse processo é a poeira.
- Secagem: a secagem pode ser feita por vários métodos, desde o natural (onde o arroz é seco ao sol) até o método artificial ou mecânico. Algumas fornalhas utilizam como combustível a própria casca resultante do beneficiamento do arroz.
- Armazenamento: os grãos podem ser armazenados em sacaria ou bags, ou a granel, em silos metálicos. O adequado armazenamento é importante para manter a segurança do cereal, impedindo que absorva umidade e seja atacado por pragas.
- Descascamento: É o processo de remoção da casca do arroz. Nesse processo é gerado o arroz integral. Dependendo da escala de produção e requisitos do mercado, o sistema para descascar o grão pode ser simples, de dois estágios, ou um processo de múltiplos estágios. Nessa etapa do processo, o resíduo gerado é a casca do arroz.
- Brunimento/polimento: Esse processo consiste em remover o germe e a película que envolve a cariopse do grão. Pode ser realizado por abrasão ou fricção utilizando as pedras dos brunidores. Esse processo gera o grão polido e o farelo de arroz (germe e película removidos da periferia do grão). Para melhorar o brilho do grão, pode ser usado ainda polimento a base de água.
- Seleção: o processo consiste na separação de fragmentos e de grãos com defeitos ou quebrados, melhorando a qualidade do produto. Isso garante melhor preço no momento da comercialização e ainda a classificação do arroz de acordo com os tipos e comprimentos dos grãos, sendo gerado o arroz inteiro e o arroz quebrado.

- Classificação: Essa etapa deve seguir a legislação vigente em que o tipo varia de 1 a 5, de acordo com a qualidade. Nesse processo, são removidos os materiais estranhos ou fragmentos que não foram retirados durante o processo de limpeza. Após esses processos, o arroz está apto e pronto para ser empacotado.

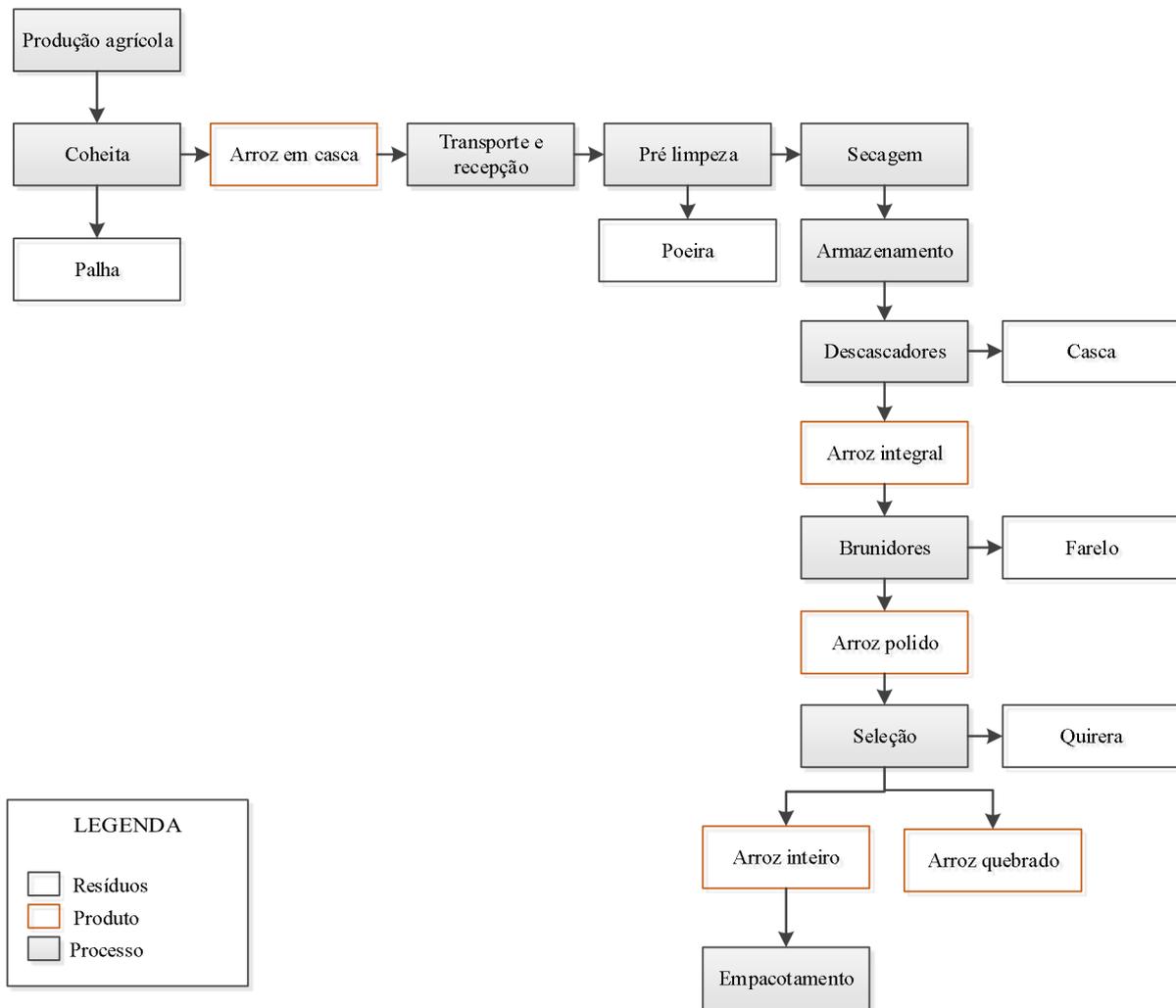


Figura 5 – Processo de beneficiamento do arroz.

Fonte: Adaptado de Moraes et al. (2015).

A casca do arroz é o coproduto mais expressivo gerado no beneficiamento do arroz e seu volume representa cerca de 20% da massa do arroz em casca e palha de arroz, que é produzida em massa aproximadamente equivalente ao rendimento de grãos (PANDEY et al., 2010). Dentre os vinte e um tipos de resíduos identificados por Saidelles et. al (2012) do processo de uma beneficiadora de arroz do Rio Grande do Sul, a casca de arroz e a cinza geradas na etapa de secagem do grão foram os resíduos observados em maior quantidade.

Dessa forma, a utilização ou disposição de forma adequada dos subprodutos gerados é um dos principais desafios enfrentados pela indústria do arroz. (LIM et al., 2012).

2.4 BIOMASSA CASCA DE ARROZ PARA GERAÇÃO DE ENERGIA

Como consequência do crescimento populacional e econômico, a previsão é que a demanda por energia aumente em 56% entre os anos de 2010 e 2040. Apesar dos combustíveis fósseis, petróleo, gás natural e carvão permanecerem como as principais fontes de energia até o ano de 2040, uma das fontes renováveis com maior potencial de crescimento nos próximos anos são aquelas a partir dos diferentes tipos de biomassa. (ANEEL, 2008; UNITED STATES, 2013).

A biomassa é qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. Pode ser classificada de acordo com sua origem em biomassa florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e resíduos sólidos urbanos e industriais. Os derivados obtidos dependem tanto da matéria-prima utilizada (cujo potencial energético varia de tipo para tipo) quanto da tecnologia de processamento para obtenção dos energéticos. (ANEEL, 2008).

Essa fonte de energia é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética, visto que a dependência do uso de combustíveis fósseis tem gerado preocupações quanto ao esgotamento desses recursos e às mudanças climáticas. (LIM et al., 2012).

A biomassa tem sido considerada uma fonte de energia promissora, devido ao seu potencial de neutralização de CO₂ e sua ampla disponibilidade de diversas fontes (LIM et al. 2012; YIN; ROSENDAHL; KAER, 2008). Ainda, a maioria dos combustíveis de biomassa tem pouco ou nenhum enxofre em sua composição; portanto as emissões de SO₂ podem ser reduzidas se os combustíveis como o carvão, que contêm alto teor de enxofre, forem substituídos. (YIN; ROSENDAHL; KAER, 2008).

A utilização da biomassa como fonte de energia enquadra-se ao conceito do desenvolvimento sustentável, visto que permite a criação de empregos na região, dinamiza as atividades econômicas, reduz os custos relativos à distribuição e transmissão da energia gerada e, sendo utilizada de forma sustentável, não agride o meio ambiente. (FOLETTTO et al., 2005).

A casca de arroz, um dos resíduos gerados no beneficiamento do arroz, vem sendo utilizada para a geração de energia e tem recebido atenção, visto que não ameaça o abastecimento alimentar e é uma fonte vital de energia renovável. (LIM et al., 2012).

No Brasil, de acordo com o Banco de Informações de Geração da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), até o mês de maio de 2015, o país contava com 507 termelétricas movidas a biomassa, que correspondem a um total de 12 milhões de kilowatts (kW) instalados. Desse total, 9 usinas são movidas exclusivamente com casca de arroz, sendo que 7 dessas usinas estão instaladas no Rio Grande do Sul, nos municípios de Itaqui, São Gabriel, Alegrete, São Borja e Dom Pedrito. (ANEEL, 2015). A Tabela 3 apresenta a capacidade de geração de energia das usinas citadas.

Ainda segundo o Banco de Informações da ANEEL, em novembro de 2008, existiam 302 termelétricas movidas a biomassa no país, que correspondiam a um total de 5,7 mil MW (megawatts) instalados. Do total de usinas relacionadas, apenas 4 usinas eram abastecidas por casca de arroz com potência total de 21 MW (Atlas de Energia Eletrica do Brasil). Já em 2009, Ferro (2009) afirmou que poderiam ser gerados entre 109 MW e 136 MW de energia se toda a produção gaúcha fosse beneficiada no Rio Grande do Sul, visto que previa-se a geração de mais de 1 milhão de toneladas de resíduo de casca de arroz.

Tabela 3- Capacidade de energia gerada a partir da combustão de biomassa casca de arroz no Estado do Rio Grande do Sul

Combustível	Usina	Município	Potência (MW)	Total	
				Nº de Usinas	MW
Casca de arroz	Itaqui	Itaqui	4,2	7	51,7
	Urbano São Gabriel	São Gabriel	25,1		
	CAAL	Alegrete	3,8		
	SVA	Alegrete	4,9		
	São Borja	São Borja	12,5		
	Camil Alimentos	Itaqui	4,0		
	Engenho Coradini Ltda	Dom Pedrito	1,2		

Fonte: ANEEL, (2014)

Em outros países, como na Tailândia, a casca de arroz é uma das fontes de energia renováveis mais importantes. Recentemente, o governo tailandês passou a promover o uso da biomassa com propósitos de geração de energia, a fim de substituir o uso dos combustíveis fósseis e, conseqüentemente, reduzir os impactos ambientais (PASSARA-A; GRANT, 2011).

2.4.1 Processos de combustão de casca de arroz

Como mencionado, a casca de arroz é um resíduo oriundo do beneficiamento de arroz. Esse resíduo possui alto valor energético, por apresentar elevado poder calorífico. Fernandes (2015) determinou o poder calorífico de duas cascas oriundas dos municípios de Alegrete e São Borja e encontrou valores de 13,54 MJ/kg e 13,26MJ/kg, respectivamente.

Quando comparado o desempenho ambiental de duas alternativas de valorização da casca de arroz, sendo uma delas a produção de energia e a outra a produção de etanol, através da metodologia de ACV, verifica-se que a produção de energia é ambientalmente mais favorável. (PRASSARA-A; GRANT, 2011).

A combustão adequada da casca de arroz gera gases com baixos níveis de poluentes, como o monóxido de carbono e materiais particulados. Por outro lado, a combustão inadequada gera diversos poluentes, como fumaça, gases ácidos, compostos orgânicos voláteis e materiais particulados, os quais podem vir a causar impactos adversos sobre a saúde humana. (MARTÍNEZ et al., 2011).

Atualmente, as tecnologias mais utilizadas para a combustão de biomassa incluem o sistema de grelhas e os sistemas de leito fluidizado. O tipo de equipamento e o processo de combustão da CA (processo artesanal a céu aberto, grelhas, processo industrializado por leito fluidizado), assim como o tempo e a temperatura de queima, geram cinzas com formas estruturais variáveis (amorfa e/ou apresenta fases cristalinas). (FERRO; SILVA; WIEBECK, 2007; FERRO, 2009).

2.4.1.1 Leito Fluidizado

Sistemas de leito fluidizado se apresentam como uma tecnologia eficiente de conversão termoquímica de materiais heterogêneos e irregulares, de baixa densidade e de formas complexas como a casca de arroz. (MARTÍNEZ et al., 2011).

Um reator de leito fluidizado consiste de uma câmara de reação que contém partículas sólidas suportadas por uma placa distribuidora e mantidas em suspensão devido ao escoamento de um gás ou líquido, através do fluxo ascendente. (MARTÍNEZ, 2009). A temperatura de combustão no leito é relativamente baixa, normalmente entre 700-900°C.

A Figura 6 apresenta as principais tecnologias de combustão em leito fluidizado, distintas pelo efeito da velocidade do gás com o regime de fluidização.

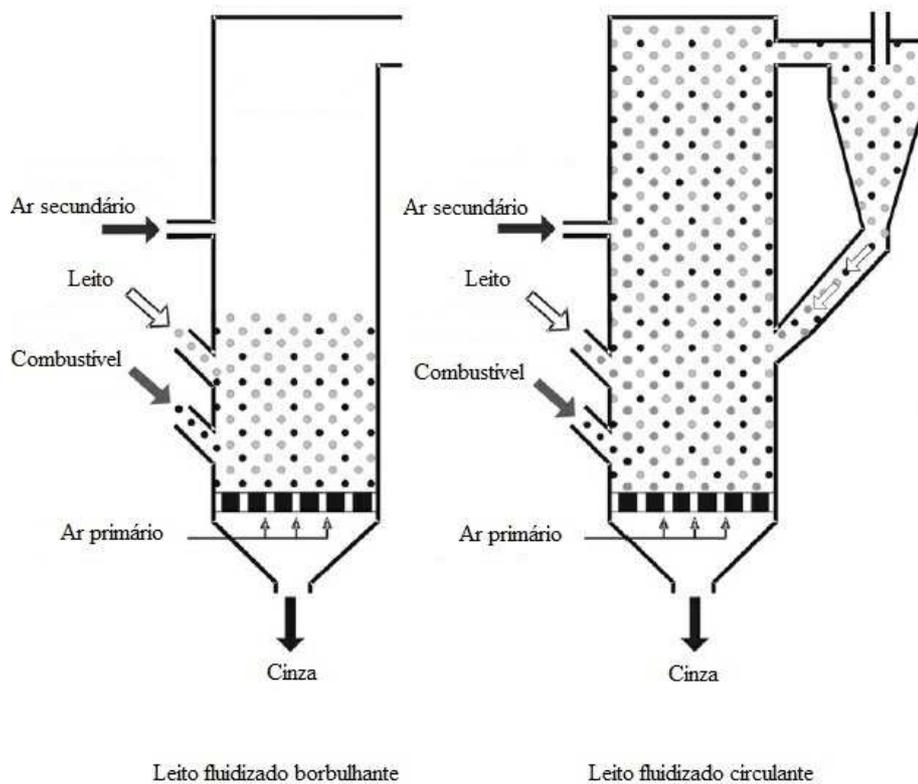


Figura 6 – Regimes de fluidização.

Fonte: Adaptado (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008).

Em leitos fluidizados do tipo borbulhante, a velocidade de fluidificação varia entre 1,0 e 2,0 m/s, conforme aumenta a velocidade do gás; grandes instabilidades, na forma de bolhas, são observadas. O material do leito geralmente é areia de sílica, possui cerca de 0,5 e 1 mm de diâmetro e situa-se na parte inferior do forno. O ar primário é fornecido através de uma placa distribuidora, injetado abaixo do leito, com a função de fluidificar o mesmo. O ar secundário é introduzido através de várias entradas dispostas horizontalmente no início da parte superior da fornalha (freeboard), a fim de garantir o fornecimento de ar e reduzir as emissões de NO_x . A principal vantagem nesse sistema é a sua flexibilidade em relação ao tamanho das partículas e da umidade do combustível (biomassa). Além disso, é possível utilizar misturas de diferentes tipos de biomassa ou ainda, a co-combustão com outros combustíveis. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008).

Um sistema de leito fluidizado circulante é obtido ao aumentar a velocidade de fluidificação situada entre 5 e 10 m/s e através do uso de areias com diâmetros menores, entre 0,2 e 0,4 mm. As partículas de areia serão transportadas com o gás de combustão, separadas em um ciclone quente e alimentadas de volta para a câmara de combustão. Uma vantagem apresentada nos sistemas de leito fluidizado circulante é a maior turbulência, que conduz a

uma melhor transferência de calor e uma distribuição de temperatura muito homogênea no leito. Uma desvantagem é representada pelas altas cargas de cinza em suspensão com o gás de combustão, que faz necessário dispor de sistemas eficientes para a precipitação das cinzas e também a limpeza das caldeiras. Outro ponto a ser considerado é que o material do leito também é perdido com a cinza, o que torna necessário adicionar periodicamente material para a planta. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008).

Cordeiro (2009) afirma que reatores de leito fluidizado apresentam excelente contato entre fase sólida e o fluido, obtendo-se um controle quase perfeito da temperatura de combustão da casca de arroz, propiciando rendimentos de combustão elevados. Desse modo, essa tecnologia é capaz de produzir cinza amorfa com baixo teor de carbono não queimado em intervalos curtos de reação.

O bom desempenho do processo de combustão de casca de arroz em leito fluidizado foi observado por Martínez et al. (2011), Martínez et al. (2009) e Armesto et al. (2002). Os resultados das pesquisas demonstraram o potencial para a obtenção de cinzas com altos teores de sílica, superiores a 91% e baixos teores de carbono.

Além disso, a utilização de reatores por leito fluidizado é caracterizada pela sua capacidade de reduzir consideravelmente as emissões de poluentes. Segundo Duan et al. (2013), os principais poluentes emitidos por esses reatores são monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x) e SO₂. As emissões de NO_x são baixas quando comparadas com as emissões por outros incineradores, o que pode ser atribuído à baixa temperatura de operação (700-900 °C). (DUAN et al., 2013).

Duan et al. (2013) estudaram as emissões de poluentes da combustão da casca de arroz através de um incinerador de leito fluidizado. Os autores investigaram também os efeitos de parâmetros operacionais, tais como a taxa de fluxo de ar primário, a taxa de fluxo de ar secundário e a proporção de ar em excesso. Devido ao baixo teor de enxofre na casca de arroz, os autores observaram emissões de enxofre (SO₂) inferiores a 80 ppm. Quanto à concentração de NO_x (ppm), verificou-se que essa concentração aumenta em função do aumento do ar em excesso. A emissão de CO diminui quando aumenta a taxa de fluxo de ar secundário devido ao aumento da eficiência de combustão.

2.4.1.2 Grelha

Os sistemas de combustão por grelha estão entre as principais tecnologias utilizadas para a geração de energia (YIN; ROSENDAHL; KAER, 2008). Esses sistemas são

apropriados para biomassa combustível com alto teor de umidade, partículas com tamanho variado e alto teor de cinzas. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008).

Existem várias tecnologias de grelha disponíveis, tais como: grelhas fixas, grelhas móveis, grelhas basculantes, grelhas rotativas e grelhas vibratórias. Todas essas tecnologias possuem vantagens e desvantagens específicas, em função das propriedades do combustível; por isso, devido à diferença do comportamento de combustão das biomassas, não se indica a mistura de combustíveis. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008).

A grelha, quando bem projetada e controlada, garante uma distribuição homogênea do combustível e do leito de brasas sobre a superfície, a fim de garantir o fornecimento de ar ao longo das várias zonas de grelha. O fornecimento de ar não homogêneo pode gerar escórias, quantidades elevadas de cinza volante e aumento a necessidade de oxigênio em excesso para uma combustão completa, resultando em perdas de calor. (VAN LOO; KOPPEJAN, 2008).

Quatro elementos principais compõem o sistema de combustão de grelhas: um sistema de alimentação de combustível, a grelha, um sistema de alimentação de ar e um sistema de descarga das cinzas (Figura 7). (YIN; ROSENDAHL; KAER, 2008).

Os fornos de grelha possuem capacidade que variam de 4 a 300 MWe; no entanto, a maioria está na faixa de 20-50 MWe na combustão de biomassa em um processo de produção combinada de calor e energia. (YIN; ROSENDAHL; KAER, 2008).

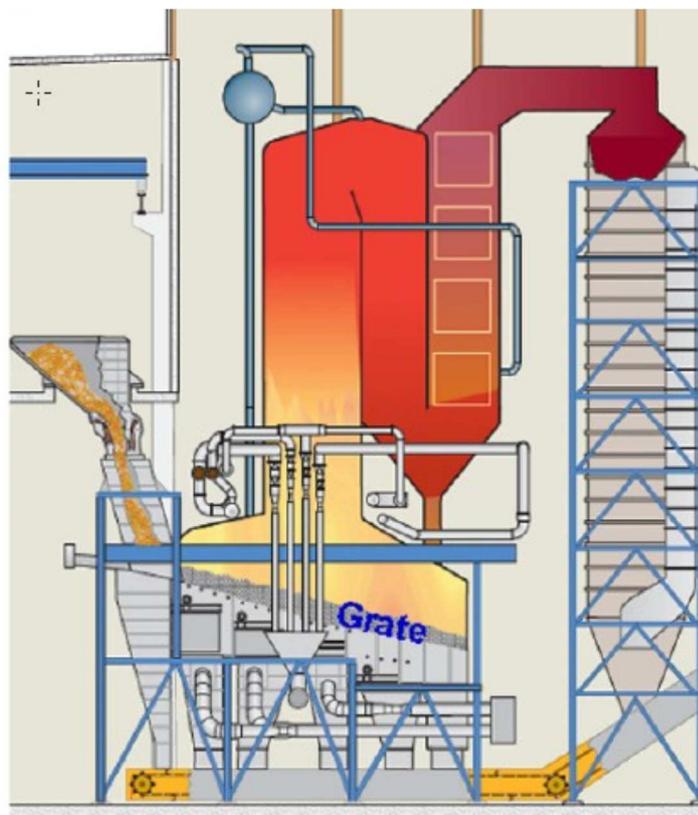


Figura 7 – Exemplo de combustão de biomassa em grelha.

Fonte: Yin; Rosendahl; Kaer, (2008).

Com frequência, os fornos de grelha são rotulados por apresentarem baixa eficiência e elevadas emissões de poluentes à atmosfera. Além disso, a combustão da biomassa pode trazer novos problemas nesses sistemas, como deposição e corrosão, diminuindo a vida útil dos equipamentos. (YIN; ROSENDAHL; KAER, 2008).

A combustão de biomassa por grelha tem como principal emissão NO_x . Dependendo da fonte do combustível, alguns elementos específicos podem ser gerados e agravar as emissões atmosféricas. (YIN; ROSENDAHL; KAER, 2008).

2.5 CINZA DE CASCA DE ARROZ (CCA) E APLICAÇÕES

Estima-se que a cada ano sejam geradas cerca de 10 milhões de toneladas de CCA em todo o mundo (SENSALE, 2010). Com base na produção total de arroz no Brasil, de 11,8 milhões de toneladas segundo a FAOSTAT (2013), e considerando que cada tonelada de arroz colhido gera cerca de 200 kg de casca, que por sua vez produz aproximadamente 40 kg de cinza (conforme Mehta e Monteiro, 2008), calcula-se que, se toda a casca de arroz disponível no Brasil fosse utilizada para a geração de energia, a produção de cinza seria de aproximadamente 470 mil toneladas ao ano, o que equivale a 21% da produção total de cimento no estado do Rio Grande do Sul (SNIC, 2013). Se for considerada a projeção de

crescimento apresentada pelo Ministério da Agricultura, com a produção de arroz chegando a 14 milhões de toneladas na safra 2019/2020 (BRASIL, 2015), a geração de CCA pode chegar a 560.000 toneladas/ano neste período.

Devido à presença de carbono residual e alto teor de sílica, se descartada no meio ambiente, a CCA provocará poluição, como por exemplo, o acúmulo de cinzas nos leitos de rios, além de mudanças nas características do solo e da água. (CALHEIRO, 2011; FOLETTTO et al., 2005; FERRO, 2009).

A CCA pode ser utilizada na elaboração de diversos materiais e em diversos ramos industriais, tais como eletrônica, construção civil, cerâmica, indústria química, fabricação de células fotovoltaicas, entre outros. (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2001). A Figura 8 apresenta as principais aplicações da CCA.

O trabalho de Prassara-A e Grant (2011) realizou a ACV considerando as aplicações da cinza em condicionamento do solo, produção de tijolos, blocos de concreto leve e aterro sanitário, para obter a aplicação ambientalmente mais adequada da CCA. A opção do uso da CCA para a fabricação de blocos de concreto leve se mostrou mais ambientalmente adequada, causando menor impacto na maioria das categorias analisadas.

Considerando que uma produção industrial ideal é aquela que não gera resíduos, se essa cinza for utilizada, direta ou indiretamente, para algum fim comercial, será fechado o ciclo da industrialização do arroz, sendo possível o total aproveitamento da matéria-prima proveniente da lavoura, já que outras partes já têm seu destino no mercado. (FERRO, 2009).

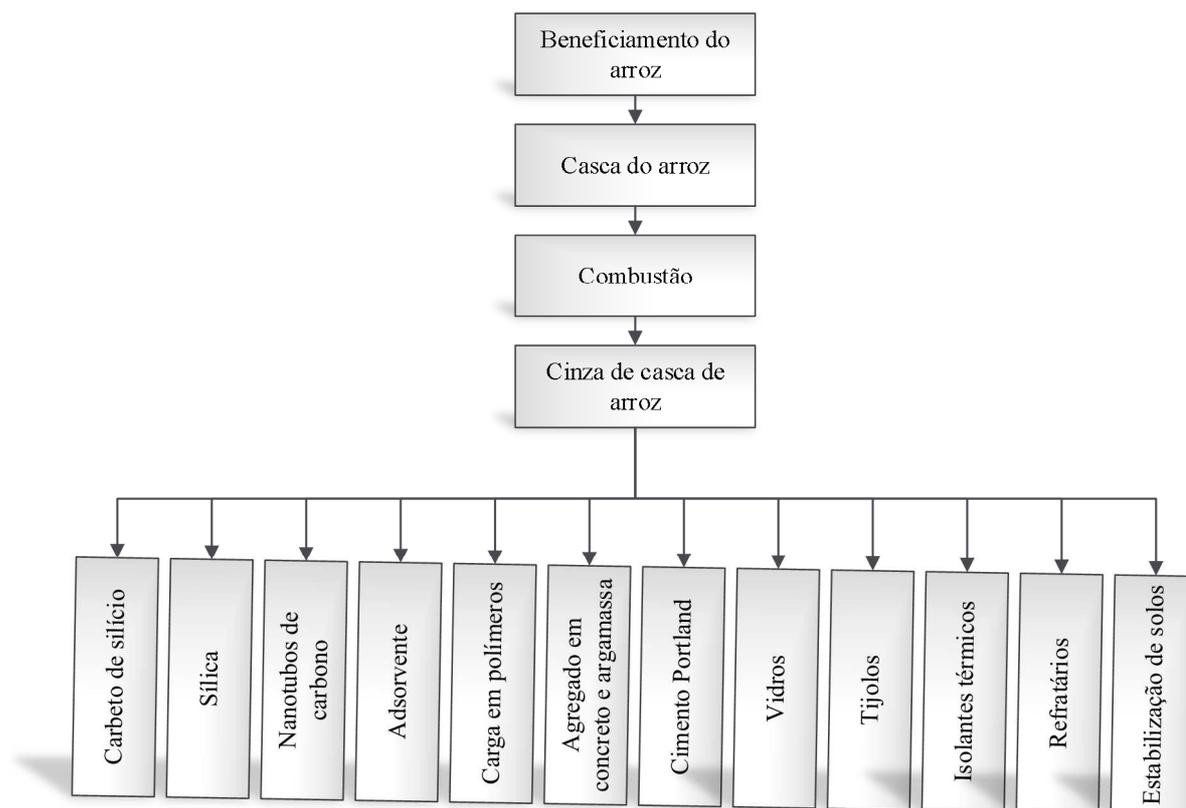


Figura 8 – Soluções de valorização de CCA.

Fonte: Adaptado a partir de Della, Kühn e Hotza (2001).

No entanto, a escolha do uso apropriado da CCA depende de vários fatores, desde composição química, localização geográfica das plantações de arroz e dos potenciais usos. Estão ainda incluídas entre as principais considerações. (DAFICO, 2004 apud FERRO, 2009):

- a) problemas sócio-econômicos;
- b) quantidade, tipo e tamanho das fábricas;
- c) capacidade das fábricas em determinar e avaliar o fornecimento da casca;
- d) uso da casca em diferentes áreas e quantidades envolvidas em tais usos;
- e) regularidade no fornecimento, transporte e estocagem necessários para a casca;
- f) potencial de mercado para os produtos;
- g) relação econômica com a competição de materiais e novos produtos;
- h) possibilidades tecnológicas;
- i) função da tecnologia no desenvolvimento econômico;
- j) problema potencial de poluição.

2.6 COMPROVAÇÃO TÉCNICA DA APLICAÇÃO DE CCA NA CONSTRUÇÃO CIVIL

A composição da CCA é basicamente dióxido de silício, denominada sílica (SiO_2), carbono (C), óxido de potássio (K_2O), óxido fosfórico (P_2O_5), óxido de cálcio (CaO) e em menores quantidades, por magnésio (Mg), ferro (Fe) e sódio (Na). (ARMESTO et al., 2002). A Tabela 4 e Tabela 5 apresentam a composição química da CCA.

O processo de combustão da casca de arroz altera a composição da cinza gerada. A forma estrutural que a sílica se apresenta após o processo de queima, amorfa e/ou cristalina, irá influenciar na pozolanicidade do material, característica importante para o uso da CCA como adição mineral na construção civil.

Outros fatores como o solo em que o arroz é plantado, os tipos e teores dos fertilizantes utilizados, as condições climáticas, bem como o tipo de arroz, também podem influenciar na composição química da casca de arroz e, em consequência, na cinza. (DELLA, et al. 2006).

Tabela 4 – Composição química em base óxido da CCA (%).

%	Martínez et al. (2009)	Zain et al. (2012)	Marangon et al. (2014)	Fedumentí (2013)
SiO_2	93,58	86,49	91,48	94,99
Al_2O_3	0,13	0,01	0,00	0,18
Fe_2O_3	0,10	0,91	0,05	0,06
K_2O	2,15	2,70	1,40	1,01
CaO	0,34	0,50	0,36	0,33
P_2O_5	0,62	0,69	0,45	0,10
MgO	0,5	0,13	0,32	0,01
Na_2O	0,02	0,05	0,04	ND
SO_3	ND	-	0,15	0,57
MnO	0,14	0,07	0,32	0,20
TiO_2	0,02	0,00	ND	0,01
C	ND	3,21	ND	ND
PF	2,41	8,45	3,50	2,12
Processo de queima	Leito Fluidizado (672°C)	Grelha	Leito Fluidizado	Leito Fluidizado
País	Colômbia	Malásia	Brasil	Brasil

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Tabela 5 – Composição química elementar da CCA (%).

%	Calheiro (2011) Krug (2014)	Righi (2014)	Righi (2014)
Si	76,395	88	89,8
Zn	ND	ND	ND
Fe	ND	0,6	0,2
Mn	0,039	1,9	1,6
Ti	ND	ND	ND
Ca	0,046	2,2	1,9
K	0,602	7	6,3
S	0,001	ND	ND
P	0,115	ND	ND
Al	ND	ND	ND
C	ND	ND	ND
PF	7,938	10,76	3,62
Processo de queima	Grelha	Grelha	Leito fluidizado
País	Brasil	Brasil	Brasil

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

A maioria das adições minerais exercem uma influência favorável sobre a resistência e durabilidade do concreto. No caso de CCA, o seu efeito químico está relacionado com o fato de que, quando produzido pela combustão controlada, é um material altamente pozolânico que reage rapidamente com o hidróxido de cálcio, formando um tipo secundário de hidratos de silicato de cálcio (C-S-H). (SENSALE, 2010; RAUT et al., 2013).

Muitos pesquisadores têm estudado a influência da CCA sobre o comportamento de argamassas e concretos ao longo dos últimos 20 anos (ISAIA et al., 2010). De acordo com Sensale (2010), o comportamento dos produtos cimentícios variam de acordo com a fonte da CCA.

Ao analisar os aspectos de durabilidade dos materiais cimentícios por diferentes níveis de substituição do cimento Portland (0%, 5%, 10%, 15%) por duas CCAs, amorfa e parcialmente cristalina, Sensale (2010) verificou que é possível obter materiais com propriedades comparáveis ou melhores do que os produzidos sem adição da cinza, comprovando a viabilidade da utilização racional da CCA como material suplementar de cimentação.

Os mesmos níveis de substituição do cimento Portland (0%, 5%, 10%, 15%) por CCA foram utilizados para investigar as propriedades mecânicas do concreto de alta resistência por Kishore, Bhikshma, Prakash (2011), em que o teor ótimo de substituição foi de 10%.

Righi, Nakanishi e Mohamad (2014) tiveram como objetivo avaliar o desempenho mecânico de argamassas com substituição parcial de cimento Portland por cinzas de casca de

arroz oriundas de um processo de combustão por leito fluidizado, denominada CCA com controle de temperatura de queima (CCQ); a segunda cinza é obtida de fornos sem controle de temperatura de queima denominada cinza de casca de arroz sem controle de temperatura de queima (CSQ). As CCAs caracterizadas na pesquisa têm origem da região de Alegrete, RS. As substituições do cimento Portland pelas cinzas foram de 10%, 15% e 20%. Os resultados obtidos mostraram que para a CCA com controle de temperatura de queima, os melhores resultados, quanto ao desempenho mecânico das argamassas, foram obtidos com 20% de substituição do cimento, enquadrando-se como um material pozolânico. Já a cinza de casca de arroz sem controle de queima (processo por grelha), de acordo com os autores, não foi enquadrada como um material pozolânico, além de apresentar elevado percentual de perda ao fogo (10,76%).

Resultados satisfatórios da atividade pozolânica da sílica da casca de arroz foram encontrados através da avaliação do índice de atividade pozolânica na pesquisa de Marangon et al. (2014). A sílica de casca de arroz, assim denominada pelo autor, é obtida pela técnica de fluidização e teve origem no município de Alegrete, RS. Os resultados apontam também que foi necessário o uso de aproximadamente 24% a mais de água para manter a consistência padrão nas argamassas com adição de sílica de casca de arroz. Esse aumento no consumo de água ocorre devido a área superficial da sílica de casca de arroz ser 60 vezes maior que a do cimento.

Krug et al. (2014) verificaram efeitos significativos sobre as propriedades no estado endurecido do concreto através do beneficiamento de CCA, empregada como substituição parcial do cimento em concretos (0%, 10% e 20%). A cinza utilizada no estudo é oriunda do processo de combustão em grelhas deslizantes da região metropolitana de Porto Alegre, sendo que o beneficiamento foi realizado segregando-se o material em peneira de malha de abertura 1,2 mm e moagem por 1 hora. O cimento utilizado para a produção dos concretos foi o CII-F-32.

A influência da substituição de 10% e 20% do cimento por CCA em concretos com agregados graúdos reciclados de concreto nas propriedades mecânicas de durabilidade de concretos foram avaliadas por Fedumenti (2013). A cinza de casca de arroz utilizada no trabalho é oriunda de um processo de combustão da casca de arroz pelo sistema leito fluidizado e o cimento utilizado para a produção dos concretos foi o CII-F-32. Os resultados da pesquisa mostram os benefícios das propriedades do concreto em estudo, com o melhor teor de substituição de 20% do cimento por CCA e 50% de agregado reciclado de concreto.

2.7 IMPACTOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Com atividades em pleno crescimento, a indústria da construção civil tem movimentado um grande volume de materiais com geração significativa de impactos ambientais. Os impactos causados ao meio ambiente pela indústria da construção civil ocorrem em toda a cadeia produtiva, desde a concepção dos edifícios até sua demolição (BRIBIÁN; USÓN; SCARPELLINI, 2009).

O consumo anual de recursos naturais pela indústria da construção em nível mundial é de aproximadamente 40% da pedra bruta extraída (cascalho e areia), 25% da madeira virgem, além de 16% da água tratada. O setor é responsável por 40% da energia consumida no mundo, na forma de energia incorporada durante a fase de construção e como energia de funcionamento, durante a fase de operação. (DIXIT et al., 2010; SHARMA et al., 2011).

Além desses impactos, estima-se que entre metade e três quartos dos materiais extraídos da natureza retornam como resíduos em um período de um ano. (JOHN; PRADO, 2010). Dessa forma, o setor contribui com a geração de um volume considerável de resíduos da construção e demolição (RCD). No Brasil, nas cidades de médio e grande porte, os RCD constituem mais de 50% da massa dos resíduos urbanos. (JACOBI; BESEN, 2011; LASSO, 2011).

A partir dessa perspectiva, o setor possui grande importância no que se refere à busca pelo desenvolvimento sustentável, sendo um dos maiores desafios ambientais enfrentados pelo setor da construção é a redução da intensidade do uso de materiais. (JOHN, 2010).

A cinza de casca de arroz (CCA), gerada no processo de combustão da casca, vem sendo estudada como adição pozolânica em materiais compósitos em substituição parcial ao cimento. (DELLA; KÜHN; HOTZA, 2001).

2.7.1 Cimento *versus* impactos ambientais

O cimento Portland é um ligante hidráulico obtido pela moagem do clínquer Portland. O clínquer é resultante da calcinação de uma mistura de calcário (75 a 80%), argila (20 a 25%) e eventuais corretivos químicos de natureza silicosa, aluminosa ou ferrífera. O processo de fabricação para obtenção do clínquer consiste na extração e britagem das matérias-primas, preparação adequada da mistura crua (farinha), isto é, moagem e

homogeneização e posterior queima em forno rotativo a aproximadamente 1450°C, seguido por resfriamento em resfriador industrial. (ISAIA, 2011).

No Brasil, em 2012, foram consumidas 69,3 milhões de toneladas de cimento, significando um consumo per capita de 353 kg/hab/ano. A previsão é que a produção de cimento aumente substancialmente nas próximas décadas, em torno de 2,5 vezes, principalmente nos países em desenvolvimento (SNIC, 2012; DAMINELI et al., 2010). Dessa forma, a tendência é que a participação quanto às emissões de CO₂ dessa indústria aumente em decorrência do aumento da produção de cimento previsto para os próximos anos. (LIMA, 2010).

A quantidade de calcário utilizado para a produção de uma tonelada de clínquer é de aproximadamente 1,15 toneladas. A cada tonelada de calcário calcinado, 440 kg de CO₂ são liberados para a atmosfera; assim, para a produção de uma tonelada de clínquer, são liberados cerca de 510 kg de CO₂ a partir da queima do calcário, sem contar as emissões devido à queima de combustíveis fósseis no forno rotativo. (JOHN, 2010).

Somente a indústria do cimento é responsável por cerca de 5 a 7% das emissões globais de CO₂ (SNIC, 2012; DAMINELI et al., 2010). A emissão de CO₂ da indústria cimenteira nacional foi estimada por Lima (2010) em 659 kg CO₂/t. Essa emissão é coerente com as emissões divulgadas pelo grupo Votorantim para o Brasil (627 kg CO₂/t). Ainda, a emissão de CO₂ do cimento nacional é significativamente inferior à emissão média mundial, que varia de 800 a 880 kgCO₂/t. Essa redução está relacionada ao uso considerável de adições minerais e da adoção de tecnologia moderna de produção em grande parte do setor cimenteiro. (LIMA, 2010).

Vista a relação do setor com a questão das mudanças climáticas, é importante buscar formas de redução na emissão de CO₂ nesse segmento industrial (LIMA, 2010). Uma das formas é através da utilização da CCA como substituição parcial ao cimento, que se justifica por minimizar os riscos potenciais de poluição ao meio ambiente, por reduzir as áreas para descarte desse resíduo, além de reduzir o consumo de energia na produção de cimento, bem como a emissão de CO₂ e a extração de recursos naturais não renováveis como calcário e argila. (KISHORE; BHIKSHMA; PRAKASH, 2011; SENSALÉ, 2010).

Os ganhos ambientais da adição da CCA como substituição parcial ao cimento Portland em argamassas de revestimento foram observados por Moraes et al. (2010) através da ferramenta de AICV, em uma análise qualitativa. Com base nas interpretações, os autores

observaram que quanto maior o teor de CCA incorporada na argamassa, maior é a possibilidade de atenuação dos impactos mais agressivos ao meio ambiente, pois no material sem adições há um maior consumo de cimento; dessa forma, os impactos relacionados às atividades de produção do cimento são reduzidos. Ressalta-se que, juntamente com a avaliação ambiental, a viabilidade técnica da aplicação da CCA foi estudada, onde as argamassas com adição de CCA apresentaram também melhor desempenho técnico em comparação às argamassas sem adição da cinza.

Campos (2012), Oliveira (2007) e Carvalho (2002) corroboram o fato ao constatarem que o processo de fabricação do cimento, especialmente durante a operação de clínquerização, é responsável pela maior parcela das emissões totais de CO₂ pela indústria da construção civil e que os impactos ambientais poderiam ser minimizados com a utilização de traços de concreto que utilizem menos cimento, assim como a substituição parcial do clínquer, presente nos cimentos, por coprodutos.

2.7.2 Concreto *versus* impactos ambientais

O concreto é um material composto, produzido com água, agregados (areia, pedregulho e pedra britada) e cimento. Pode conter também fibras, para melhoria das propriedades mecânicas, e aditivos, para melhoria das condições de preparação do concreto endurecido, como os tensoativos (incorporadores de ar e redutores de água), modificadores de pega (aceleradores e retardadores) e outros (pozolanas), etc.

A composição dos materiais no concreto varia com as especificações do material, como resistência mecânica, podendo ser identificada a participação do cimento no concreto, em situações correntes, entre 9 e 21%, tipicamente em torno de 12%. Os agregados representam aproximadamente 70 a 80% da massa do concreto. (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Um dos aspectos de sustentabilidade mais importantes no concreto refere-se a sua contribuição para as mudanças climáticas, especificamente na questão da emissão de CO₂, que no concreto é proveniente, de forma majoritária, do cimento. Apesar de o cimento ter pequena participação na massa do concreto, suas emissões são majoritárias nas emissões desse material, onde mais de 2/3 das emissões listadas para o concreto são representadas pelas emissões do cimento. O teor de cimento do concreto depende da dosagem e da resistência, sendo que as emissões de CO₂ desse produto dependem dessas características.

Um estudo realizado na Austrália, com o objetivo de estimar as emissões de dióxido de carbono (CO_2) aos vários componentes de fabricação do concreto, conclui que entre 74% a 81% das emissões totais de CO_2 são atribuídas ao Cimento Portland, seguido pelos agregados graúdos com cerca de 13% a 20% das emissões totais de CO_2 . Na perspectiva ambiental, a eletricidade utilizada no processo de moagem dos agregados é responsável pela maioria das emissões de CO_2 , sendo o ponto mais importante do processo de produção dos agregados grosseiros. Para os agregados miúdos, a falta do processo de moagem reduz em 40% o valor das emissões de CO_2 em relação ao agregado graúdo de basalto e 30% do valor para o agregado graúdo de granito. (FLOWER; SANJAYAN, 2007). No estudo, foram selecionados concretos com resistência à compressão de 25 MPa e 32 MPa, ambos com 25% de cimento Portland substituído por cinza volante. Ainda, um segundo concreto com resistência à compressão de 25 MPa e 32 MPa foi estudado, no entanto com 40% de cimento Portland substituído por escória de alto forno. Os valores de emissões de CO_2 encontrados apresentaram variação entre 0,29 e 0,32 t $\text{CO}_2\text{-eq} / \text{m}^3$. Os resultados ainda mostraram que as cinzas volantes misturadas aos concretos reduziram as emissões de CO_2 em cerca de 13 a 15%, mas é a escoria de alto forno que, misturadas ao concreto, mostram reduções substanciais de 22%. Cabe ressaltar que o fator de emissão para o cimento utilizado no estudo foi de 0,82 t $\text{CO}_2\text{-eq} / \text{t}$, o que inclui o transporte do cimento até as centrais de concreto.

As emissões de CO_2 na produção de concreto no Brasil foram estimadas por Lima (2010), considerando a disponibilização do concreto pronto na obra, seja oriundo de centrais dosadoras ou da preparação na própria obra. Não foram consideradas no estudo as emissões devido à preparação e transporte do concreto, nem mesmo medições de emissões e coletas de dados in loco, pois esses tiveram como referência informações nacionais. Os valores de energia incorporada nos agregados adotados por Lima (2010) foram calculados por Marcos (2009) e resultam na emissão de 5,81 kgCO_2/t de areia e 15,46 kgCO_2/t de brita. No entanto, o autor considerou uma incerteza de 50% desse indicador, devido às discrepâncias observadas. A emissão média no concreto foi estimada em 225 kgCO_2/m^3 , para uma faixa unitária de consumo de cimento em concreto entre 244 e 375 kg/m^3 .

As emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ relacionados às atividades de produção de 1 m^3 de concreto, com resistência à compressão de 40 MPa e 100% cimento Portland foram contrastados com as emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ para a produção de um concreto geopolimérico de mesma resistência. O composto denominado geopolímero é um aglomerante cimentício alternativo utilizado em substituição ao Cimento Portland. Os resultados do estudo apresentaram que as emissões de

CO_{2eq} para a produção de um concreto geopolimérico são 9% inferiores quando comparadas com as emissões do concreto contendo 100% cimento Portland. Segundo o autor, a necessidade da temperatura de cura elevada do concreto geopolimérico, a fim de atingir a resistência desejada, contribui com cerca de 12,4% das emissões de CO_{2eq} (TURNER; COLLINS, 2013).

Os resultados obtidos foram comparados com outras estimativas já realizadas e discrepâncias consideráveis foram observadas, com reduções de CO_{2eq} que chegaram à 80%. Segundo o autor, entre os principais fatores que levaram às diferenças nos resultados relatados incluem as emissões de transporte, a diferença entre as temperaturas de cura dos concretos e a energia necessária para a fabricação dos ativadores alcalinos (silicato de sódio e hidróxido de sódio) do concreto geopolimérico.

2.7.3 ACV na construção civil

Há diversas abordagens para os estudos de ACV aplicados à construção civil. A aplicação dessa metodologia nesse setor possibilita que o desempenho ambiental de materiais e sistemas construtivos sejam comparados, fornecendo subsídios à tomada de decisão ambientalmente mais adequada, contribuindo para o estabelecimento de estratégias ambientais e para o desenvolvimento do setor.

Alguns softwares têm sido desenvolvidos especificamente para o setor da construção, com o objetivo de facilitar a aplicação da ACV. Um desses softwares é o BEES (*Building for Environmental and Economic Sustainability*), que tem como objetivo gerar resultados de desempenho ambiental para as alternativas de produtos da construção civil disponíveis nos Estados Unidos, permitindo a seleção de materiais construtivos mais sustentáveis.

Através do uso da metodologia proposta pelo software BEES 3.0, Oliveira (2007) objetivou verificar a possibilidade de gerar dados confiáveis sobre os impactos durante o ciclo de vida das estruturas de concreto armado no Brasil. O autor realizou uma comparação dos resultados da análise do ciclo de vida feita com dados nacionais e os resultados gerados pelo software. O estudo permitiu concluir que apesar do BEES 3.0 ter uma metodologia bem fundamentada, deve ser usado de forma apenas comparativa, pois utiliza um banco de dados com informações de produtos fabricados e utilizados em um país com características diferentes do Brasil.

O ciclo de vida do sistema construtivo de painéis maciços de concreto pré-moldado foi comparado com o sistema construtivo de paredes estruturais de blocos de concreto, pelo estudo de Campos (2012). O autor pôde constatar, através da ACV, a solução

ambientalmente mais sustentável, que foi o sistema construtivo em alvenaria estrutural utilizando blocos de concreto. Isto está relacionado ao fato desse sistema demandar quantidades inferiores de matérias-primas, observado através do fluxo de massa, que para a solução de blocos de concreto foi de 749.336 kg, em contraponto com 1.719.182 Kg da solução em painéis – diferença de 65,7%. Quanto às emissões de GEE nos processos de fabricação, essas correspondem em kg a aproximadamente 2,5% dos fluxos de materiais dos processos. Cabe salientar a importância da escolha de fornecedores próximos ao local de produção, pois apesar do fluxo de massa dos blocos ser aproximadamente 2,3 vezes menor que a de fabricação dos painéis, as emissões de GEE na fase de transporte foi 3 vezes maior, devido à distância da fábrica de blocos ao canteiro de obras.

Bento e Rossignolo (2013) propuseram a aplicação da metodologia da avaliação do ciclo de vida como ferramenta de análise do desempenho ambiental no processo decisório do dimensionamento de estruturas de concreto armado. Foram avaliadas estruturas com resistências de 25 MPa, 30 MPa e 35 MPa. De forma majoritária, o estudo foi baseado em dados secundários; porém quando possível a obtenção de dados primários, esses substituíram os secundários. A partir da análise dos resultados, os autores puderam observar que para todas as categorias de impacto selecionadas (eutrofização, formação de ozônio fotoquímico, aquecimento global, toxicidade humana, acidificação, ecotoxicidade, consumo de recursos naturais, consumo de recursos energéticos e resíduos) a estrutura com fck de 35 MPa é a que menos impacta o meio ambiente, exercendo a mesma função, seguida pela estrutura com fck de 30 MPa e, por último, pela estrutura de fck de 25 MPa. O impacto foi menor devido à redução das dimensões das peças proporcionadas pelo aumento da resistência característica para 35 MPa, resultando em menor volume de concreto e em menores taxas de aço utilizadas.

Soares e Pereira (2004) não realizaram uma ACV, mas tiveram como objetivo fornecer dados sobre o inventário do processo produtivo de pisos e tijolos cerâmicos. Os autores realizaram o levantamento de todos os dados referentes às entradas e saídas do sistema de duas empresas produtoras de pisos e duas empresas produtoras de tijolos, os quais se referem, essencialmente, ao consumo de matérias-primas e energia e à geração de resíduos associados à fabricação de 1 m² de pisos e blocos cerâmicos.

Carvalho (2002) utilizou a Análise de Ciclo de Vida para a comparação entre os cimentos Portland com adição de resíduos, com o objetivo de avaliar os benefícios ambientais da reciclagem. Dentro do escopo de estudo, foi constatado que os impactos ambientais são reduzidos com a substituição do clínquer por resíduos com capacidade aglomerante.

3 MÉTODO DE PESQUISA

A metodologia estabelecida nesse trabalho para a aplicação da ferramenta de ACV divide-se em 6 etapas, apresentadas na Figura 9 através de um fluxograma que sintetiza as etapas desenvolvidas e que serão detalhadas nos itens subsequentes.

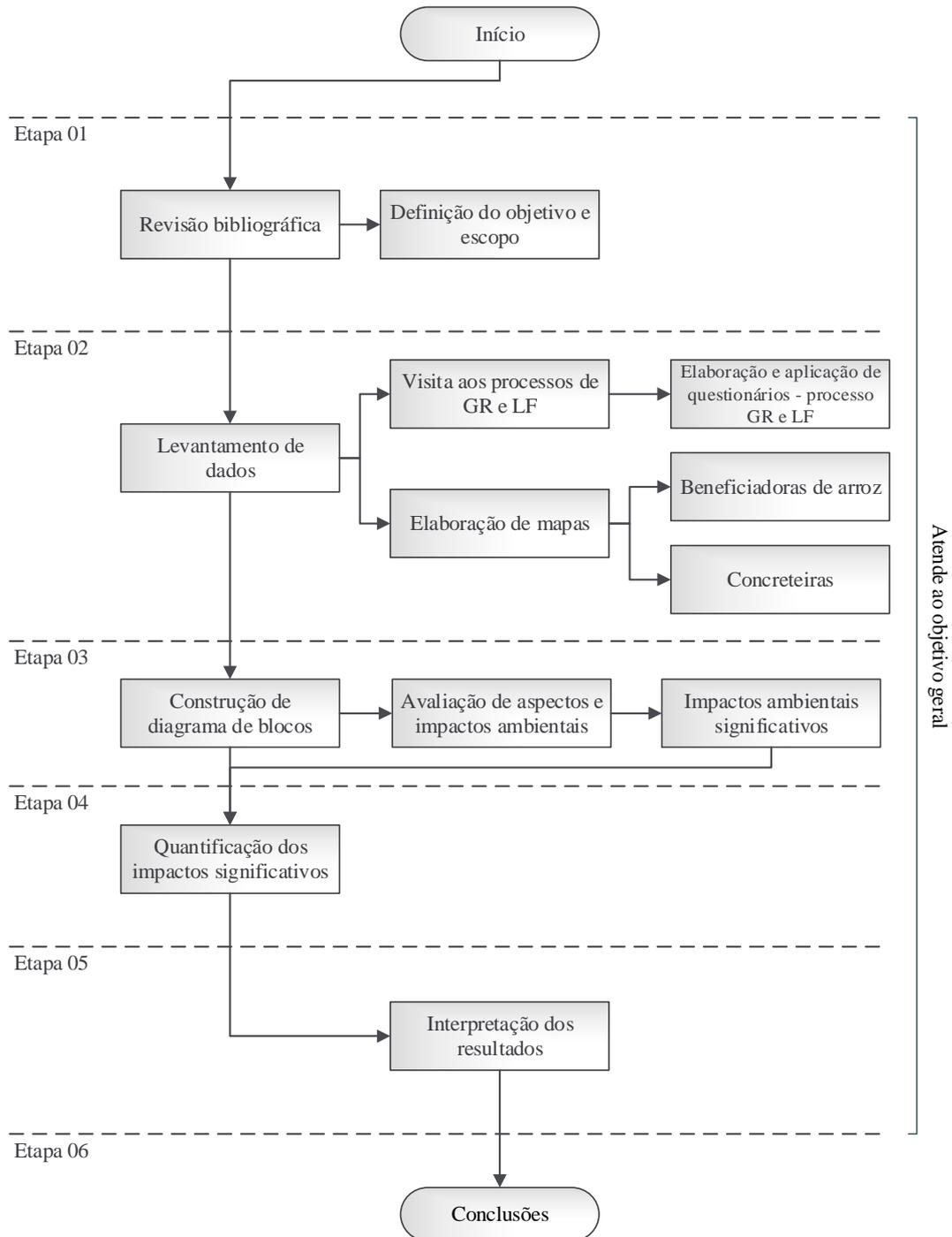


Figura 9 – Fluxograma de trabalho.

Fonte: Elaborado pelo autor (2015)

3.1 ETAPA 01

Na primeira etapa desse trabalho foi realizada uma revisão bibliográfica referente ao tema em estudo e posterior definição do objetivo e escopo a serem atendidos com a ACV. Também, foram elaborados os questionários dos processos de combustão da casca de arroz em leito fluidizado e grelha.

3.1.1 Definição do objetivo e escopo

Esse estudo de ACV foi aplicado com objetivo de comparar o desempenho ambiental de concretos produzidos com CCA geradas pelos processos de combustão em leito fluidizado e grelha como substituição parcial ao cimento Portland para fabricação do concreto.

Com a aplicação desse estudo de ACV, espera-se que os resultados possam:

- a) Contribuir para a gestão dos aspectos e impactos ambientais dos processos de combustão da casca de arroz em estudo;
- b) Verificar os ganhos ambientais da substituição do cimento por CCA ao concreto;
- c) Possibilitar a comparação com outras aplicações da CCA;
- d) Fornecer subsídios para a tomada de decisões quanto ao uso de CCA como coproduto na construção civil;

Entre as razões para a condução desse estudo, tem-se a necessidade de conhecer os aspectos e impactos ambientais relacionados ao ciclo de vida dos processos de combustão da casca de arroz e a possibilidade de disponibilizar dados adequados à realidade brasileira.

O público alvo a quem se pretende comunicar os resultados são os usuários da ferramenta de ACV, que utilizem os recursos abordados no escopo desse trabalho e pesquisas que envolvam a utilização das CCA.

As conclusões e recomendações poderão subsidiar outras pesquisas de ACV.

3.1.1.1 Unidade Funcional

A unidade funcional definida para esse estudo é de emissões de $\text{CO}_{2\text{eq}}/\text{m}^3$ de concreto.

3.1.1.2 Limites do sistema estudado

Considerando a geração da CCA como um coproduto (Limites do sistema 01), optou-se por limitar os sistemas nas fases de transporte da matéria-prima (casca de arroz) e fabricação do produto (energia), através das Usinas Termelétricas (UTE) que utilizam os processos de combustão da biomassa em leito fluidizado e grelha. Para a avaliação da aplicação da CCA como um coproduto para a produção do concreto (Limites do sistema 02), é inserida a fase de transporte da cinza até as Empresas de Serviços de Concretagem (ESC). Os limites dos sistemas estão ilustrados nas Figura 10 e Figura 11.

Não foram considerados os dados da fase de instalação dos sistemas, da construção, nem as fases anteriores a essa como, por exemplo, extração de matéria-prima para a fabricação dos equipamentos e instalações.

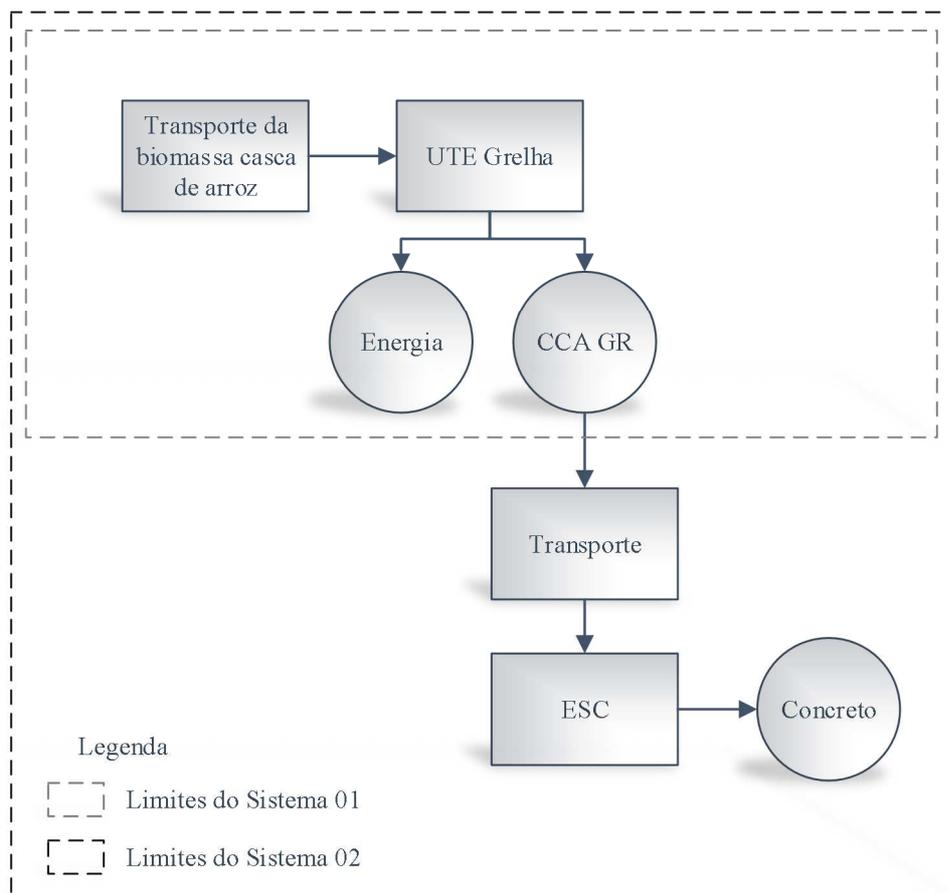


Figura 10 – Limites do sistema de ACV pelo processo de grelha.

Fonte: Elaborado pelo autor (2015)

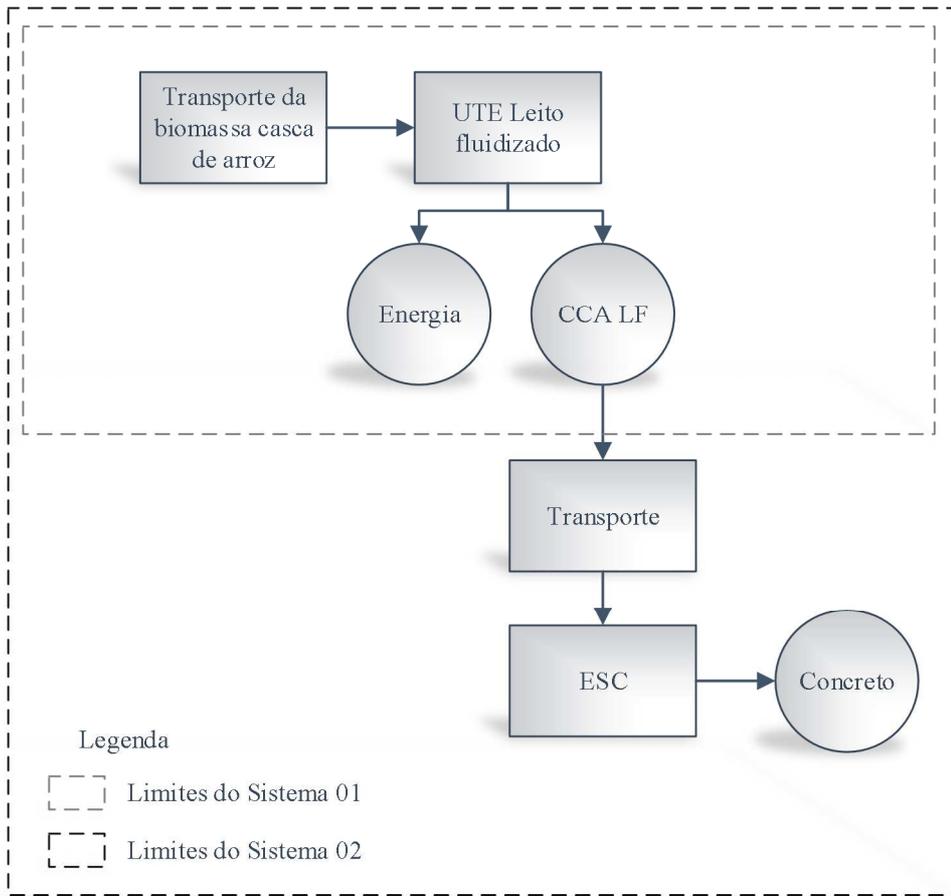


Figura 11 – Limites do sistema de ACV pelo processo de leito fluidizado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2015)

3.1.1.3 Limite geográfico das cca_s

As cinzas em estudo são oriundas de duas empresas localizadas no município de Alegrete - RS. A Figura 12 apresenta a localização geográfica das cinzas no estado do Rio Grande do Sul.

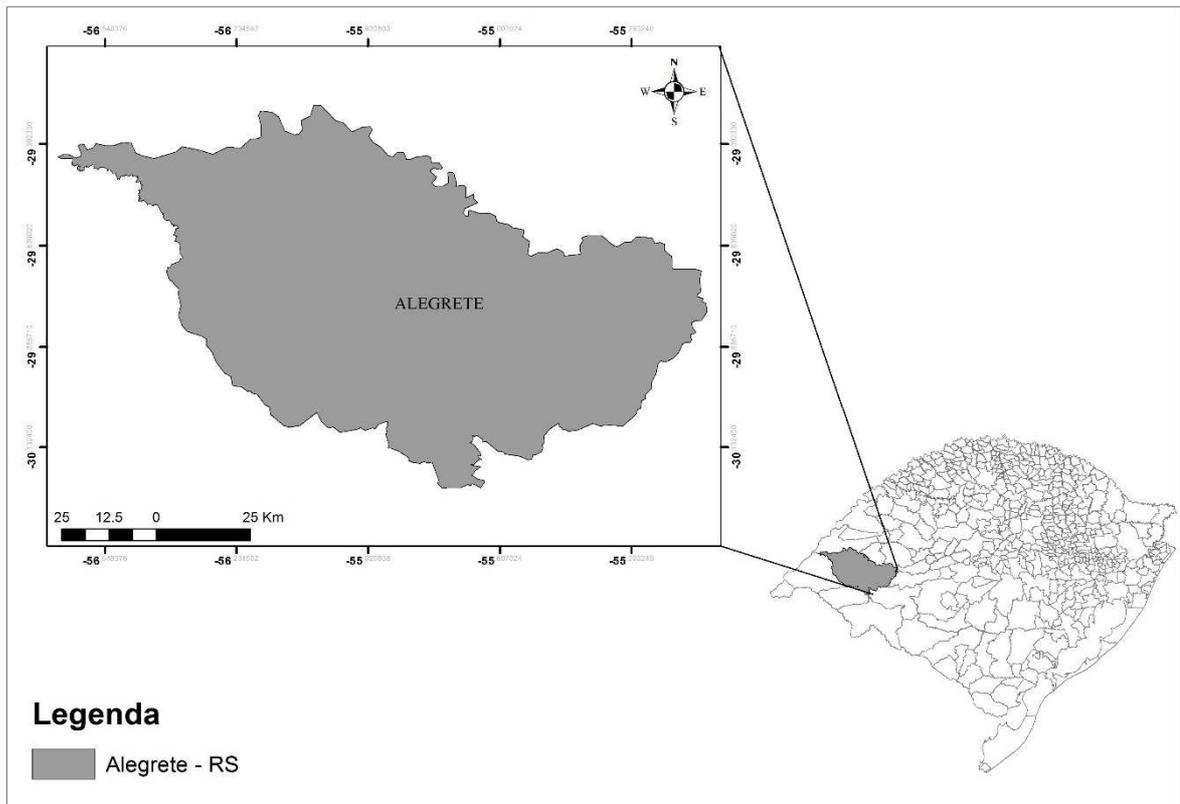


Figura 12– Localização geográfica das CCA em estudo.

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

A Tabela 6 apresenta a denominação adotada para as cinzas e o seu processo de origem.

Tabela 6 – Identificação das cinzas em estudo

Identificação	Origem
CCA LF	Tecnologia de combustão: leito fluidizado borbulhante Temperatura de operação: abaixo de 800 °C
CCA GR	Tecnologia de combustão: grelha basculante Temperatura de operação: ~ 800 °C

Fonte: O autor (2015).

Estão ilustradas na Figura 13 e Figura 14, a CCA LF e a CCA GR. Através da análise visual, é possível observar uma diferença de coloração entre as cinzas geradas através dos processos de grelha e leito fluidizado.



Figura 13– Cinza obtida através da tecnologia de combustão em leito fluidizado borbulhante.

Fonte: O autor (2015).



Figura 14– Cinza obtida através da tecnologia de combustão em grelha basculante.

Fonte: O autor (2015).

Os fluxogramas dos processos de combustão da casca de arroz por leito fluidizado e grelha estão apresentados nas Figura 15 e Figura 16, respectivamente, e as principais características dos processos de combustão estão descritas a seguir.

Para a obtenção da CCA GR, a tecnologia de combustão utilizada é de grelha basculante e a temperatura de operação é de aproximadamente 800°C. A empresa utiliza a biomassa casca de arroz como combustível para produção de energia, sendo que essa não passa por tratamento antes de ser introduzida ao sistema. Cerca de 70% e 80% da biomassa utilizada, tem como origem o processo de beneficiamento interno do arroz; o restante é oriundo de outros municípios da região. O meio de transporte utilizado é o rodoviário onde caminhões são empregados para o transporte da biomassa.

A quantidade gerada da CCA GR é de aproximadamente 20 t/dia, ou 22% do peso da casca. A cinza gerada nesse processo não passa por beneficiamento, sendo assim, não possui fins comerciais. Dessa forma, parte do resíduo gerado é destinado ao solo e parte disposto em área licenciada à aproximadamente 40 km de distância do local de origem.

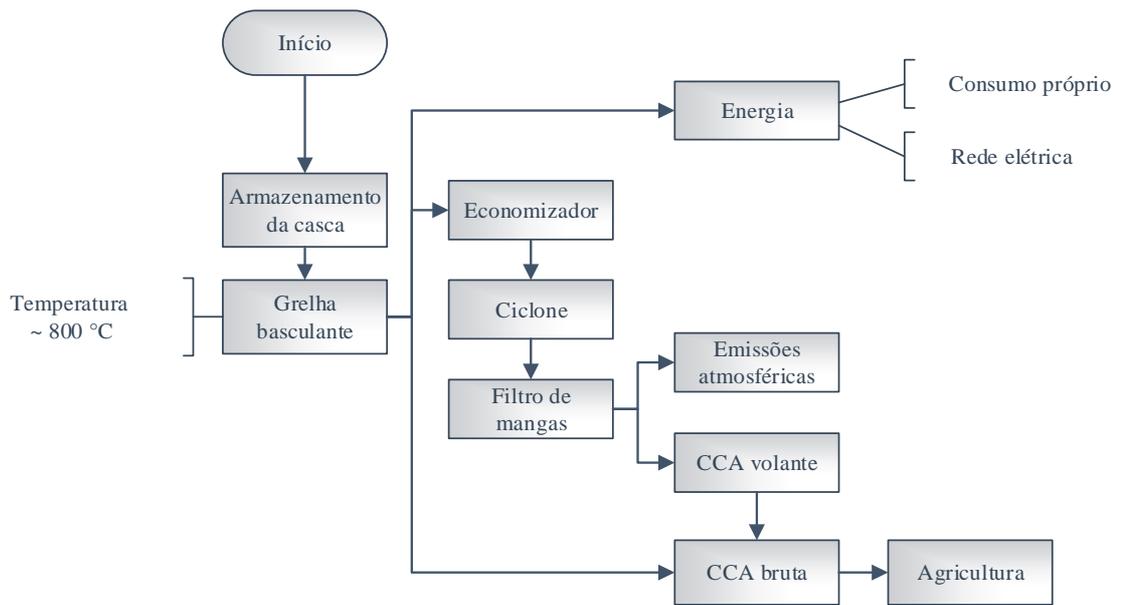


Figura 15 – Fluxograma do processo de combustão da casca de arroz por grelha.

Fonte: Elaborado pelo autor (2015)

A CCA LF é obtida pelo processo de combustão da casca de arroz em reator de leito fluidizado borbulhante, e opera a uma temperatura abaixo de 800°C . A empresa da qual a cinza tem origem utiliza a casca de arroz para geração de energia elétrica. Nesse processo, a casca de arroz entra na caldeira de leito fluidizado e é queimada com o auxílio de leito (areia) e ar ascendente, que gera a combustão instantânea da mesma. O processo de beneficiamento interno do arroz atende cerca de 60% da demanda de biomassa para geração de energia; o restante da biomassa é oriundo de outros municípios da região, que abrangem um raio de 250 km. O meio de transporte utilizado é o rodoviário através do uso de caminhões.

A quantidade da CCA LF gerada é de aproximadamente 33 t/dia, ou 22% da massa da casca processada. A cinza gerada nesse processo é destinada para fins comerciais à indústria da construção civil. O processo de beneficiamento da CCA LF se dá através da moagem em moinhos de bolas de alumina com aero classificação; posteriormente, a mesma passa por alguns ensaios de controle. Dessa forma, a cinza gerada no processo de combustão da casca de arroz em leito fluidizado deixa de ser um resíduo e passa a ser um coproduto comercializado com a denominação de Sílica da casca de arroz.

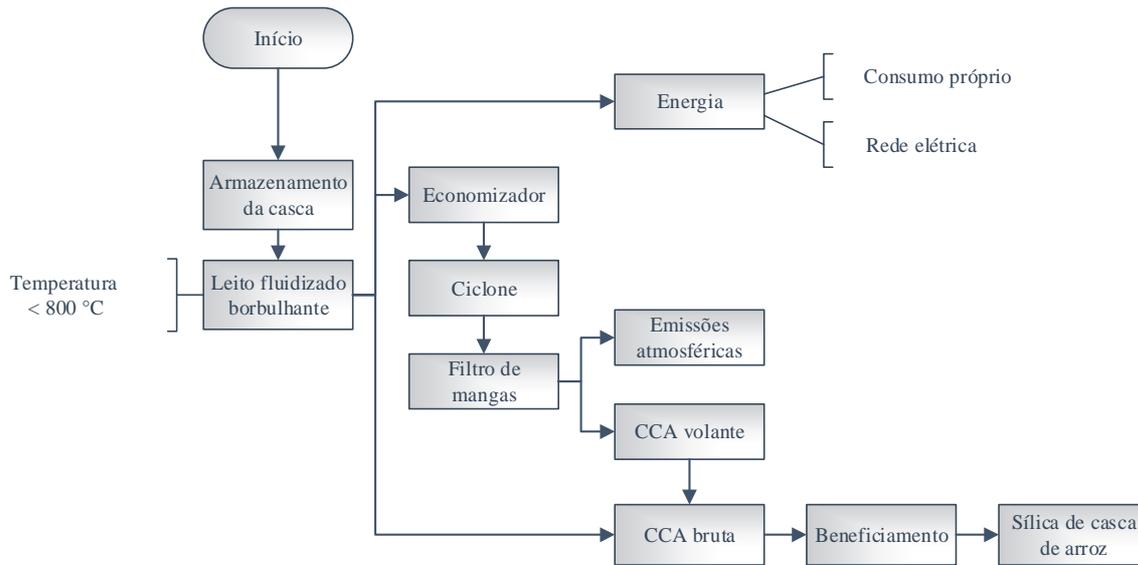


Figura 16 – Fluxograma do processo de combustão da casca de arroz por leito fluidizado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2015)

Para ambas as empresas, a tecnologia utilizada para a remoção das cinzas é composta por um economizador, ciclone e filtros mangas. Os resíduos gerados no processamento da biomassa são as cinzas leves, acumuladas nos filtros de manga, e as cinzas pesadas, são as que se acumulam na grelha ou ficam sobrepostas/aderidas às partículas no leito. Ambas as cinzas são coletadas e armazenadas no mesmo local.

3.1.2 Características da CCA

As cinzas em estudo foram caracterizadas na pesquisa realizada por Fernandes (2015). Cabe salientar que a CCA LF é moída pela própria empresa geradora, e para fins de comparação, a cinza gerada pelo processo de combustão por grelha foi moída por 2 horas e 20 minutos em moinho de bolas excêntrico modelo CB2-T.

A CCA LF apresenta maior massa específica quando comparada com a CCA GR, $2,11 \text{ g/cm}^3$ e $1,98 \text{ g/cm}^3$, respectivamente.

Quanto à composição química das cinzas, essas diferem principalmente em relação ao teor de SiO_2 . A CCA LF possui em sua composição 95,9% de SiO_2 ; já a CCA GR possui 89,1% de SiO_2 .

Com relação à perda ao fogo, o valor encontrado para a cinza gerada pelo processo de combustão em grelha foi de 9,88%, resultado superior ao da cinza gerada pela combustão em leito fluidizado, que foi de 2,96%. No que se refere ao pH das amostras, essas apresentaram um pH básico.

3.1.3 Massa Unitária

A massa unitária de um agregado é determinada pela NBR NM 45 (ABNT, 2006), e está relacionada a massa do agregado e o volume do recipiente determinado na norma. Para a determinação da massa unitária das cinzas em estudo e também da casca de arroz, a mesma norma foi utilizada como referência. Foi determinada a massa unitária dos materiais no estado solto. Para que os valores encontrados estivessem mais próximos à realizada de manuseio dos materiais, as cinzas e a casca não foram secas em estufa.

Para o ensaio de determinação da massa unitária da casca de arroz e das cinzas, foram realizadas três repetições de cada uma das amostras e posteriormente utilizada a média dos resultados obtidos. Todos os ensaios foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da Unisinos.

A massa unitária das cinzas é de grande importância na fase de transporte desse coproduto, pois a quantidade a ser transportada será diretamente influenciada por essa característica.

3.2 ETAPA 02

Para que os resultados de uma ACV sejam confiáveis, é imprescindível que os dados obtidos sejam de qualidade. Nesse sentido, para o levantamento de dados e melhor entendimento dos processos, nessa etapa fez-se uma visita às centrais de geração de energia a partir da combustão da biomassa casca de arroz e desenvolveu-se o mapeamento do ciclo de vida de geração e aplicação da CCA como um coproduto.

3.2.1 Visita às Usinas Termoeletricas

Através da busca por dados o mais próximo possível da realidade, foi realizado o levantamento de dados através da aplicação de questionário às centrais de geração de energia a partir da combustão da biomassa casca de arroz (APÊNDICE). Também foram utilizados dados levantados na literatura e dados obtidos através da análise de documentos.

3.2.2 Mapeamento da geração e aplicação da CCA

Para a elaboração dos mapas do ciclo de geração e aplicação da CCA como um coproduto, o *Software* ArcGis versão 10.0 foi a ferramenta utilizada. Todos os mapas gerados foram georreferenciados ao sistema Geodésico SIRGAS (Sistema de Referência Geocêntrico para as Américas).

A divisão de regiões produtoras de arroz no estado do Rio Grande do Sul, foi realizada considerando o Sistema de Informações Geográficas do IRGA (SIG IRGA).

Para o mapeamento das beneficiadoras de arroz, que geram a casca de arroz como um dos resíduos do processo, considerou-se o ranking das 50 maiores indústrias do estado do Rio Grande do Sul, que representam aproximadamente 84% do total de arroz beneficiado (IRGA, 2013). O endereço de cada empresa foi levantado através do site institucional e as mesmas foram localizadas através do *Google Earth*. Dessa forma, a partir de marcadores, um arquivo KML foi gerado. O mesmo procedimento foi utilizado para o levantamento das centrais dosadoras de concreto do estado RS. No entanto, não foram avaliados a capacidade de absorção do coproduto CCA pelas empresas, pois é desconhecido o porte das mesmas.

Através da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) foram localizadas as Usinas Termelétricas (UTE) em operação a partir da combustão da biomassa casca de arroz no estado do Rio Grande do Sul.

3.3 ETAPA 03

Na etapa 03 da pesquisa, foi realizada a avaliação qualitativa dos aspectos e impactos ambientais dos processos de combustão da casca de arroz.

3.3.1 Avaliação dos aspectos e impactos ambientais dos processos de combustão da casca de arroz

Com o objetivo de fornecer subsídios para a definição do método quantitativo de avaliação de aspectos e impactos ambientais e as categorias de impactos a serem estudadas, realizou-se a avaliação qualitativa dos aspectos e impactos gerados pelos processos de combustão da casca de arroz em leito fluidizado e grelha. A avaliação das planilhas foi realizada por uma equipe multidisciplinar. Foram utilizados os critérios de avaliação de Aspectos e Impactos Ambientais descritos no Sistema de Gestão Ambiental da Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS (SGA UNISINOS, 2013). No entanto, para adequar o procedimento de avaliação de aspectos e impactos ao ciclo de vida da geração da cinza de casca de arroz, algumas adaptações foram necessárias.

O processo de caracterização de Aspectos e Impactos foi conduzido levando-se em consideração os critérios de abrangência, severidade e frequência. A abrangência é o critério que indica o âmbito alcançado pelo impacto ambiental, representando a sua abrangência espacial (localização do dano), devendo receber a pontuação apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Critérios de abrangência.

Classificação	Exemplo	Pontuação
Pode causar impacto localizado no entorno do local de ocorrência.	Geração de odores – esgoto doméstico e todos os aspectos associados ao impacto Risco à saúde	1
Pode causar impacto que ultrapassa o local de ocorrência, porém é restrito aos limites da instalação industrial	Incêndio causado por produtos químicos inflamáveis e vazamento/derrame de produtos químicos.	2
Pode causar impacto regional ultrapassando os limites da instalação industrial até 100 km do seu entorno.	Consumo de gases, usos de materiais (caneta, carimbo, cartuchos, etc), geração de resíduos, uso de produtos químicos inflamáveis.	3
Pode causar impacto regional ultrapassando 100 km dos limites da instalação industrial	Consumo de água e energia e geração de resíduos – lâmpadas fluorescentes e/ou de vapor de mercúrio	4

Fonte: Adaptado SGA Unisinos (2013)

A severidade representa a gravidade da alteração e a reversibilidade (capacidade de remediar-se) do impacto, devendo ser pontuada conforme as especificações de acordo com a Tabela 8.

Tabela 8 – Critérios de Severidade.

Classificação	Pontuação
Não causa danos	1
Causa danos leves com parâmetros acima de limites estabelecidos pela legislação ou normas, entretanto o impacto cessa com a adequação do aspecto via controle operacional: Ex: recuperação ou mitigação com estrutura interna da indústria.	2
Causa danos severos com parâmetros acima dos limites estabelecidos pela legislação ou normas; entretanto, apesar do impacto cessar com a adequação do aspecto via controle operacional, os danos causados são irreversíveis e/ou necessitam de uma estrutura externa à fábrica a fim de que haja uma recuperação ou mitigação impacto.	4

Fonte: Adaptado SGA Unisinos (2013)

A frequência é a periodicidade de ocorrência do aspecto/impacto ambiental, em situação normal, conforme as especificações da Tabela 9.

Tabela 9 - Critérios de frequência.

Classificação	Pontuação
Periodicidade de ocorrência Semestral ou Maior	1
Periodicidade de ocorrência Mensal	2
Periodicidade de ocorrência Semanal	3
Periodicidade de ocorrência Diária	4

Fonte: Adaptado SGA Unisinos (2013)

Uma vez pontuados de acordo com as especificações descritas nos Quadros 2, 3 e 4, as pontuações devem ser somadas para se obter os seguintes resultados conforme as pontuações da Tabela 10.

Tabela 10 – Classificação dos aspectos e impactos ambientais.

Pontuação	Resultado
3 a 6	Desprezível
7 a 9	Moderado
10 a 18	Crítico

Fonte: Adaptado SGA Unisinos (2013).

Foi considerado “Significativo” todo o aspecto e impacto classificado como “Crítico”. A partir da identificação dos aspectos e impactos ambientais significativos de cada processo de obtenção da cinza, seguiu-se o levantamento de dados para o inventário do ciclo de vida, a fim de obter a avaliação quantitativa desses impactos.

A Tabela 11 apresenta o modelo de planilha de avaliação de aspectos e impactos ambientais desenvolvida para essa pesquisa.

Tabela 11 – Modelo de planilha de avaliação de aspectos e impactos ambientais

Identificação			Exame de aspectos e impactos ambientais			Avaliação da significância	
N°	Aspectos	Impactos	Abrangência	Severidade	Frequência	Significância	Observação

Fonte: Adaptado SGA Unisinos (2013).

3.4 ETAPA 04

A etapa 04 da pesquisa consiste no levantamento de dados a fim de quantificar todos os fluxos dos limites do sistema definido anteriormente.

3.4.1 Análise do inventário do ciclo de vida

As entradas e saídas dos subsistemas analisados estão apresentadas na Figura 17 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, que mostra as entradas e saídas consideradas no inventário do ciclo de vida do transporte da casca de arroz.

A determinação das emissões na fase de transporte é uma tarefa complexa que pode ser influenciada por diversos fatores, como tipo de combustível, condições de tráfego, idade da frota, potência dos veículos, condições de manutenção e condução, etc. (BRASIL, 2011; JACONDINO 2005).

Para o inventário do subsistema transporte, foi utilizado como referencia o 1º Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários (BRASIL, 2011). O documento categoriza a frota de veículos por tipo de combustível utilizado, por idade ou geração tecnológica, por tipo de aplicação bem como por sua capacidade ou porte. A Tabela 12 apresenta a categorização do transporte por caminhões, de interesse à pesquisa.

Devido à variedade dos veículos usados, através da aplicação de um questionário à uma ESC, a categoria definida para o estudo foi a de caminhões pesados, destinados ao transporte de cargas, com carroceria e Peso Bruto Total (PBT) maiores que 15 t.

Tabela 12 – Categorização da frota de veículos

Categoria	Motor/combustível	Definicao
Caminhões leves ($3,5t < PBT < 10t$)		Veículo automotor destinado ao transporte de carga, com carroceria e PBT superior a 3.500 Kg
Caminhões médios ($10t \leq PBT < 15t$)	Diesel	
Caminhões pesados ($PBT \geq 15t$)		

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Quanto aos fatores de emissão para motores a diesel, foi considerado a sétima fase (P7) do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (Proconve), a qual prevê uma diminuição significativa nos níveis de emissões permitidos para a linha de veículos pesados produzidos a partir de 1º de janeiro de 2012. As entradas e saídas consideradas para o transporte podem ser observadas na Figura 17. O Proconve foi criado em 1986 pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (Conama) como uma forma de controle da qualidade do ar e a redução dos níveis de emissões permitidas pelo programa e vem sendo implantada gradativamente através de suas fases.

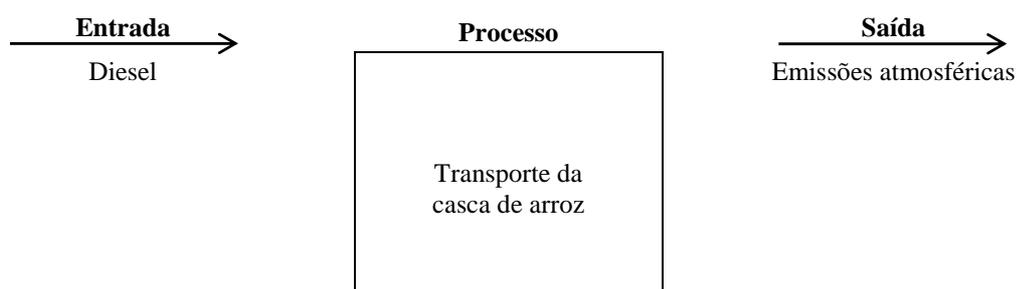


Figura 17– Diagrama de blocos para o inventário do ciclo de vida do transporte da casca de arroz.

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

A Figura 18 apresenta as entradas e saídas consideradas no inventário do ciclo de vida do processo de combustão da biomassa casca de arroz em leito fluidizado.

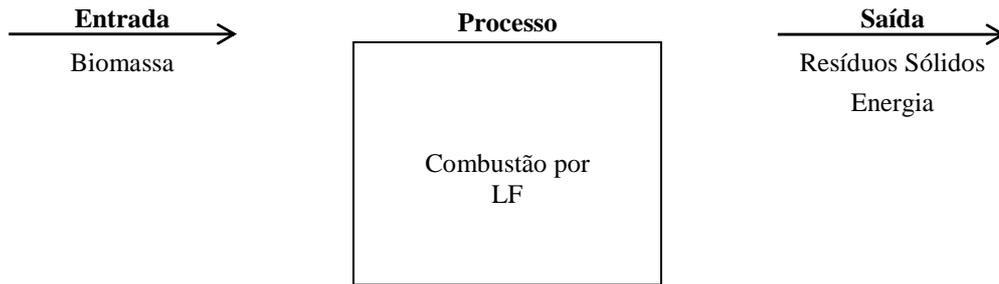


Figura 18– Diagrama de blocos para o inventário do ciclo de vida do processo de combustão por leito fluidizado.

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Os dados quantitativos do processo de combustão por leito fluidizado foram levantados através de uma visita à empresa com aplicação de questionário. Da mesma forma, os dados quantitativos do processo de combustão em grelha foram levantados através de uma visita à empresa com aplicação de questionário e se fez uso das mesmas considerações para a estimativa das emissões atmosféricas.

A Figura 19 expõe as entradas e saídas consideradas no inventário do ciclo de vida do processo de combustão por grelha da biomassa casca de arroz.

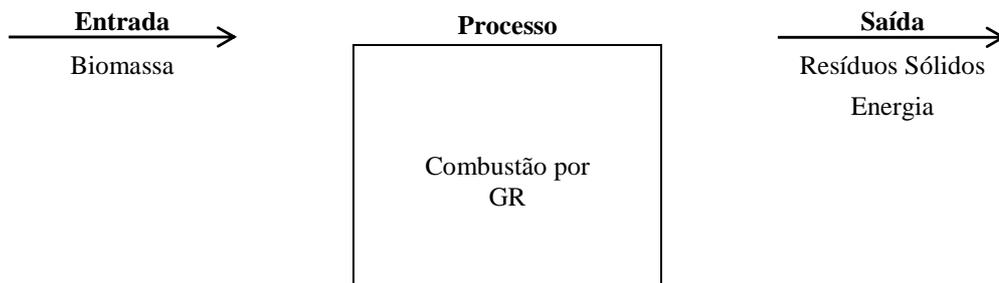


Figura 19– Diagrama de blocos para o inventário do ciclo de vida do processo de combustão por grelha.

Fonte: Elaborado pelo autor (2015).

Os traços do concreto produzido com CCA gerada pelo processo de combustão em grelha têm como base o estudo realizado por Krug (2011). Já os traços do concreto produzido com CCA gerada pelo processo de combustão em leito fluidizado, possui como referência o trabalho de Fedumenti (2013). O cimento utilizado para a realização dos ensaios em ambos os trabalhos foi o CP II F -32. Nessa pesquisa, foi definido que os concretos avaliados possuem classes de resistências características à compressão (f_c) de 35 MPa. O consumo de materiais para a produção de 1m^3 de concreto estão apresentados na Tabela 13 e foram calculados de acordo com a metodologia proposta por Cremonini et al. (2001). Cabe ressaltar que, nestes estudos, 20% de CCA indica que a cinza ocupa 20% do *volume* de algermentes nestes concretos.

Tabela 13 – Quantitativo de materiais para produção do concreto com fc de 35 MPa

Material Kg/m ³	CCA LF		CCA GR	
	0% CCA	20% CCA	0% CCA	20% CCA
Água	188	189	192	191
Cimento	381	285	415	381
CCA _{GR}	0	49	0	61
Agregado miúdo	820	851	741	706
Agregado graúdo	983	969	1025	1018

Fonte: Adaptado de Krug (2011) e Fedumentí (2013).

As emissões atmosféricas para a produção de cimento Portland consideradas na fabricação dos concretos em estudo possuem como referência o trabalho de Carvalho (2002) e podem ser observadas na Tabela 14. Carvalho utilizou a ferramenta de avaliação do ciclo de vida para comparar o impacto ambiental dos cimentos Portland no Brasil. Considerando que o cimento utilizado na pesquisa de Krug (2011) e Fedumentí (2013) não foi estudado por Carvalho (2002), optou-se por utilizar as emissões do cimento Portland CPI, por ser um cimento que não possui adição de resíduos. No entanto, por esse tipo de cimento possuir 10% de filler, o fator de emissão considerado foi reduzido em 10% através de um cálculo direto.

Tabela 14 – Emissões atmosféricas para a produção de cimento Portland

Cimento		Quantidade	Unidade
CPI - Sem adição de resíduos	NOx	1,85	kg/t
	SOx	0,30	kg/t
	CO ₂	855	kg/t
	MP	0,19	kg/t

Fonte: Adaptado de Carvalho (2002)

Nessa pesquisa, para as emissões de CO₂ geradas pelas etapas de produção dos agregados, foram adotados os valores calculados a partir das informações de Marcos (2009), os quais também foram usados por Lima (2010), por se tratarem da realidade nacional.

Tabela 15 – Emissões atmosféricas para a produção dos agregados

Agregados		Quantidade	Unidade
Miúdos	CO ₂	5,81	Kg CO ₂ /t agregado
Graúdos	CO ₂	15,46	Kg CO ₂ /t agregado

Fonte: Adaptado de Marcos (2009) apud Lima (2010)

Não foram consideradas as emissões de CO₂ associadas ao processo de fabricação de aditivos, pois segundo Flower e Sanjayan (2007), a contribuição para as emissões totais por metro cúbico de concreto é insignificante.

3.5 ETAPA 05

Nessa etapa, a partir da análise de inventário do ciclo de vida, foram quantificados os impactos ambientais dos sistemas em estudo e os resultados obtidos foram interpretados.

As emissões da fase de transporte da biomassa e do coproduto foram calculadas através da Equação 1. As substâncias consideradas para o cálculo das emissões de CO_{2 eq} foram o CO e NO_x.

$$\text{Emissões CO}_2 \text{ eq transporte} = F \times \text{CO}_2 \text{ eq} \times D$$

Equação 1

Onde:

F=Fator de emissão da substância (kg/km)

CO_{2 eq} = CO_{2 eq} da substância

D=Distância (km)

As emissões do cimento foram calculadas através da Equação 2. As substâncias consideradas para o cálculo das emissões de CO_{2 eq} foram o CO₂ e NO_x. Carvalho (2002) utilizou o potencial de aquecimento global para o NO_x de 320. Nesse trabalho a consideração para o potencial de aquecimento global do NO_x é de 280, e esta de acordo com a *Environmental Protection Agency* (EPA).

$$\text{Emissões CO}_2 \text{ eq cimento} = F \times \text{CO}_2 \text{ eq}$$

Equação 2

Onde:

F=Fator de emissão da substância

CO_{2 eq} = CO_{2 eq} da substância

De acordo com as UTEs, a geração teórica de CCA é de 22% a partir da massa da casca de arroz combusta nos sistemas de leito fluidizado e grelha, expressa através da Equação 3. No entanto, na prática isso não ocorre, devido à diferença de perda ao fogo observada nos dois processos. Assim, a quantidade de CCA gerada foi estimada a partir dos resultados de perda ao fogo das CCA LF e CCA GR (Equação 4). Posteriormente a geração real das cinzas foi obtida através da soma entre a geração teórica e a geração estimada a partir dos resultados de perda ao fogo (Equação 5).

$$\text{Geração teórica CCA} = \frac{\text{CA} \times 22}{100} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

CA= Casca de arroz

$$\text{Geração CCA PF} = \frac{\text{CCA teórica} \times \text{PF}}{100} \quad \text{Equação 4}$$

Onde:

PF=Perda ao fogo da CCA

CCA teórica= cinza de casca de arroz gerada a partir das considerações da literatura.

$$\text{Geração real CCA} = \text{geração teórica CCA} + \text{geração CCA PF} \quad \text{Equação 5}$$

A quantidade de biomassa estimada para a geração de 1m³ de CCA foram calculadas através da Equação 6 que apresenta a relação entre a quantidade de casca processada nas UTEs e a quantidade real de cinza gerada em cada um dos processos, já relatado anteriormente.

$$\text{CA para 1m}^3 \text{ CCA} = \frac{\text{CA}}{\text{CCA}} \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

CA=Casca de arroz processada (m³/d)

CCA= Cinza de casca casca de arroz gerada (m³/d)

As emissões de CO₂ eq do concreto de 35 MPa, produzido com 20% de CCA LF foram calculadas considerando os dados quantitativos dos materiais, já apresentados na Tabela 13 e os fatores de emissão de cada um desses materiais, como apresentado na Equação

7. As distâncias simuladas para o transporte da CCA LF foram de 100 km, 200 km, 300 km e 400 km, portanto, o fator de emissão desse material variou para cada distância considerada.

$$\text{Emissões concreto CCA LF} = \frac{\text{Cimento} \times F}{1000} + \frac{\text{Agregado miúdo} \times F}{1000} + \frac{\text{Agregado graúdo} \times F}{1000} \quad \text{Equação 7}$$

Através da Equação 8, foram calculadas as emissões de CO₂ eq para o concreto produzido com 20% de CCA GR. Também estão apresentados na Tabela 13 a quantidade de material necessária para a produção de 1m³ de concreto com resistência de 35 Mpa. Assim como para o concreto produzido com CCA LF, o fator de emissão da CCA GR variou em função das distâncias consideradas.

$$\text{Emissões concreto CCA GR} = \frac{\text{Cimento} \times F}{1000} + \frac{\text{Agregado miúdo} \times F}{1000} + \frac{\text{Agregado graúdo} \times F}{1000} \quad \text{Equação 8}$$

3.6 ETAPA 06

Através da realização do estudo, nessa etapa cabem as considerações finais acerca do uso da CCA como um coproduto aplicado ao concreto, gerada a partir dos processos de combustão da biomassa em leito fluidizado e grelha.

4 APRESENTAÇÃO, ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Nesse capítulo do trabalho, são apresentados os resultados obtidos nas etapas descritas na metodologia, buscando atingir os objetivos do estudo.

4.1 GERAÇÃO E MAPEAMENTO DA CASCA DE ARROZ

A produção de arroz no estado do Rio Grande do Sul é dividida em seis regiões, apresentadas na Figura 20. As regiões são: Fronteira Oeste, Campanha, Depressão Central, Planície Costeira Interna, Planície Costeira Externa e Zona Sul.

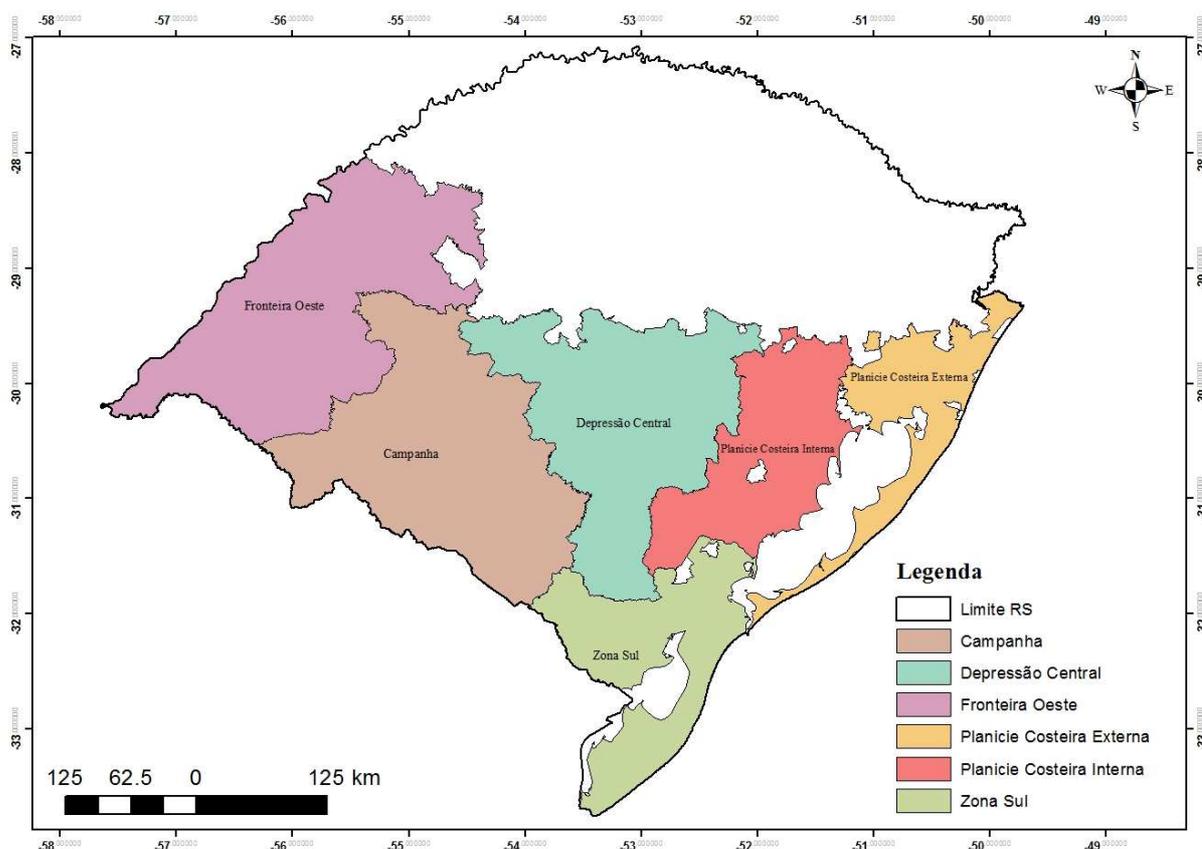


Figura 20 – Divisão de regiões produtoras de arroz no estado do RS.

Fonte: O autor (2015).

A partir das regiões de produção de arroz do estado do Rio Grande do Sul, são apresentados na Figura 21 os municípios localizados em cada região com o respectivo número de empresas beneficiadoras de arroz e geradoras do resíduo de casca de arroz. O município de Pelotas, com 8 empresas, comporta o maior número de beneficiadoras do estado, seguido pelos municípios de São Borja e Camaquã, com 5 e 4 empresas, respectivamente. Apenas o município de Itaqui possui 3 empresas beneficiadoras. A ocorrência mais comum é de uma ou duas empresas de beneficiamento instaladas em cada município.

Tabela 16 – Produção de arroz por regiões, safra 2013/2014.

Região	Produção arroz (t)	Estimativa de produção da CA (t/ano)	CA processada UTE LF (%)	CA processada UTE GR (%)
Fronteira Oeste	2.609.789	521.957,80	13,8	7,8
Zona Sul	1.366.142	273.228,40	-	-
Campanha	1.240.172	248.034,40	-	-
Depressão Central	1.023.667	204.733,40	-	-
Planície Costeira Interna	992.885	198.577,00	-	-
Planície Costeira Externa	884.014	176.802,80	-	-

Fonte: IRGA (2014)

As Usinas Termelétricas em operação no estado do Rio Grande do Sul, a partir da combustão da biomassa casca de arroz, estão apresentadas na Figura 22. É possível observar, que as UTEs estão concentradas na região da Fronteira Oeste e da Campanha do estado, regiões onde ocorre a maior produção de arroz como relatado anteriormente.

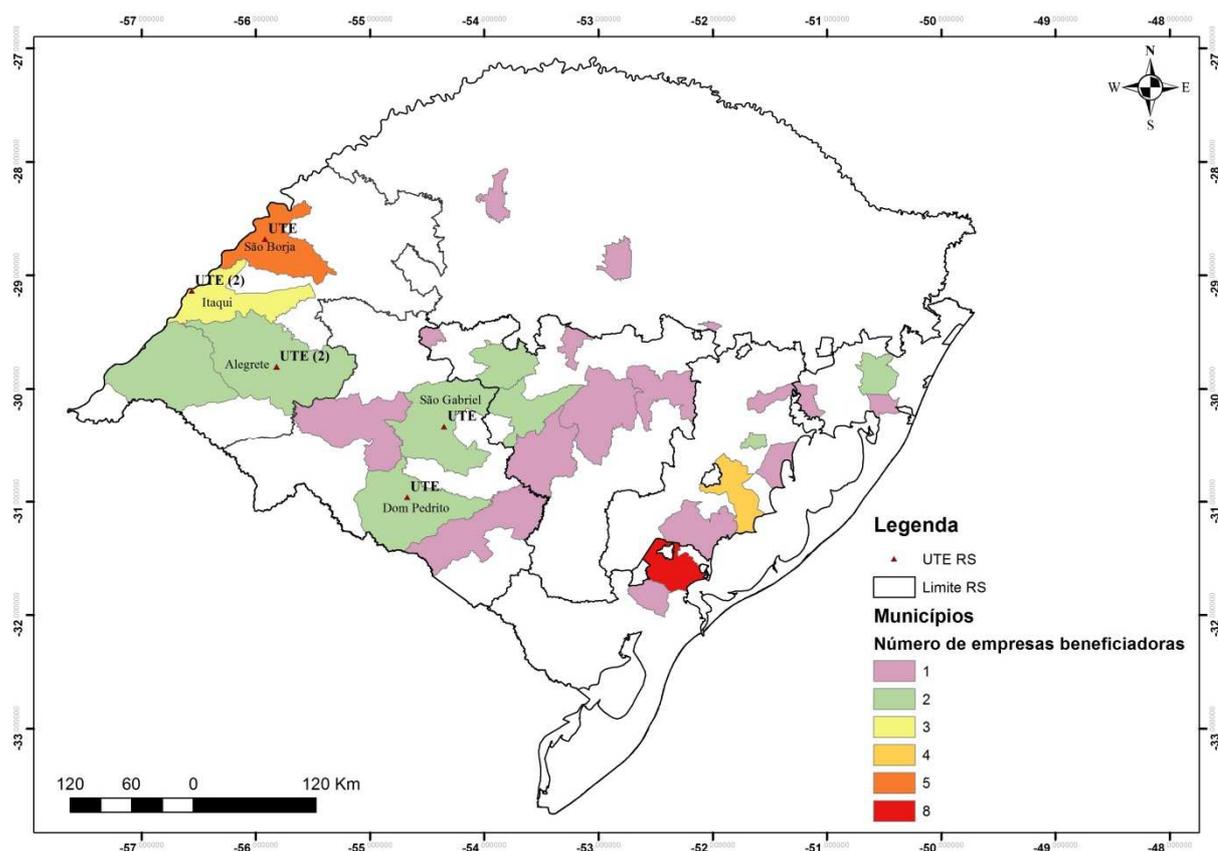


Figura 22 – UTEs do estado do RS .

Fonte: O autor (2015).

Através da quantidade de casca processada nos sistemas de combustão em leito fluidizado e grelha, apresentados na Tabela 16, foi possível estimar a quantidade de casca de arroz à ser utilizada pelas UTEs para fins energéticos. As quantidades de biomassa estimada

para cada UTE estão exibidos na Tabela 17. Foi utilizado como parâmetro para a estimativa realizada, os dados de produção efetiva de energia pelo sistema grelha (3 MW) e a quantidade de casca processada, visto que esse sistema é comumente utilizado por outras UTEs do estado.

Tabela 17 – Estimativa de produção da casca de arroz, safra 2013/2014.

Região	UTE	Potência Instalada (MW)	Quantidade estimada de casca processada (t/ano)	Quantidade total de casca processada (t/ano)	%
Fronteira Oeste	Alegrete LF	5	72000,00	410.100	71,4%
	Alegrete GR	3,8	52440		
	Itaqui	4	55200		
	Itaqui	4,2	57960		
Campanha	São Borja	12,5	172500	362.940	133%
	Dom Pedrito	1,2	16560		
	São Gabriel	25,1	346380		

Fonte: IRGA (2015)

Logo, considerando que todo o arroz produzido na Fronteira Oeste é beneficiado nos municípios que compõe essa região, pode-se aferir que as UTEs estão absorvendo cerca de 71,4% da casca de arroz produzida na região. Na Campanha, onde se localizam outras duas UTEs para geração de energia, é possível constatar que a demanda por biomassa é 33% superior a casca beneficiada nos municípios que integram a região. Porém, como observado na Figura 22, fazem divisa com o município São Gabriel, onde uma das UTEs esta localizada, os municípios de Santa Maria e São Sepé, com duas beneficiadoras instaladas em cada município, que poderiam suprir a demanda por biomassa dessas duas UTEs.

É possível afirmar ainda, que há potencial para geração de energia a partir da combustão da casca de arroz nas demais regiões do estado do RS, como na Planície Costeira Externa e Planície Costeira Interna, visto que não existem UTEs instaladas nessas regiões.

4.2 MASSA UNITÁRIA DA CCA

A massa unitária determinada para a biomassa casca de arroz e as CCA LF e CCA GR são apresentadas na Tabela 18. Foi possível constatar que a massa unitária da CCA GR é superior à massa unitária determinada para a CCA LF. Contudo, a biomassa casca de arroz, apresenta ainda uma massa unitária aproximadamente quatro vezes inferior à massa unitária das cinzas.

Tabela 18 – Massa Unitária

Processo	Massa Unitária (kg/m³)
CCA LF	488,9
CCA GR	579,8
CA	125,2

Fonte: O autor (2015).

4.3 ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTAIS QUALITATIVOS DOS PROCESSOS DE COMBUSTÃO DA BIOMASSA CASCA DE ARROZ

A Tabela 19 e Tabela 20 apresentam a planilha de aspectos e impactos ambientais qualitativos identificados e avaliados nos processos de combustão da casca de arroz em leito fluidizado e grelha, e os de impactos significativos identificados em cada processo.

Tabela 19- Avaliação de aspectos e impactos ambientais do processo de combustão da biomassa em grelha

Identificação				Exame de aspectos e impactos ambientais			Avaliação da significância
Nº	Aspecto	Impacto	Abrangência	Severidade	Frequência	Significância	
1	Consumo de Recurso Natural	Metais e materiais cerâmicos: equipamentos	Uso de recursos naturais não renováveis ou escassos	4	2	1	7
2	Consumo de Recurso Natural Renovável	Material combustível (biomassa)	Produção de energia	4	1	4	9
			Redução da disposição em aterro	4	1	4	9
3	Consumo de Recurso Natural	Uso de matéria-prima para produção de consumíveis (EPI's - luva, botina, protetor auricular, óculos, máscara)	Uso de recursos naturais não renováveis ou escassos	1	1	1	3
4	Consumo de Recurso Natural	Equipamentos de Guindar e Transportar (biomassa)	Uso de recursos naturais não renováveis ou escassos	3	2	4	9
5	Consumo de Recurso Natural	Combustível para movimentação interna de maquinas e motores	Uso de recursos naturais não renováveis ou escassos	1	2	2	5
6	Consumo de Recurso Natural	Água - Produção	Uso de recursos naturais não renováveis ou escassos	2	2	1	5
7	Consumo de Recurso Natural	Água para consumo humano	Uso de recursos naturais não renováveis ou escassos	2	2	4	8
8	Geração de ruído	Equipamentos	Poluição sonora	1	2	4	7
			Risco à saúde	1	2	4	7

Identificação			Exame de aspectos e impactos ambientais			Avaliação da significância
Nº	Aspecto	Impacto	Abrangência	Severidade	Frequência	Significância
9	Emissões para a atmosfera	Efeito Estufa	4	2	4	10
		Chuva ácida	3	2	4	9
		Alteração da qualidade do ar	2	2	4	8
		Risco à saúde	1	2	4	7
	Geração de poeiras/MP	Alteração da qualidade do ar	2	2	4	8
		Risco à saúde	2	2	4	8
10	Geração de resíduos sólidos	Cinza de casca de arroz	4	4	4	12
		Contaminação hídrica	4	4	4	12
	Outros resíduos	Contaminação do solo e/ou ocupação de aterros (sanitário ou industrial)	4	2	3	9
		Contaminação do solo e/ou ocupação de aterros (sanitário ou industrial)	1	1	4	6
	Rejeitos da biomassa	Contaminação do solo e/ou ocupação de aterros (sanitário ou industrial)	1	1	4	6

Tabela 20- Avaliação de aspectos e impactos ambientais do processo de combustão da biomassa em leito fluidizado

Identificação		Exame de aspectos e impactos ambientais			Avaliação da significância		
Nº	Aspecto	Impacto	Abrangência	Severidade	Frequência	Significância	
1	Consumo de Recurso Natural	Metais e materiais cerâmicos: equipamentos	Uso de recursos naturais não renováveis ou escassos	4	2	1	7
2	Consumo de Recurso Natural Renovável	Material combustível (biomassa)	Produção de energia	4	1	4	9
			Redução da disposição em aterro	4	1	4	9
3	Consumo de Recurso Natural	Uso de matéria-prima para produção de consumíveis (EPI's - luva, botina, protetor auricular, óculos, máscara)	Uso de recursos naturais não renováveis ou escassos	4	2	2	8
4	Consumo de Recurso Natural	Equipamentos de Guindar e Transportar (biomassa)	Uso de recursos naturais não renováveis ou escassos	3	2	4	9
5	Consumo de Recurso Natural	Combustível para movimentação interna de maquinas e motores	Uso de recursos naturais não renováveis ou escassos	1	2	2	5
6	Consumo de Recurso Natural	Água - Produção	Uso de recursos naturais não renováveis ou escassos	2	2	1	5
7	Consumo de Recurso Natural	Água para consumo humano	Uso de recursos naturais não renováveis ou escassos	2	2	4	8
8	Consumo de Recurso Natural	Areia que compõe o leito	Uso de recursos naturais não renováveis ou escassos	3	4	1	8
9	Geração de ruído	Equipamentos	Poluição sonora	1	2	4	7
			Risco à saúde	1	2	4	7

Identificação			Exame de aspectos e impactos ambientais			Avaliação da significância
Nº	Aspecto	Impacto	Abrangência	Severidade	Frequência	Significância
10	Emissões para a atmosfera	Efeito Estufa	4	2	4	10
		Chuva ácida	3	2	4	9
		Alteração da qualidade do ar	2	2	4	8
		Risco à saúde	1	2	4	7
	Geração de poeiras/MP	Alteração da qualidade do ar	2	2	4	8
		Risco à saúde	2	2	4	8
11	Geração de resíduos sólidos	Cinza de casca de arroz	4	4	4	12
		Contaminação hídrica	4	4	4	12
	Outros resíduos	Contaminação do solo e/ou ocupação de aterros (sanitário ou industrial)	4	2	3	9
		Rejeitos da biomassa	1	1	4	6

A Tabela 21 apresenta o número de aspectos e impactos ambientais qualitativos identificados e avaliados nos processos de combustão da casca de arroz em leito fluidizado e grelha, e o número de impactos significativos identificados em cada processo. No processo de combustão da biomassa em leito fluidizado, foi identificado um aspecto e impacto ambiental a mais que o processo de combustão em grelha. O aspecto ambiental se refere ao consumo da areia que compõe o leito, ocasionado o impacto ambiental de uso de recursos naturais não renováveis ou escassos.

Tabela 21 – Aspectos e impactos ambientais qualitativos identificados nos processos de combustão da casca de arroz.

Processo	Número de aspectos	Número de impactos Negativos	Número de impactos significativos
Leito fluidizado	14	20	3
Grelha	13	19	3

Fonte: O autor (2015).

Para o processo de obtenção da CCA GR e CCA LF, o número de impactos avaliados e classificados como significativos foram três: Efeito estufa, Contaminação do solo e/ou ocupação de aterros (sanitário ou industrial) e Contaminação hídrica. O impacto ambiental efeito estufa tem origem pelo aspecto emissões para a atmosfera dos gases gerados pela combustão da casca de arroz. Já os impactos, contaminação do solo e/ou ocupação de aterros (sanitário ou industrial) e contaminação hídrica tem como origem o aspecto geração do resíduo CCA.

Através de uma avaliação posterior à identificação dos potenciais impactos ambientais oriundos da combustão da casca de arroz, constatou-se que o impacto contaminação do solo e/ou ocupação de aterros (sanitário ou industrial) e contaminação hídrica ocasionados pelo aspecto geração do resíduo CCA, não representa a realidade da UTE que possui o processo de leito fluidizado para a combustão da biomassa, pois comercializa a CCA LF gerada como um coproduto destinado à construção civil. A Figura 23 ilustra o coproduto CCA LF, comercializado com a denominação de sílica da casca de arroz.



Figura 23 – Coproduto disponível no mercado para uso na construção civil.

Assim, o impacto ambiental avaliado e classificado como significativo para ambos os processos foi o Efeito Estufa, que tem origem através do aspecto emissões para a atmosfera dos gases gerados pela combustão da casca de arroz. Como esse foi o impacto considerado significativo e comum aos dois processos, procederam-se com a avaliação quantitativa de emissões de CO₂ eq para cada um dos sistemas estudados.

A partir das informações obtidas através da aplicação de questionário às UTE, da literatura e da determinação da massa unitária dos materiais, foram construídos os diagramas de blocos com os dados quantitativos dos processos considerados. Na Figura 24 são apresentadas as emissões para o transporte das cinzas e da casca de arroz.

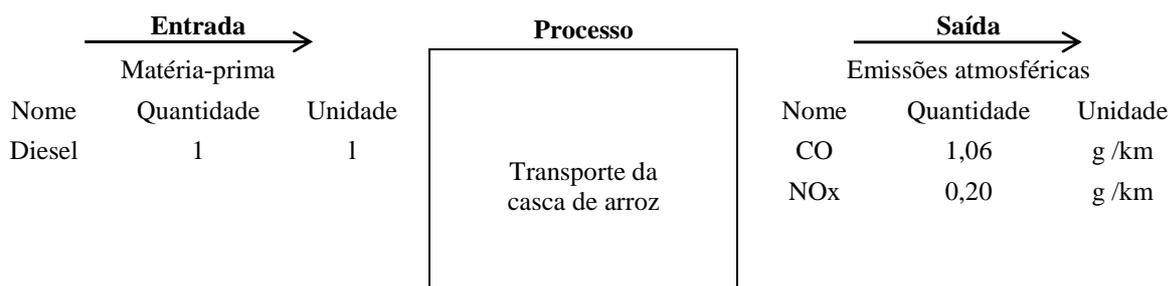


Figura 24 – Diagrama de blocos para o inventário do ciclo de vida do transporte da casca de arroz.

Fonte: O autor (2015).

A Erro! Fonte de referência não encontrada. e Erro! Fonte de referência não encontrada. apresentam a quantidade necessária de biomassa para a geração de 1 m³ de CCA. No sistema de combustão da biomassa em leito fluidizado são necessários aproximadamente 17,23 m³ de casca de arroz; já no sistema de grelha, a quantidade de biomassa utilizada para a geração da mesma quantidade de cinza é de aproximadamente 19,16 m³ de casca. Assim, para gerar a mesma quantidade de cinza, o processo de combustão de

biomassa em grelha necessita de 2.694,6 kg de casca a mais quando comparado ao processo leito fluidizado. Isso representa uma demanda de biomassa para combustão em grelha 10% superior ao processo de leito fluidizado.

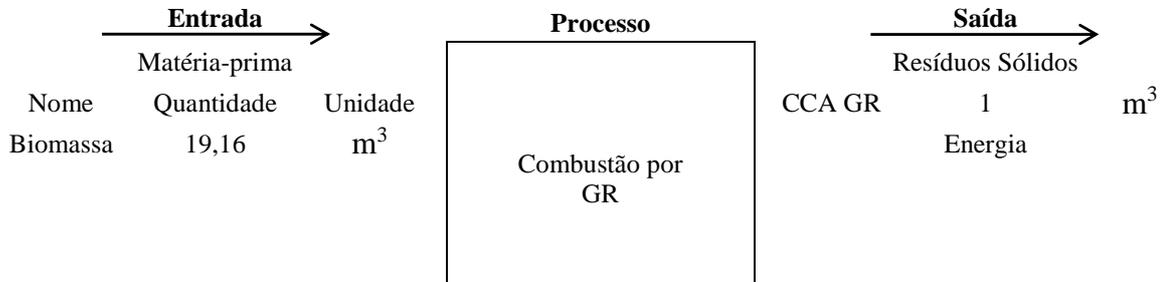


Figura 25 – Diagrama de blocos para o inventário do ciclo de vida do processo de combustão por grelha

Fonte: O autor (2015).

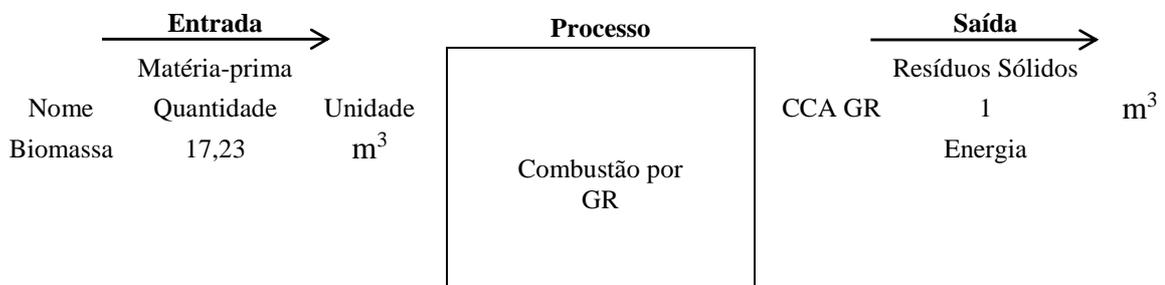


Figura 26 – Diagrama de blocos para o inventário do ciclo de vida do processo de combustão por leito fluidizado

Fonte: O autor (2015).

4.4 AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS AMBIENTAIS SIGNIFICATIVOS

4.4.1 Transporte da biomassa até às UTES

A Figura 27 apresenta um raio de 250 km que abrange as potenciais empresas que fornecem biomassa para geração de energia às UTES em estudo, localizadas no município de Alegrete – RS. A distância de transporte da biomassa fixada em 250 km teve como objetivo estimar as emissões para o cenário mais crítico relatado pelas empresas.

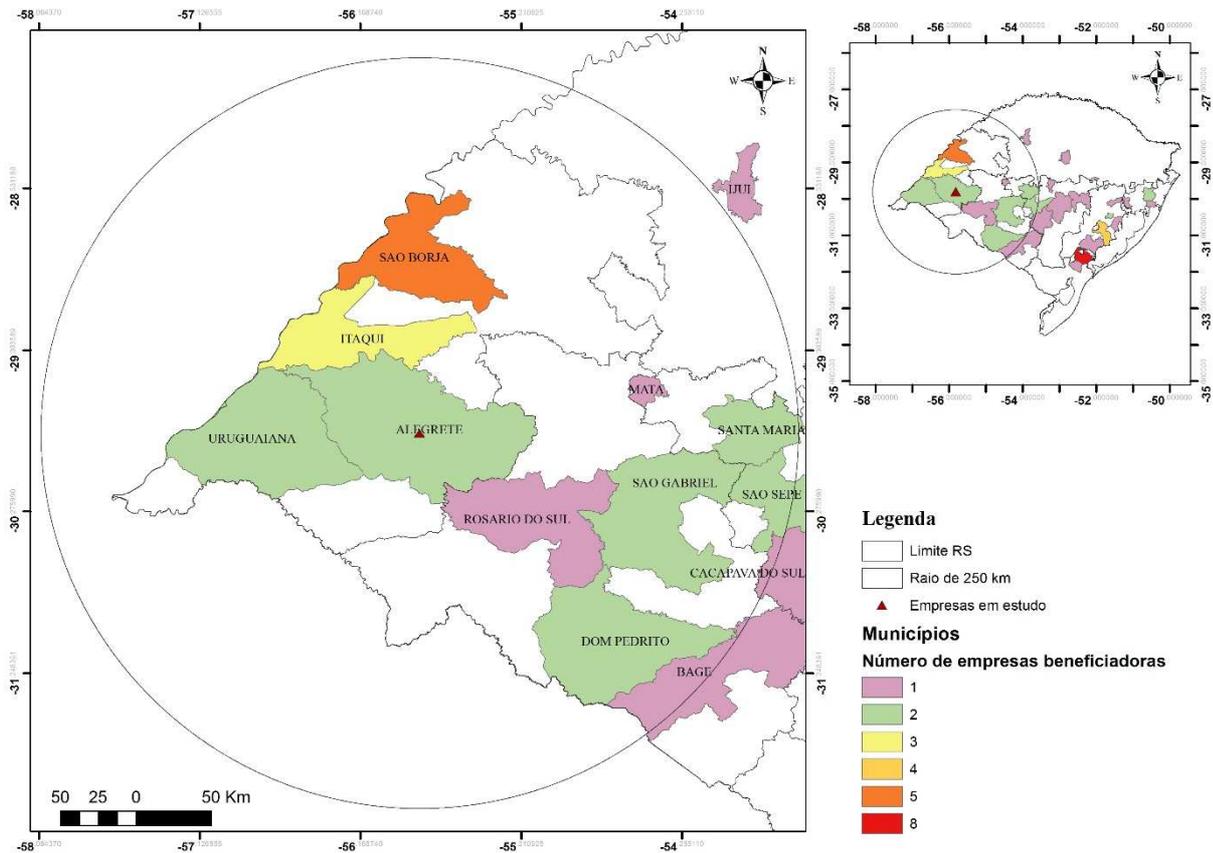


Figura 27 – Raio de influencia das empresas fornecedoras de biomassa.

Fonte: O autor (2015).

Devido ao volume ocupado pela biomassa casca de arroz, em consequência dos baixos valores de massa unitária, a fase de transporte no ciclo de vida desse material é relevante, considerando a distância percorrida entre as geradoras da biomassa, ou seja, das beneficiadoras de arroz até as UTEs. Assim, as emissões de CO₂ atribuídas à fase de transporte da casca de arroz, que utilizam a biomassa para a geração de energia estão apresentadas da Figura 28. Como citado anteriormente, os resultados correspondem à distância máxima de 250 km percorrida pelo transporte da casca de arroz, a qual está de acordo com as informações fornecidas pelas empresas em estudo. Estas empresas não forneceram percentuais em massa da aquisição de casca de arroz em função da distância da fábrica, se mais perto desta cidade ou mais próximo dos 250 km de distância.

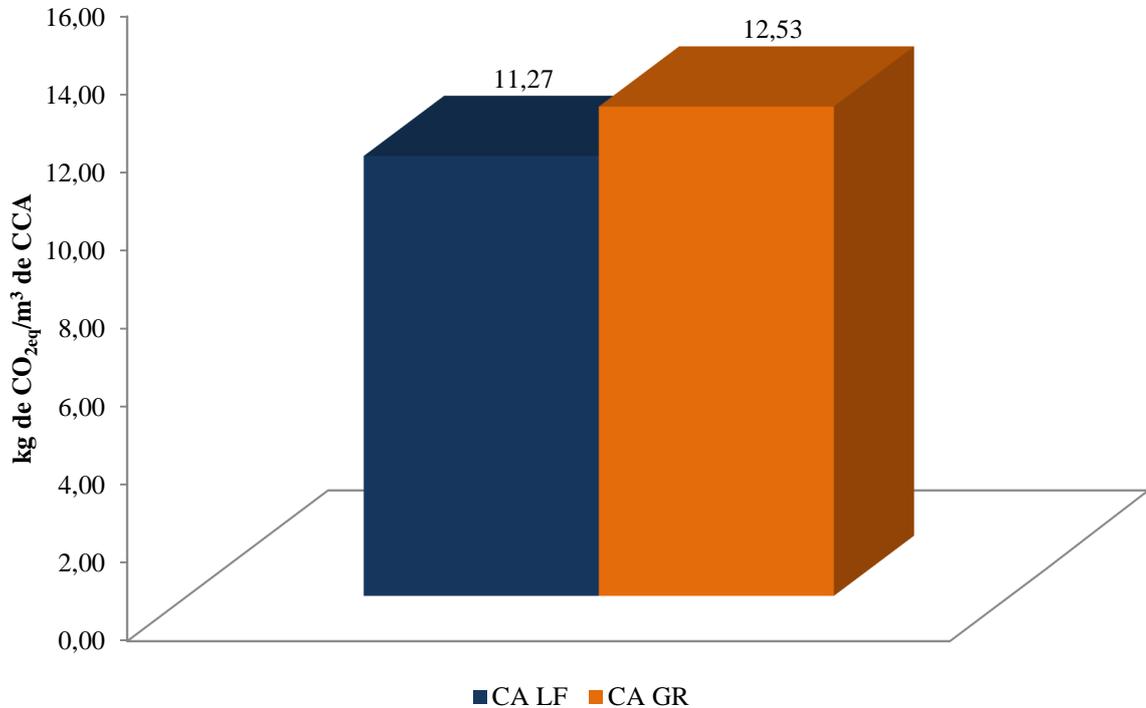


Figura 28 – Emissões de CO₂ através do transporte da biomassa casca de arroz para distância de 250 km.

Fonte: O autor (2015).

Com os resultados obtidos, é possível observar que o transporte da biomassa casca de arroz para a geração de 1 m³ de CCA através do sistema de grelha possui um fator de emissão 10% superior ao sistema de leito fluidizado. O fator de emissão da fase de transporte da biomassa, esta diretamente relacionado à eficiência dos processos, que geram cinzas com características diferentes, incluindo a massa unitária, de interesse nessa fase.

Isso ocorre devido à diferença na eficiência de combustão da biomassa que teoricamente seria de 78% para ambos os processos; no entanto, na prática não é o que se observa. A combustão da biomassa sobre a grelha ocorre pela deposição da mesma em um sistema de grelha, gerando diferentes gradientes de temperatura. Na combustão em leito fluidizado, a casca de arroz é injetada através de um fluxo de ar sobre o leito, o qual possui ar ascendente fornecido através de uma placa distribuidora com a função de fluidizar o mesmo, gerando uma combustão mais uniforme da biomassa.

Outra diferença avaliada entre os processos foi a geração do resíduo CCA após a combustão da casca de arroz. Para que fosse possível a comparação, foi considerada a mesma

quantidade de casca combusta em ambos os sistemas, de 200.000 kg/d. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 29.

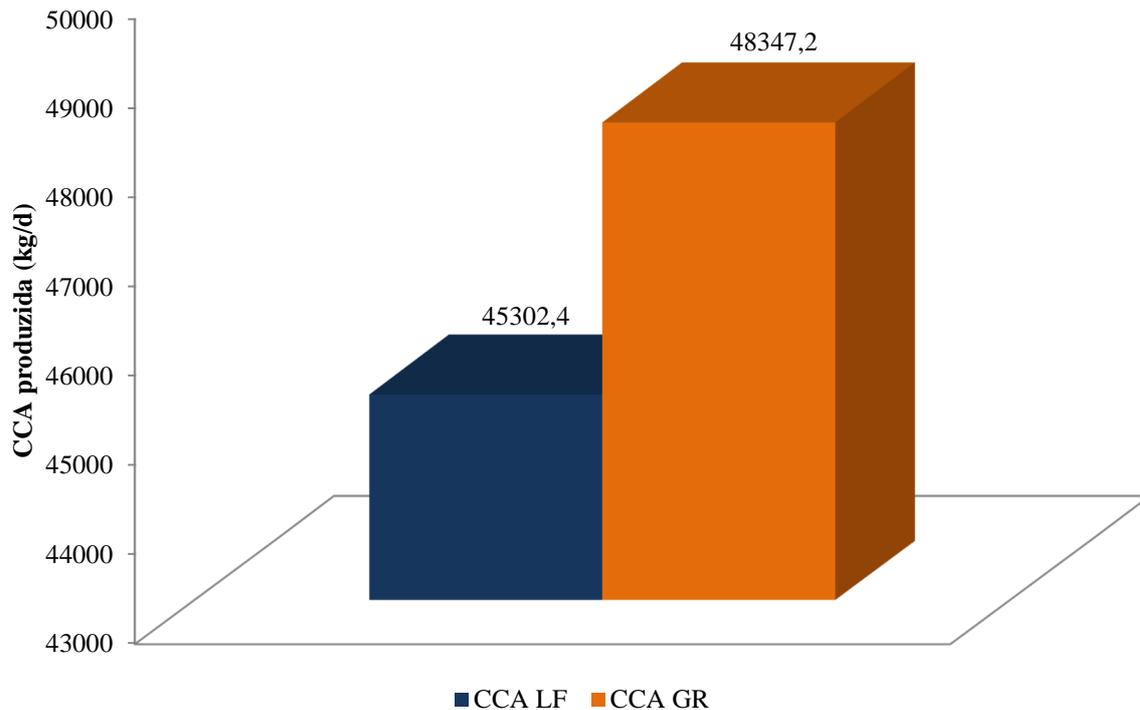


Figura 29 – Geração da CCA através dos sistemas de GR e LF

Fonte: O autor (2015).

A partir da análise da Figura 29, é possível observar que, para o mesmo volume de biomassa processada, quantidades diferentes de resíduo são geradas. Entre os processos estudados, essa diferença é de aproximadamente 3.000 kg/d de CCA que precisam ser gerenciadas pela empresa que utiliza o sistema de grelha para geração de energia. Esse resultado corresponde à geração de 6,3 % a mais de CCA GR. O gerenciamento adequado desse resíduo envolve um espaço para armazenagem, o transporte da cinza até um local distante, aproximadamente 40 km da geração, onde atualmente é descartada no meio ambiente, gerando impactos que poderiam ser evitados se houvesse o aproveitamento desse resíduo, como um coproduto, por exemplo, aplicado ao concreto.

4.4.1 Transporte da CCA até às ESC

Na Figura 30, podem ser visualizadas as empresas de serviço de concretagem (ESC) com potencial de absorver a CCA, mapeadas nas regiões da Fronteira Oeste,

Campanha e Depressão Central do estado do RS. As distâncias consideradas na avaliação quantitativa dos impactos ambientais causados pelo transporte da CCA até as ESC foram de 100 km, 200 km, 300 km e 400 km, e o limite geográfico para cada distância considerada pode ser observado na mesma figura.

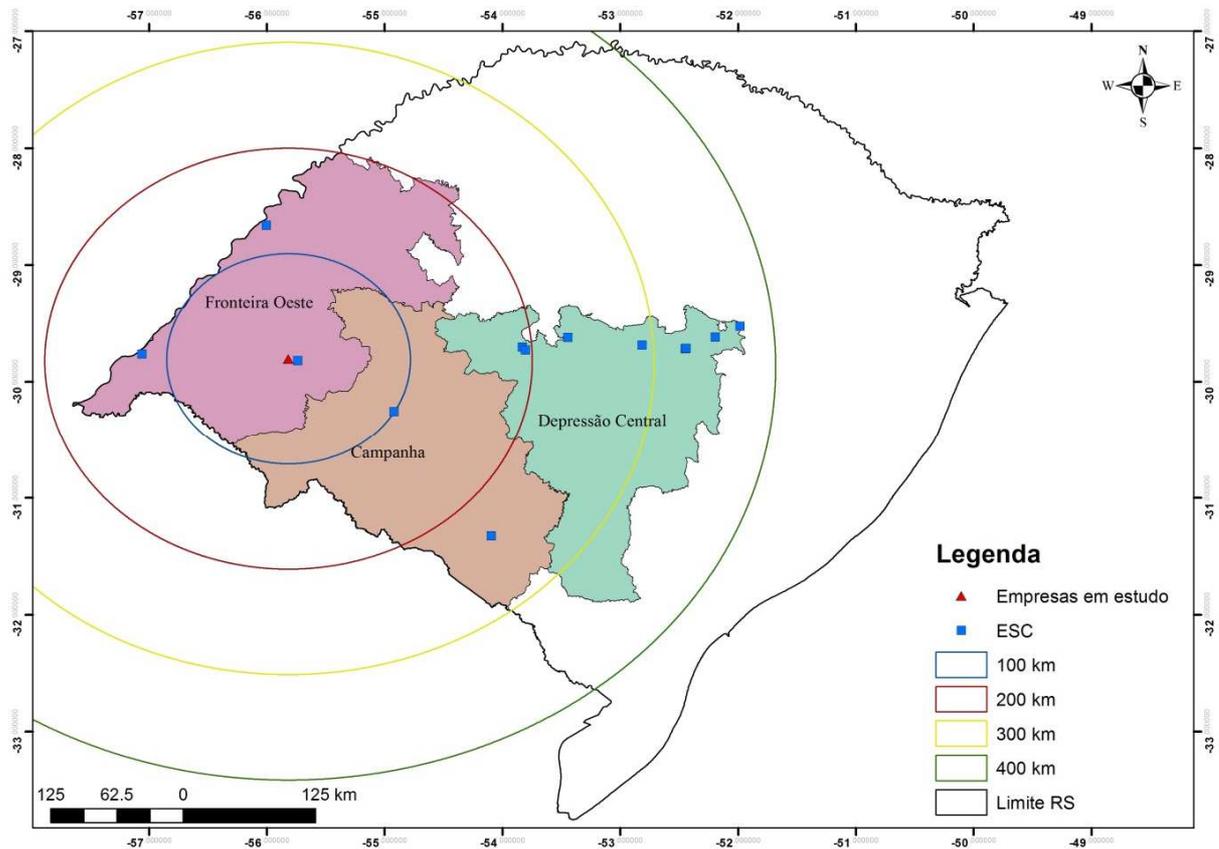


Figura 30 – Empresas de concretagem do estado do RS no ano 2015 .

Fonte: O autor (2015).

A contribuição dessa fase em termos de impacto de aquecimento global pode ser observada na Figura 31, que apresenta as emissões de CO_2_{eq} relacionadas às distâncias de transporte consideradas. É possível observar que há uma diferença entre as emissões de CO_2_{eq} ocasionadas pelo transporte de 1m^3 de CCA LF e CCA GR. A cinza gerada pelo sistema de combustão em leito fluidizado apresentou um fator de emissão de CO_2_{eq} maior na fase de transporte das matérias-primas para todas as distâncias consideradas. Logicamente, quanto maior for a distância de transporte, maior serão as emissões e, conseqüentemente, a contribuição aos impactos ambientais.

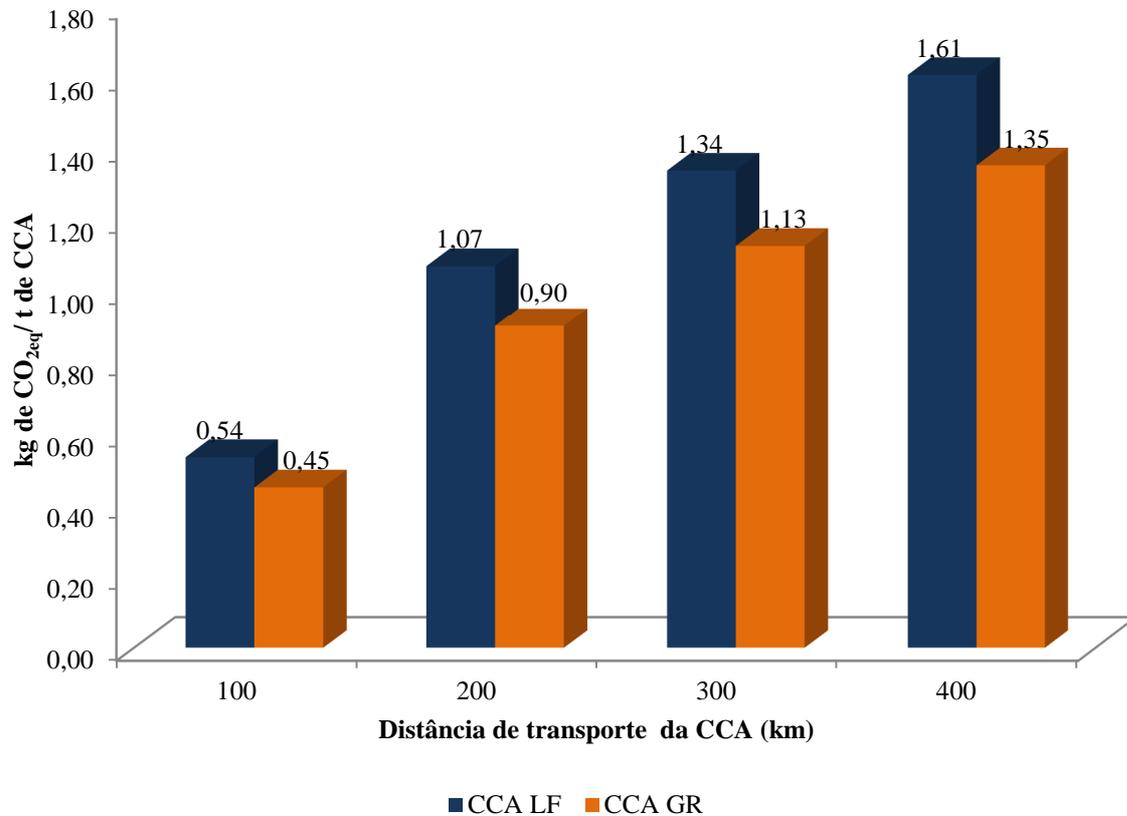


Figura 31 – Emissões de CO₂ pelo transporte da CCA LF e CCA GR até as ESC.

Fonte: O autor (2015).

O volume de 24 m³ de CCA LF e CCA GR foi considerado para o transporte desses coprodutos gerados nas UTEs até às ESC. No entanto, os resultados das emissões de CO₂ eq são influenciados pela quantidade em massa de CCA transportada. Dessa forma, devido a CCA GR apresentar maior massa unitária que a CCA LF, são transportados 2.191 kg a mais de CCA GR, resultado que equivale à aproximadamente 16%. Essa diferença é ilustrada na Figura 32 que apresenta a quantidade em massa de CCA LF e CCA GR transportada em um caminhão com capacidade de 24 m³.

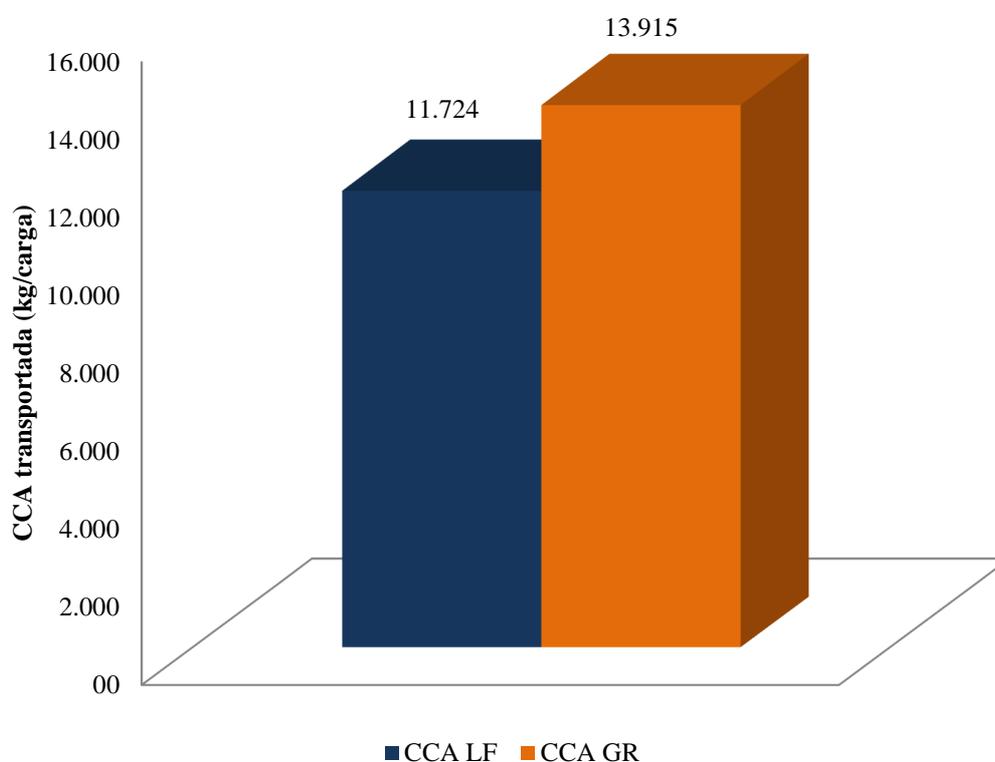


Figura 32 –Massa de CCA LF e CCA GR transportada.

Fonte: O autor (2015).

Do ponto de vista de fornecimento do coproduto para a construção civil haverá uma quantidade maior por este processo, por outro lado, a quantidade de carbono presente na CCA GR, aproximadamente 3,3 vezes maior do que na CCA LF, o que indica uma menor eficiência do processo de combustão, gerando, portanto menos energia. Outro fator esta relacionado à qualidade das cinzas geradas pelos processos de combustão da biomassa para geração de energia, que tornando do ponto de vista da construção civil uma cinza de melhor qualidade é gerada em leito fluidizado, devido à características peculiares que em geral apresentam inexistência de gradientes de temperatura, favorecendo a produção de sílica amorfa.

A forma estrutural que a sílica se apresenta após o processo de combustão da casca de arroz, amorfa e/ou cristalina, irá influenciar na pozolanicidade do material. A NBR 12653:2012 tem como exigência química, ao considerar um material como pozolana, que a soma dos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 deva ser de, no mínimo 50% em massa, condição satisfeita pela CCA LF em estudo pois este teor chega a 96%, e também satisfeita pela CCA GR com 89,2%. No entanto, a perda ao fogo segundo prescrição da norma deve ser inferior a

6%. Fernandes (2015) obteve para a CCA LF perda ao fogo de 2,96% em massa e para a CCA GR, perda ao fogo de 9,88%, superior à prescrição da norma. Também Krug (2011) e Calheiro (2011) obtiveram perda ao fogo superior ao parâmetro previsto pela norma para a cinza obtida em processo de combustão da biomassa em grelha. Cabe salientar que apenas essa análise não é suficiente para indicar que um material possa vir a ser considerado pozolânico, sendo esta informação confirmada com os resultados obtidos com a metodologia proposta por Luxan et. al. (1989).

Luxan et. al. (1989) propõe a metodologia para determinação do índice de atividade pozolânica dos materiais baseado na variação da condutividade elétrica de 200 ml de solução saturada de hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) a 40°C e sob agitação constante devido à adição de 5,0 g de pozolana. Os índices de atividade pozolânica podem ser classificados em três grupos: materiais sem atividade pozolânica: $\text{mS/cm} < 0,4$; materiais de atividade pozolânica moderada: $0,4 < \text{mS/cm} < 1,2$; e materiais com alta atividade pozolânica: $\text{mS/cm} > 1,2$. Calheiro (2011), utilizando o método desenvolvido por Luxan (1989), observou atividade pozolânica moderada para o 68% das amostras de cinzas analisadas, as quais são oriundas de um processo de combustão em grelha.

4.4.1 Concreto

Na Figura 33, estão apresentados no eixo da abscissa às composições do concreto com referência às distâncias consideradas para o transporte da CCA LF e da CCA GR até as ESC. O eixo das ordenadas, apresenta as emissões de CO_2 atribuídas à produção de 1m^3 de concreto com fck de 35 MPa e 20% de substituição de CCA geradas pelos sistemas de leito fluidizado e grelha, por cimento Portland.

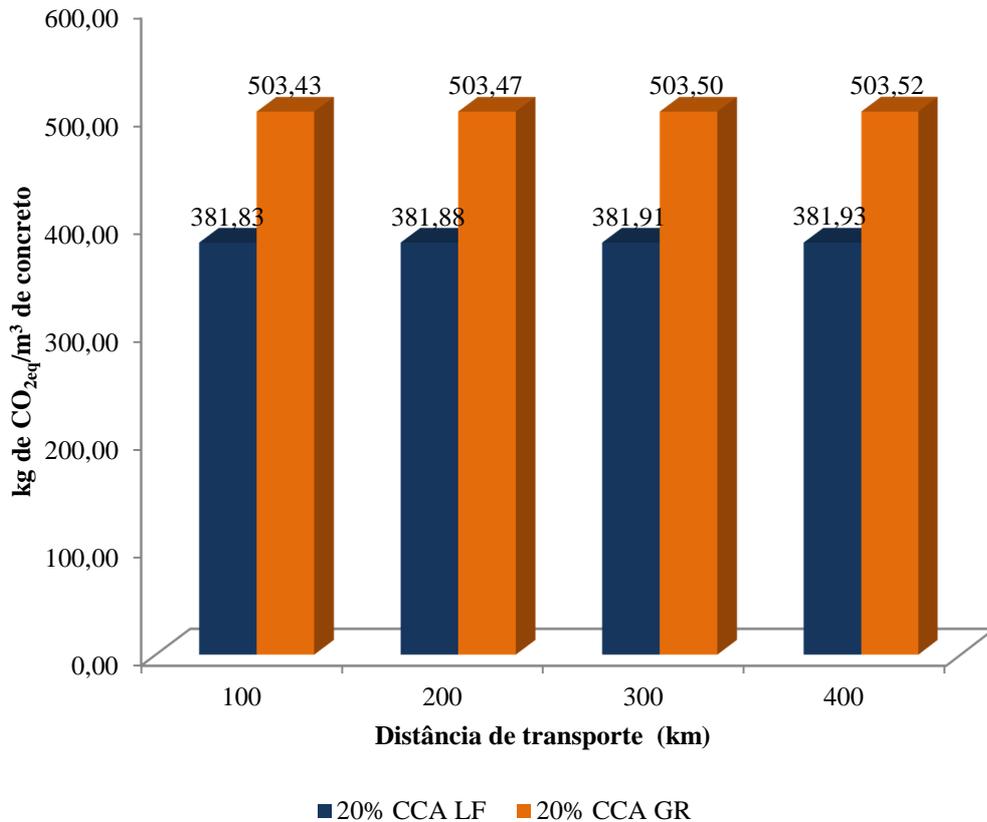


Figura 33 – Emissões de CO₂ do concreto produzido com CCA LF e CCA GR oriundas do transporte 100 km, 200 km, 300 km e 400 km de distância.

Fonte: O autor (2015).

O concreto com fck de 35 MPa e 20% de substituição de cimento Portland por CCA LF apresentou o melhor desempenho ambiental quando comparado com o concreto de mesma resistência; no entanto, com 20% de substituição de cimento Portland por CCA GR.

Com os resultados obtidos, observa-se uma diferença entre os concretos produzidos com CCA LF e CCA GR de aproximadamente 122 kg de emissões de CO₂ eq/ m³ de concreto produzido. Contudo, para esse estudo deve-se ter cautela na análise de números absolutos para a comparação entre os concretos, visto que os traços dos concretos foram obtidos através de trabalhos distintos.

Na Figura 34, estão apresentados no eixo da abscissa às composições do concreto com referência às distâncias consideradas para o transporte da CCA LF até as concreteiras. No eixo das ordenadas, é possível verificar as emissões de CO₂ eq/ m³ de concreto. Realizando a comparação entre os concretos, verifica-se que o concreto com 20% de CCA LF reduziu os valores de emissão de CO₂eq em aproximadamente 121 kg de CO₂ eq/ m³ de concreto. Esse valor corresponde a uma redução de 24%. Segundo Flower e Sanjayan (2007), pequenas

reduções das emissões de gases de efeito estufa por tonelada de concreto fabricado pode causar um impacto global significativo, devido ao concreto ser o material de construção mais utilizado no mundo.

Em 2017, as projeções indicam que a produção de concreto nas centrais dosadoras atingirá 72 milhões de m³ do produto (ABCP, 2015). Considerando que todo o concreto fosse produzido com as características do concreto desse estudo, estariam sendo reduzidas cerca de 8,7 bilhões de kg de CO₂ eq pela substituição do cimento Portland por CCA LF.

Ainda pode-se aferir que mesmo que a CCA LF seja transportada a uma ESC à 400 km de distância, o impacto ambiental do concreto produzido com a substituição de cimento Portland por 20% de CCA LF é menor, contribuindo decisivamente para redução do impacto ambiental causado pela produção de concreto sem adição de resíduos.

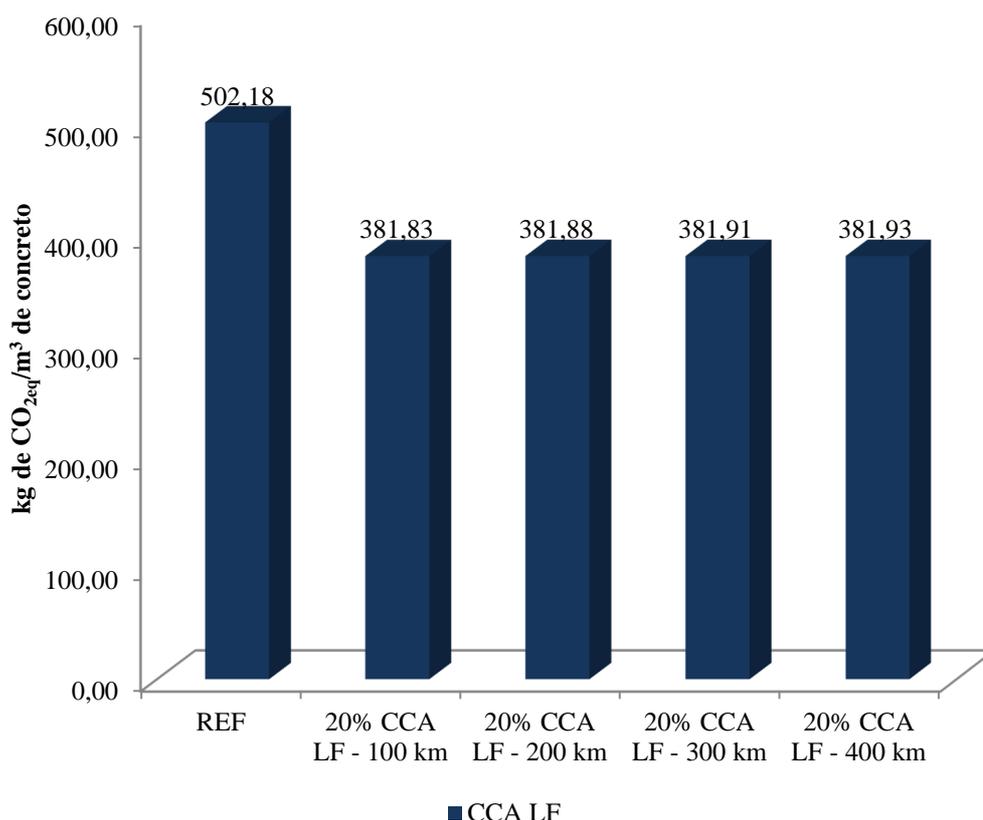


Figura 34 – Emissões de CO₂ eq do concreto produzido com 100% cimento Portland e do concreto produzido com CCA LF oriundas do transporte 100 km, 200 km, 300 km e 400 km de distância.

Fonte: O autor (2015).

Na Figura 35, estão apresentados no eixo da abscissa às composições do concreto de 35 MPa de resistência, produzidos com 20% de substituição de cimento Portland por CCA

GR, com referência às distâncias consideradas para o transporte da CCA GR até as ESC. No eixo das ordenadas, é possível verificar as emissões de $\text{CO}_2 \text{ eq/ m}^3$ de concreto. Os resultados mostram que as reduções de $\text{CO}_2 \text{ eq}$ para o concreto produzido com 20% de substituição de cimento Portland por CCA GR foram de 42 kg de $\text{CO}_2 \text{ eq/ m}^3$ de concreto produzido, o qual corresponde a 7,7% de redução das emissões.

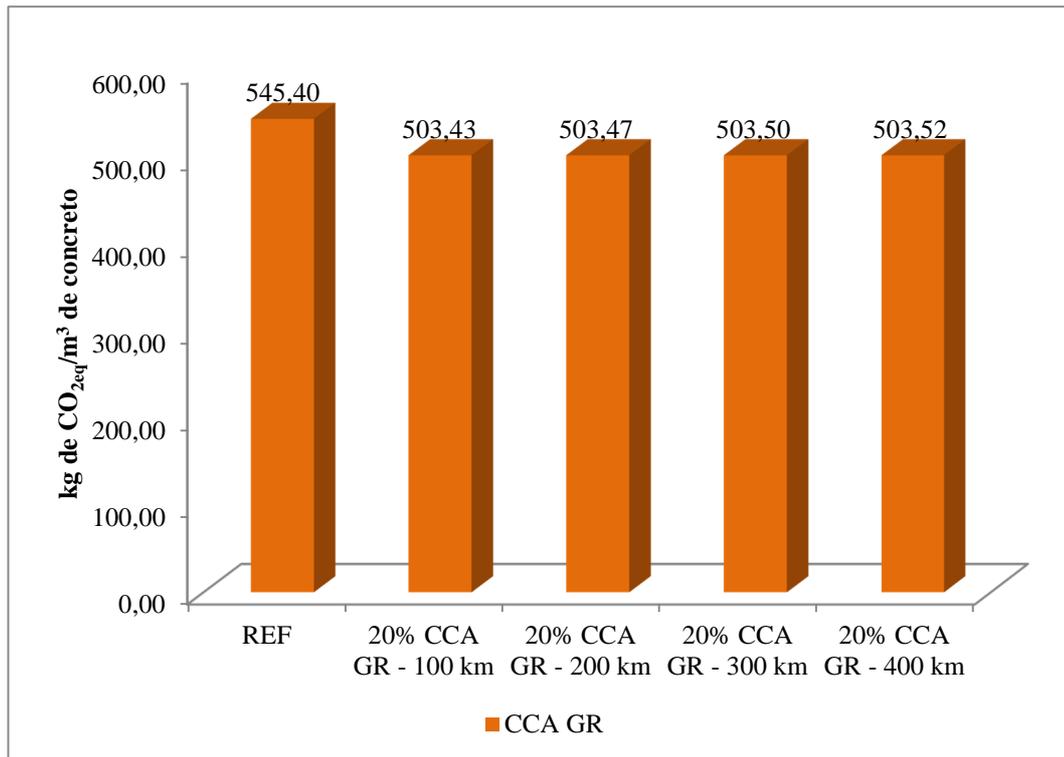


Figura 35 – Emissões de $\text{CO}_2 \text{ eq}$ do concreto produzido com 100% cimento Portland e do concreto produzido com CCA GR oriundas do transporte 100 km, 200 km, 300 km e 400 km de distância.

Fonte: O autor (2015).

Considerando-se que para os concretos estudados atinjam a mesma resistência, é necessário o uso de quantidades diferentes de materiais, o uso da CCA GR não reduziu tanto quanto a CCA LF a quantidade de cimento utilizada no traço do concreto. Além disso, a quantidade total de aglomerante (reduzida no traço com CCA LF), para o mesmo nível de resistência, acabou sendo superior ao traço de referência para o concreto com CCA GR.

Assim, a contribuição nas emissões de $\text{CO}_2 \text{ eq}$ dos materiais que constituem os concretos estão apresentados na Tabela 22. Para o presente estudo, o cimento Portland contribui com cerca de 96% das emissões totais de $\text{CO}_2 \text{ eq}$ para os concretos sem o uso da CCA. Para os concretos com 20% de substituição de Cimento Portland por CCA LF e CCA GR, a contribuição nas emissões de $\text{CO}_2 \text{ eq}$ foi de 94,5% e 95,8%, respectivamente. Dessa

forma, mesmo que o concreto produzido com CCA GR reduza as emissões de CO_{2eq} de modo inferior a CCA LF, deixou-se de consumir matérias primas não renováveis como por exemplo argila e calcário, usadas na produção de clínquer, principal constituinte do cimento e passou a utilizar-se um coproduto de um processo de geração de energia a partir de biomassa renovável.

Tabela 22 – Contribuição nas emissões de CO_{2eq} dos materiais que constituem os concretos.

Materiais	Concreto 0%	Concreto 20%	Concreto 0%	Concreto 20%
	CCA LF	CCA LF	CCA GR	CCA GR
Cimento	96,0	94,5	96,3	95,8
CCA 100km	0,0	0,3	0,0	0,3
Agregado miúdo	0,9	1,3	0,8	0,8
Agregado graúdo	3,0	3,9	2,9	3,1

Fonte: O autor (2015).

Como já mencionado, Flower e Sanjayan (2007) concluíram que entre 74% e 81% das emissões totais de CO_{2eq} são atribuídas ao Cimento Portland. Corroboram com o autor Turner e Collins (2013), que consideram em 76,4% as emissões atribuídas ao cimento. Já Lima (2010) concluiu que a participação média do cimento nas emissões CO_{2eq} é estimada em 90%.

Sendo o cimento o material que representa a maior contribuição às emissões de CO_{2eq}, a substituição de 20% CCA LF ou CCA GR para os concretos com 35 Mpa, significam ainda que deixariam de ser consumidos 96 kg de cimento/m³ de concreto, para o traço de concreto produzido com CCA LF e 34 kg de cimento/ m³ de concreto, para o traço de concreto produzido com CCA GR.

Contudo, pode-se inferir que a substituição de cimento Portland por CCA LF contribui decisivamente para redução do impacto ambiental causado pela produção de concreto sem adição de resíduos. No entanto, deve-se ter cautela na utilização da CCA GR como um coproduto.

Como relatado, as cinzas geradas pelas UTEs possuem diferentes finalidades. Além da geração de energia a partir da combustão da casca de arroz pelo sistema de leito fluizado, a CCA LF é gerada com vistas a sua utilização como um coproduto. Já o processo de combustão da casca de arroz pelo sistema de grelha, tem como propósito apenas a geração de energia, sendo a cinza gerada consequência do processo. Assim, como já apresentado, são geradas cinzas com características diferentes, que influenciaram nas quantidades de materiais necessários para que os concretos atinjam a mesma resistência de 35 Mpa.

Por fim, as diferenças entre as características das cinzas estão relacionadas aos processos de combustão da casca, que promovem a combustão mais uniforme da biomassa, como ocorre no processo de leito fluidizado, ou que promovem a combustão da casca sobre diferentes gradientes de temperatura, como é o caso do processo de grelha.

5 CONCLUSÕES

Os resultados apresentados, referentes ao ciclo de vida da CCA gerada pelos sistemas de combustão da biomassa em leito fluidizado e grelha, e aplicada como um coproduto ao concreto de 35 MPa com 20% de substituição do cimento Portland por CCA GR e CCA LF, permitem concluir que:

- O impacto ambiental identificado como mais significativo para ambos os processos de combustão da biomassa, foi o aquecimento global.
- A UTE que possui o sistema de combustão em leito fluidizado representa cerca de 13,8% da casca consumida para fins energéticos na região da Fronteira Oeste. Já a UTE que possui o sistema de combustão da casca de arroz por grelha representa aproximadamente 7,8% da casca consumida para este fim, na região.
- Para a geração de 1 m³ de CCA, o processo de combustão de biomassa em grelha demanda 10% mais casca que o processo de leito fluidizado.
- Para o mesmo volume de biomassa processada nos sistemas de geração de energia por grelha e leito fluidizado, é obtida uma geração de CCA GR de 6,3% superior à CCA LF.
- A substituição de cimento Portland por 20% de CCA LF contribuiu para a redução de 24% das emissões de CO₂ eq do concreto em estudo.
- Mesmo com a CCA LF distante 400 km da ESC, os benefícios ambientais obtidos com a substituição de cimento Portland por 20% de CCA LF são mantidos.
- A substituição de cimento Portland por 20% de CCA GR contribuiu para a redução de 7,7% das emissões de CO₂ eq do concreto em estudo.
- Para os concretos com 20% de substituição de Cimento Portland por CCA LF e CCA GR, a contribuição do cimento nas emissões de CO₂eq foi de 94,5% e 95,8%, respectivamente. Para os traços dos concretos referência desse estudo, a contribuição do cimento para as emissões de CO₂eq foram de 96% e 96,3%, respectivamente.
- O mapeamento geográfico realizado, permitiu identificar no estado do RS as principais beneficiadoras de arroz, UTEs e concreteiras, mostrando-se como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão para este e outros trabalhos realizados no âmbito da ACV para a CCA.

Finalmente, pode-se concluir que os resultados foram influenciados pela qualidade da cinza gerada, que por sua vez, se relaciona aos processos de combustão da biomassa. O processo de combustão da biomassa sobre a grelha promove a combustão da casca sobre diferentes gradientes de temperatura, já o processo de combustão em leito fluidizado, gera uma combustão mais uniforme da biomassa, promovido pelo perfil de temperatura relativamente constante. Assim, para que o concreto produzido com a substituição de 20% de cimento Portland por CCA GR ou produzido com 20% de substituição de cimento Portland por CCA LF, atinjam a mesma resistência de 35 MPa, foram necessários o uso de quantidades diferentes de materiais, influenciando diretamente nos benefícios ambientais obtidos para ambos os concretos estudados.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros, sugere-se: a avaliação do potencial das empresas de serviços de concretagem absorver o coproduto CCA, replicar este estudo para cinzas geradas em outras UTE's e quantificar os impactos ambientais associados a outros aspectos ambientais relevantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Biomassa: fontes renováveis: parte II. In: _____. Atlas de energia elétrica do Brasil. 3. ed. Brasília, DF, 2008. cap. 4.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoGeracaoTipo.asp?tipo=5&ger=Combustivel&principal=Biomassa>>. Acesso em: 15 mai. 2015.

ALVARENGA, Lídia. Organização da informação nas bibliotecas digitais. In: NAVES, Madalena Martins Lopes; KURAMOTO, Hélio (Org.). **Organização da informação: princípios e tendências**. Brasília, DF: Briquet de Lemos, 2006. p. 76-98.

ARMESTO, L. et al. Combustion behavior of rice husk in a bubbling fluidised bed. **Biomass and Bioenergy**, [S.l.], v. 23, p. 171-179. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR ISO 14040: Gestão Ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estrutura. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT) . **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Disponível em: <<http://www.abcp.org.br/conteudo/imprensa/pesquisa-inedita-e-exclusiva-revela-cenario-do-mercado-brasileiro-de-concreto>>. Acesso em: 25 Jun. 2015.

BENTO, Ricardo Couceiro; ROSSIGNOLO, João. Aplicação da Avaliação do Ciclo de vida (ACV) na análise do desempenho ambiental de estruturas de concreto armado. **Concreto e construções IBRACON**, p. 74-81, jul./set. 2013.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Brasil projeções do agronegócio 2012/2013 a 2022/2023**. Brasília, DF, 2013.

BRASIL, MINISTÉRIO DA AGRICULTURA. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/vegetal/culturas/arroz>> Acesso em 05/06/2015.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Mudanças Climáticas e Qualidade Ambiental. Departamento de Mudanças Climáticas. Gerência de Qualidade do Ar. **1º Inventário nacional de emissões atmosféricas por veículos automotores rodoviários: relatório final**. São Paulo: Estação das Artes, jan. 2011. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/163/_publicacao/163_publicacao27072011055200.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2015.

BRIBIÁN, Ignacio Zabalza; USÓN, Alfonso Aranda; SCARPELLINI, Sabina. Life cycle assessment in buildings: State-of-the-art and simplified LCA methodology as a complement for building certification. **Building and Environment**, v. 44, n. 12, p. 2510-2520, dez. 2009.

CALHEIRO, Daiane. **Influência do uso de aditivos na moagem de cinzas de casca de arroz para sua adequação como coproduto**. São Leopoldo, 2011. 99 f. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. São Leopoldo, RS, 2011.

CALLISTER, W. D. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 7th ed. New York: John Wiley & Sons, 2007.

CAMPOS, Felipe Henrique Azevedo. **Análise do ciclo de vida na construção civil**: um estudo comparativo entre vedações estruturais em painéis pré-moldados e alvenaria em blocos de concreto. 2012. 123 f. (Mestrado em Engenharia civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Minas Gerais(UFMG), Belo Horizonte, 2012.

CARMO, Aline Borges do; POLETTE, Marcus; TURRA, Alexander. Impactos ambientais sobre mares e oceanos. In: CALIJURI, Maria do Carmo; CUNHA, Davi Gasparini Fernandes (Org.). *Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão*. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2013. p. 295-316.

CARVALHO, Juliana de. **Análise de Ciclo de Vida ambiental aplicada a construção civil** – Estudo de caso: Comparação entre Cimentos Portland e adição de resíduos. 2002. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (2002).

CHEHEBE, José Ribamar Brasil. **Análise do ciclo de vida de produtos**: ferramenta gerencial da ISO 14000. Rio de Janeiro: Qualitymark: CNI, 1997.

CLEAN DEVELOPMENT MECHANISM (CDM). Executive Board. **Project design document form (CDM-SSC-PDD)**: version 02. Bonn, Jul. 08 2005. Disponível em: <<https://cdm.unfccc.int/Projects/DB/DNV-CUK1176960362.6/history>>. Acesso em: 12 abr. 2015.

CORDEIRO, Luciana de Nazaré Pinheiro. **Análise da variação do índice de amorfismo da cinza de casca de arroz sobre a atividade pozolânica**. Porto Alegre, 2009. 98 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre,RS, 2009.

COSTA, Bruno Luis de Carvalho. **Quantificação das emissões de CO₂ geradas na produção de materiais utilizados na construção civil no Brasil**. Rio de Janeiro, 2012. 208 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro– UFRJ. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

CREMONINI, R. A. et al. **Desenvolvimento de um método de dosagem de concretos de alta resistência com baixo consumo de cimento**. Porto Alegre, 2001. Disponível em: <http://www.researchgate.net/publication/256439376_Desenvolvimento_de_um_Mtodo_de_Dosagem_de_Concretos_de_Alta_Resistncia_com_Baixo_Consumo_de_Cimento>. Acesso em: 13 jul. 2015. Documento em PDF UFRGS/PPGEC – NORIE.

DAMINELI, B. L. et al. Measuring the eco-efficiency of cement use. **Cement & Concrete Composites**, v. 32, p. 555–562, 2010.

DELLA, V. P. et al. Estudo comparativo entre sílica obtida por lixívia ácida da casca de arroz e sílica obtida por tratamento térmico da cinza de casca de arroz. **Química Nova**, v. 29, n. 6, p. 1175-1179, 2006.

DELLA, Viviana Possamai; KÜHN, Ingeborg; HOTZA Dachamir. Caracterização de cinza de casca de arroz para uso como matéria-prima na fabricação de refratários de sílica. **Química nova**, v. 24, n. 6, p. 778-782. 2001.

DELLA, Viviana Possamai; KÜHN, Ingeborg; HOTZA Dachamir. Rice husk ash as an alternate source for active silica production. **Materials Letters**. v. 57, p. 818-821. 2002.

DHILLON, R.S.; VON WUEHLISCH, George. Mitigation of global warming through renewable biomass. **Biomass and Bioenergy**, v. 48, p.75-89. 2013.

DIXIT, M. K. et al. Protocol for Embodied Energy Measurement Parameters. Department of Architecture, Texas A&M University. U. S. A. 2010.

DUAN, F. et al. Pollutant emission characteristics of rice husk combustion in a vortexing fluidized bed incinerator. **Journal of Environmental Sciences**. v. 25, n. 2, p. 335–339. 2013. Earthscan, London, 2008.

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). **Life cycle assessment: principles and practice**. Reston: Scientific Applications International Corporation (SAIC), May 2006. (EPA/600/R-06/060). Disponível em: <http://www.epa.gov/nrmrl/std/lca/pdfs/chapter1_frontmatter_lca101.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2015.

FEDUMENTI, Mariana Battisti. **Avaliação da influência da cinza de casca de arroz no comportamento de concretos com agregado reciclado de concreto em relação as propriedades mecânicas e de durabilidade, com ênfase no transporte de íons de cloreto**. São Leopoldo, 2013. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. São Leopoldo, RS, 2013.

FERRO, Waldir P.; SILVA, Leonardo G. A.; WIEBECK, Hélio. Uso da Cinza da Casca de Arroz como Carga em Matrizes de Poliamida 6 e Poliamida 6.6. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**. v. 17, n 3, p. 240-243. 2007.

FERRO, Waldir Pedro. **Utilização da cinza da casca de arroz como carga em matriz de poliamida 6 submetida à radiação ionizante**. 2009. Tese (Doutorado) – Instituto de pesquisas energéticas e nucleares, 2009.

FERNANDES, Iara J. et al. Caracterização do resíduo industrial casca de arroz com vistas a sua utilização como biomassa. In: FORUM INTERNACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS, 6., 2015, São José dos Campos. **Anais eletrônicos...** Porto Alegre: Instituto Venturi para Estudos Ambientais, 2015. p. 1-9. Disponível em: <<http://www.6firs.institutoventuri.org.br/images/trabalhos/T13.pdf>>. Acesso em: 18 jun. 2015.

FERNANDES, I. J. **Desenvolvimento e caracterização de compósitos de cinza de casca de arroz em matriz epóxi**. São Leopoldo, 2015. 168f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Unisinos, São Leopoldo. 2015.

FLOWER, David, J. M.; SANJAYAN, Jay G. Green house gas emissions due to concrete manufacture. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, Landsberg, v. 12, n. 5, p. 282-288, July 2007. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1065%2F1ca2007.05.327>>. Acesso em: 14 jan. 2015.

FOLETTTO, L. F. et al. Aplicabilidade das cinzas da casca de arroz. **Química Nova**. v. 28, n. 6, p. 1055-1060. 2005.

Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics – FAOSTAT. Food and Agricultural commodities production. [2012]. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/site/339/default.aspx>>. Acesso em: 13 fev. 2015.

Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics – FAOSTAT . Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>>. Acesso em: 13 jul. 2015.

Geological Survey Minerals Yearbook - USGS. U.S.. Volume I - Metals and Minerals. Cement Statistics and Information. 2015. Disponível em: <<http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/myb.html>>. Acesso em: 08 jun. 2015.

GOEDKOOOP, Mark et al. **Introduction to LCA with SimaPro**. San Francisco: Creative Commons Attribution-Noncommercial-Share Alike, Nov. 2013. Documento em PDF.

HUNTZINGER, D. N.; EATMON, T. A life cycle assessment of Portland cement manufacturing: comparing the traditional process with alternative technologies. **Journal of Cleaner Production** 17(2009) 668-675, 8 pg.

INSTITUTO RIO GRANDENSE DE ARROZ (IRGA). Produtividades municipais - safra 2013/14. Porto Alegre, 2013-2014. Disponível em: <http://www.irga.rs.gov.br/upload/20140903105722produtividade_municipios_safra_13_14_versao_final.pdf>. Acesso em: 13 dez. 2014.

ISAIA, et al. Viabilidade do emprego de cinza de casca de arroz natural em concreto estrutural. Parte I: propriedades mecânicas e microestrutura. **Ambiente Construído**, v. 10, n. 1, p. 121-137, jan./mar. 2010.

JACOBI, Pedro Roberto; BESEN, Gina Rizpah. Gestão de resíduos sólidos em São Paulo: desafios da sustentabilidade. **Estudos Avançados**. v.25, n.71 São Paulo, Jan./Apr, 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S0103-40142011000100010&script=sci_arttext>. Acesso em: 22 jun. 2014.

JOHN, Vanderley M. Materiais de construção e o meio ambiente. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. IBRACON, 2010. p. 97-122.

JOHN, Vanderley M.; GLEIZE, Philippe J. P. Materiais de construção: perspectivas e desafios futuros. In: ISAIA, Geraldo Cechella (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. IBRACON, 2010. p. 1747-1759.

KISHORE, R.; BHIKSHMA, V.; PRAKASH, P. J. Study on Strength Characteristics of High Strength Rice Husk Ash Concrete. **Procedia Engineering**, v. 14, p. 2666-2672, 2011.

KRUG, Lucas Fernando. **Influência do beneficiamento por peneiramento no comportamento da cinza de casca de arroz: estudo como adição pozolânica em concretos**. São Leopoldo, 2013. 136 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS. São Leopoldo, RS, 2013.

LASSO, Paulo Renato Orlandi. **Avaliação da utilização de resíduos de construção civil e de demolição reciclados (RCD-R) como corretivos de solidez e condicionadores de solo**. 2011. 124 f. Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação do Centro de Energia Nuclear na Agricultura. Universidade de São Paulo (USP), Piracicaba, 2011.

LIM, J. S. et al. A review on utilisation of biomass from rice industry as a source of renewable energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 16, p. 3084-3094. 2012.

LIMA, Ângela Maria Ferreira. **Avaliação do ciclo de vida no Brasil – Inserção e perspectivas**. 2007. Dissertação (Mestrado Profissional em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo) – Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, 2007.

LIMA, José Antonio Ribeiro de. **Avaliação das consequências da produção de concreto no Brasil para as mudanças climáticas**. 2010. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2010.

MARRA JUNIOR, Wiclef Dymurgo. Tratamento de efluentes gasosos. In: CALJURI, Maria do Carmo; CUNHA, Davi Gasparini Fernandes (Org.). **Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2013. p. 539-563.

MARTÍNEZ, et al. Assessment of the rice husk lean-combustion in a bubbling fluidized bed for the production of amorphous silica-rich ash. **Energy**. v. 36, p. 3846-3854. 2011.

MARTÍNEZ, et al. Caracterização de Cinza Obtida por Combustão de Casca de Arroz em Reator de Leito Fluidizado. **Química Nova**, v. 32, n. 5, p. 1110-1114, 2009.

MCDONOUGH, William; BRAUNGART. **Cradle to cradle**. 1. ed. 2002.

MENDES, Natalia Crespo. **Métodos e modelos de caracterização para a Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: análise e subsídios para aplicação no Brasil**. 2013. 149 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

MEHTA, P.K.; P.J.M. MONTEIRO. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: IBRACON. 2008.

MEHTA P.K. Reducing the environmental impact of concrete. **Concrete International**, v. 23, p. 61-66. 2001.

MEHTA P.K. Global concrete industry sustainability: tools for moving forward to cut carbon emissions. **Concrete International**. v.31, p.45-48. 2009.

MORAES, C. A. M. et al. Life cycle analysis (LCA) for the incorporation of rice husk ash in

mortar coating. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 12, p. 1170–1176, 2010.

MORAES, C. A. et al. Review of the rice production cycle: By-products and the main applications focusing on rice husk combustion and ash recycling. **Waste Management and Research**, v. 32, p. 1034-1048, 2014.

NATIONAL RISK MANAGEMENT RESEARCH LABORATORY. Office of Research and Development U.S. Environmental Protection Agency. Applications International Corporation (SAIC). **Life cycle assessment: principles and practice**: contract No. 68-C02-067: work assignment 3-15. Cincinnati, May 2006. Documento em PDF.

OLIVEIRA, André Silva. **Análise ambiental da viabilidade de seleção de produtos da construção civil através da ACV e do software BEES 3.0**. 2007. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia civil) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2007.

OLIVEIRA, Marcos José de; VECCHIA, Francisco Arthur Silva. Mudanças Climáticas. In: CALIJURI, Maria do Carmo; CUNHA, Davi Gasparini Fernandes (Org.). **Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. Rio de Janeiro, RJ: Elsevier, 2013. p. 367-399.

PANDEY, Ashok; SOCCOL, Carlos R; MITCHELL, David. New developments in solid state fermentation: I-bioprocesses and products. **Process Biochemistry**. v. 35, p. 1153–1169. 2000.

PERILHON, C. et. al. Life cycle assessment applied to electricity generation from renewable biomass. **Energy Procedia** v.18, p. 165–176. 2012.

PRASARA-A, Jittima; GRANT, Tim. Comparative life cycle assessment of uses of rice husk for energy purposes. In: **J Life Cycle Assess.** v. 16, p. 493-502. 2011.

RIGHI, Débora; NAKANISHI, Elizabete; MOHAMAD, Gihad. Caracterização de Cinza de Casca de Arroz Com e Sem Queima Controlada Utilizadas em Argamassas. In: CONGRESSO LUSO-BRASILEIRO DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO SUSTENTÁVEIS, 2014, Guimarães. **Anais...** Guimarães: 2014. p. 103-114.

SAIDELLES, A. N. F. et al. Gestão de resíduos sólidos na indústria de beneficiamento de arroz. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**. v. 5, n. 5, p. 904-916. Santa Maria, 2012.

SENSALE, Gemma Rodríguez de. Effect of rice-husk ash on durability of cementitious materials. **Cement & Concrete Composites** v. 32, p. 718–725. 2010.

SGA UNISINOS

SHARMA, A. et al. 2011. Life cycle assessment of buildings: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 871–875, 2011.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). Rio de Janeiro, 2012. Documento em PDF.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC).. Rio de Janeiro, 2013. Documento em PDF.

SOARES, Sebastião Roberto; PEREIRA, Sibeli Warmling. Inventário da produção de pisos e tijolos cerâmicos no contexto da análise do ciclo de vida. **Ambiente construído**, Porto alegre, v. 4, n. 2, p. 83-94, abr./jun. 2004.

TURNER, Louise K.; COLLINS, Frank G. Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymers and OPC cement concrete. **Construction and Building Materials**, v. 43, p. 125–130. 2013.

UNITED STATES. Energy Information Administration (EIA). Office of Energy Analysis U.S. Department of Energy. **International energy outlook 2013: with projections to 2040**. Washington, July 2013. Disponível em: <[http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484\(2013\).pdf](http://www.eia.gov/forecasts/ieo/pdf/0484(2013).pdf)>. Acesso em: 10 jun. 2014.

UNITED STATES. United Nations Environment Programme (UNEP). Evaluation of UNITED STATES. United States Environmental Protection Agency (USEPA). Disponível em: <<http://www.epa.gov>> acesso em: 29 maio. 2014.

VAN LOO, S., KOPPEJAN, J. The Handbook of Biomass Combustion and Co-firing.

YIN Chungen; ROSENDAHL Lasse A.; KÆR Søren K. Grate-firing of biomass for heat and power production. **Progress in Energy and Combustion Science**, [S.l.], v. 34, p. 725– 75. 2008. doi:10.1016/j.pecs.2008.05.002. Documento em PDF.

ZAIN, M. F. M. et al. Production of rice husk ash for use in concrete as a supplementary cementitious material. **Construction and Building Materials**, [S.l.], v. 25, n. 2, p. 798-805. 2011. Doi: 10.1016/j.conbuildmat.2010.07.003. Acesso em: 10 jun. 2014.

APÊNDICE 01

Questionário para o levantamento de dados do processo de combustão da casca de arroz para geração de energia por Grelha (GR)

Informações: Este questionário tem como objetivo o levantamento de dados do processo de combustão da casca de arroz para geração de energia por grelha, a fim de contribuir com as pesquisas de caráter científico do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), que visam o conhecimento de modo a colaborar para o desenvolvimento do setor.

Responsáveis pela elaboração do questionário
Mestranda: Eng ^a . Ambietal Magali Rigon Orientador: Prof. Dr. Carlos Moraes Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio Colaboradora: Prof ^a . Dra. Regina Célia Espinosa Modolo email: magali@rigonengenharia.com.br
Responsável pelo preenchimento do questionário
Nome: Empresa: email: cel:

Processo de combustão por grelha

- 1- Qual a tecnologia de combustão em grelha utilizada?
- 2- Como é realizado o pré-aquecimento da câmara (gás ou outro recurso)?
- 3- Qual é o combustível usado na produção de energia? [exemplo.: carvão, biomassa florestal, resíduos agrícolas, resíduos do beneficiamento de produtos (ex.:casca de arroz) etc]
- 4- A que temperatura dá-se o início da introdução do combustível?
- 5- Qual é o produto obtido através do processo de combustão (energia elétrica, térmica, vapor)?
- 6- Qual é a capacidade máxima instalada?

- 7- Produção é a produção efetiva de energia(MW)?
- 8- Quanto de energia é exportado para rede?
- 9- Qual a quantidade de vapor gerada (toneladas/hora)?
- 10- Qual a eficiência do processo de combustão?
11. Qual a temperatura de operação na grelha?
12. Tempo de residência das partículas na grelha
13. Comprimento da esteira na câmara de aquecimento.
14. Velocidade da esteira?
15. Temperatura de contato?
16. Qual a tecnologia usada para a remoção das cinzas volantes (filtro de mangas, precipitador electrostático etc)?
17. Qual a tecnologia usada no controle dos gases da combustão?
18. Efetuam a medição dos gases? Em caso afirmativo, quais medem?
19. É possível o acesso ao relatórios das emissões atmosféricas?

Combustível

20. Origem?
21. Logística de transporte?
 - a. Distância de transporte (km)
 - b. Tipo de transporte usado (caminhão, trem, etc);
 - c. Custos diretos ao produtor ou ao utilizador?
22. Tipo de Armazenamento (se houver)? Em caso de armazenamento, referir uma previsão de tempo do mesmo.
23. Quantidade de biomassa processada ?
24. Há algum tipo de restrição técnica (acondicionamento, logística, etc) para recebimento e processamento da biomassa?

25. Realiza-se algum tipo de tratamento a biomassa antes desta ser introduzida no sistema de combustão? Se sim, qual? Químico? Físico? Secagem? Outro?
26. Quais os subprodutos/resíduos gerados no processamento da biomassa?

Subproduto: CCA

27. Quantidade gerada (t ou m³)?
28. A cinza gerada é coletada e armazenada de forma individual?
29. Destino (s) atual?
30. No caso de não haver aproveitamento interno da cinza, qual a aplicação dá-se ao subproduto/resíduo?
31. Se o resíduo tem como destino final aterro, qual o custo desta operação (R\$/t ou m³)?
32. Em caso de valorização do subproduto/resíduo, qual a aplicação que se destina?
33. Existe algum beneficiamento da CCA para fins comerciais?
- a. No caso de destino do produto para a construção civil, quais as especificações que o produto (CCA) comercializado precisa atender?
 - b. Existe algum controle de qualidade
 - c. Quais ensaios são realizados
34. Qual a respectiva quantidade valorizada (t ou m³)? Quais os custos para o produtor (R\$/t ou m³)? Quais os custos para o utilizador final (R\$/t ou m³)? (especificar em detalhe, caso haja, as etapas de processamento do resíduo, ex.: Tratamento, Embalagem, etc) e discriminar os custos relacionados em cada etapa do processamento (R\$/t ou m³)?

APÊNDICE 02

Questionário para o levantamento de dados do processo de combustão da casca de arroz para geração de energia por Leito Fluidizado (LF)

Informações: Este questionário tem como objetivo o levantamento de dados do processo de combustão da casca de arroz para geração de energia por leito fluidizado, a fim de contribuir com as pesquisas de caráter científico do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), que visam o conhecimento de modo a colaborar para o desenvolvimento do setor.

Responsáveis pela elaboração do questionário
Mestranda: Eng ^a . Ambietal Magali Rigon Orientador: Prof. Dr. Carlos Moraes Orientador: Prof. Dr. Mauricio Mancio Colaboradora: Prof ^a . Dra. Regina Célia Espinosa Modolo email: magali@rigonengenharia.com.br
Responsável pelo preenchimento do questionário
Nome: Empresa: email: cel:

Processo de combustão por leito fluidizado (LF)

1. Qual a tecnologia de combustão em leito fluidizado utilizada?
2. Como é feito o pré-aquecimento do leito (gás ou outro recurso)?
3. Qual é o combustível usado na produção de energia? [exemplo.: carvão, biomassa florestal, resíduos agrícolas, resíduos do beneficiamento de produtos (ex.:casca de arroz) etc]
4. A que temperatura dá-se o início da introdução do combustível?

5. Qual é o produto obtido através do processo de combustão (energia elétrica, térmica, vapor)?
 6. Qual é a capacidade máxima instalada?
 7. Produção efetiva de energia (MW)?
 8. Quanto de energia é exportado para rede?
 9. Qual a quantidade de vapor gerada (toneladas/hora)?
 10. Qual a eficiência do processo de combustão?
 11. Temperatura de operação (°C)?
 - a. No Leito Fluidizado
 - b. No Freeboard
 12. Utilizam algum adsorvente?
 - a. Tipo e marca?
 13. Tempo de residência das partículas no leito
 14. Qual é a quantidade de areia que compõe o leito? E qual a granulometria desta areia?
A separação é fácil, como ocorre a separação das cinzas e areia de leito?
 15. Qual a frequência de reabastecimento de areia no leito? Qual a quantidade de areia reabastecida?
 16. Qual a tecnologia usada para a remoção das cinzas volantes (filtro de mangas, precipitador electrostático etc)?
 17. Qual a tecnologia usada no controle dos gases da combustão?
 18. Efetuam a medição dos gases? Em caso afirmativo, quais medem?
 19. É possível o acesso ao relatórios das emissões atmosféricas?
- Combustível**
20. Origem?
 21. Logística de transporte? (Distância do destino (km); Tipo de transporte usado (caminhão, trem, etc); Custos diretos ao produtor ou ao utilizador?)

22. Tipo de Armazenamento (se houver)? Em caso de armazenamento, referir uma previsão de tempo do mesmo.
23. Quantidade processada (tonelada/hora)?
24. Há algum tipo de restrição técnica (acondicionamento, logística, etc) para recebimento e processamento da biomassa ?
25. Realiza-se algum tipo de tratamento a biomassa antes desta ser introduzida no sistema de combustão? Se sim, qual? Químico? Físico? Secagem? Outro?
26. Quais os coprodutos/resíduos gerados no processamento da biomassa?

Subproduto: CCA

27. Quantidade gerada (t ou m³)?
28. A cinza volante gerada é armazenada de forma individual?
29. Destino (s) atual? Construção civil?
30. No caso de não haver aproveitamento interno da cinza, qual a aplicação dá-se ao subproduto/resíduo?
31. Se o resíduo tem como destino final aterro, qual o custo desta operação (R\$/t ou m³)?
32. Em caso de valorização do subproduto/resíduo, qual a aplicação que se destina?
33. Existe algum beneficiamento da CCA para fins comerciais?
 - a. No caso de destino do coproduto para a construção civil, quais as especificações que o produto (CCA) comercializado precisa atender?
 - b. Existe algum controle de qualidade
 - c. Quais ensaios são realizados
34. Qual a respectiva quantidade valorizada (t ou m³)?
35. Quais os custos para o produtor (R\$/t ou m³)?

36. Quais os custos para o utilizador final (R\$/t ou m³)? (especificar em detalhe, caso haja, as etapas de processamento do resíduo, ex.: Tratamento, Embalagem, etc) e discriminar os custos relacionados em cada etapa do processamento (R\$/ou m³).