

**XI-020 - POTENCIAL ENERGÉTICO DOS RESÍDUOS DE BIOMASSA  
ORIUNDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL ATRAVÉS DA GASEIFICAÇÃO****Fabio Marcelo Vanderlei e Silva<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil pela Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco. Mestre em Gestão da Construção pela Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco (POLI/UPE). Analista de Saneamento da COMPESA-PE.

**Alexandre Duarte Gusmão**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Doutorado em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Colaborador da Universidade Federal de Pernambuco, professor do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco, membro do Conselho Diretor da Associação Brasileira de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica, Livre Docente e professor associado da Universidade de Pernambuco.

**Sergio Peres Ramos da Silva**

Engenheiro Mecânico e Químico Industrial pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Mestre em Applied Mechanics e especialização em Turbinas a Gás no CRANFIELD INSTITUTE OF TECHNOLOGY, na Inglaterra. Doutorado em ENGENHARIA MECÂNICA (gaseificação de bagaço de cana) pela UNIVERSITY OF FLORIDA, nos Estados Unidos. Professor Dr. e coordenador do Laboratório de Combustíveis e Energia (POLICOM) da Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Avenida Cruz Cabugá, 1387 – Santo Amaro - Recife - PE - CEP: 50040-905 - Brasil - Tel: (81) 3412-9099 - e-mail: [fabiomarcelo@compesa.com.br](mailto:fabiomarcelo@compesa.com.br)

**RESUMO**

Nos últimos anos, a construção civil brasileira tem vivenciado um crescimento no setor com novas oportunidades de geração de riqueza. Atualmente, o desafio está na implantação dos conceitos de desenvolvimento sustentável. Várias oportunidades de utilização de fontes alternativas de energia renovável vêm surgindo para suprir a demanda crescente. A conversão termoquímica da biomassa oriunda de resíduos da construção civil (bioRCC) está entre as possibilidades de reciclagem energética. Esta pesquisa tem o objetivo de estudar as técnicas de valorização energética dos resíduos de biomassa oriunda da construção de edifícios residenciais multifamiliares, através da gaseificação, e sua viabilidade. Para tanto, foram coletadas amostras de bioRCC em um canteiro de obra durante a etapa de construção, verificando aspectos como a composição gravimétrica, dimensões, material constituinte e presença de contaminantes. Após as amostras receberem pré-tratamento, foram determinados os teores de umidade, voláteis, carbono fixo, cinzas e o poder calorífico (superior e inferior). Para a gaseificação do bioRCC utilizou-se um mini-gaseificador laboratorial e um de leito fixo downdraft. Os gases coletados foram analisados a partir de um cromatógrafo GC-TCD. Os resultados da caracterização energética demonstraram a boa qualidade do combustível sólido ( $PCI=17,8 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ), produzindo um combustível gasoso com  $PCI$  de  $10,1 \text{ MJ.m}^{-3}$ . Considerando-se a geração diária de 200 toneladas de bioRCC na Região Metropolitana do Recife (RMR), a conversão termoquímica utilizando o mini-gaseificador indica um aporte energético suficiente para suprir aproximadamente 50.000 casas populares. A eficiência de conversão do gaseificador downdraft estimou-se uma redução para 40% em relação ao mini-gaseificador, no entanto, os resultados estão coerentes com aqueles encontrados na literatura. Pode-se concluir ao final da análise dos resultados que a gaseificação do bioRCC surge como uma alternativa de uso sustentável e ressalta o grande potencial para geração de energia elétrica nos centros urbanos.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos da construção civil, Biomassa, Geração de energia.

## **INTRODUÇÃO**

O Brasil tem experimentado um forte crescimento econômico neste começo de século, vindo a figurar no cenário mundial como um país de economia emergente, no entanto, seu desenvolvimento passa prioritariamente por investimentos em projetos de infraestrutura, do setor produtivo e de habitação. O grande volume de empreendimentos traz impactos ao meio ambiente. O modelo de produção utilizado atualmente tornou-se insustentável para sociedade, devido à exploração predatória dos recursos naturais, ocupação desordenada dos centros urbanos e poluição do ambiente por diversas formas. O atual desafio da construção civil está na implantação dos conceitos de sustentabilidade no setor, em suas dimensões econômica, social e ambiental.

A alternativa de aproveitamento energético da biomassa oriunda dos resíduos da construção civil (bioRCC) (madeira serrada, compensados e saco de cimento), através da recuperação destes materiais e a sua conversão em energia, tenta reduzir o volume de matéria orgânica destinada aos aterros e usinas de beneficiamento. Isto é necessário devido à falta de áreas livres para deposição nos grandes centros urbanos, e por ser um processo com altos custos de manutenção com necessidade de monitoramento ambiental mesmo após o fechamento do aterro por causar impactos ao meio ambiente.

Diante deste contexto, inovações tecnológicas têm surgido em vários ramos da engenharia para tentar absorver o resíduo originado pelo processo produtivo como material reciclado e de baixo custo. Em todo o mundo, grandes quantidades de resíduos de madeira estão disponíveis para alimentar usinas de energia. Infelizmente, no Brasil a maioria destes resíduos não está sendo usada como combustível e, em grande parte, essa abundante fonte de energia está sendo desperdiçada. Um exemplo deste desperdício é o resíduo de madeiras oriundas da confecção de fôrmas das estruturas, de instalações provisórias em novas construções, como também os resíduos de demolições de antigas edificações. Dentre as rotas tecnológicas de aproveitamento desta biomassa está a gaseificação que produz um gás combustível constituído principalmente de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>, que possibilita a utilização dos bioRCC em ciclos mais avançados de conversão de energia como o ciclo combinado (ciclo Brayton e Rankine), que utiliza turbina a gás e a vapor, respectivamente, para geração de energia elétrica.

A conjuntura atual do Brasil tem criado mecanismos de incentivo ao uso de biomassa para geração de energia elétrica, como o programa nacional de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica (PROINFA). A possibilidade de aproveitamento energético da biomassa existente nos RCC é um dos caminhos para expansão da oferta de fontes alternativas renováveis em substituição da queima de combustíveis fósseis, obtendo também os benefícios da geração descentralizada, a redução das distâncias para transmissão e suas perdas, e o aumento da confiabilidade.

Outras razões para considerar o uso de resíduos de madeira como fonte de combustível em usinas de energia pode-se destacar: menores emissões de SO<sub>2</sub> e de NO que a maioria dos combustíveis fósseis e a valorização energética dos bioRCC que oferece uma alternativa economicamente viável para este material. O seu uso reduz o risco econômico associado à flutuação dos preços dos combustíveis fósseis e diminui a dependência do petróleo importado.

Este trabalho tem como objetivo estudar técnicas de reaproveitamento energético dos resíduos de biomassa provenientes da construção de edifícios residenciais do tipo multifamiliar (bioRCC), utilizando a tecnologia de gaseificação, e sua viabilidade para geração de energia elétrica.

### **Resíduos de Madeira na Construção Civil (bioRCC)**

O crescimento populacional nos conglomerados urbanos, o avanço tecnológico nos setores produtivos e o aumento do consumo da população têm provocado grandes mudanças no meio ambiente, através do aumento do consumo dos recursos naturais e consequente geração de diversos tipos de resíduos. Devido ao aumento substancial da quantidade de resíduos, surgiu uma preocupação global em desenvolver um mecanismo alternativo de consumo dos recursos existentes sem com isto comprometer as futuras gerações.

Um dos principais responsáveis pela degradação ambiental nas metrópoles do Brasil e do mundo é a grande quantidade de resíduos sólidos gerados pelo setor da construção civil, comumente chamado de resíduos da construção civil (RCC). Gusmão (2008) observa que a indústria da construção civil atua com uma grande

parcela nestas mudanças devido aos seguintes fatores: possui posição de destaque na economia do país (8,3% produto interno bruto – PIB e 30,3% do PIB da indústria), maior consumidora de recursos naturais (20 a 50% do total de recursos naturais) e elevada taxa de geração de resíduos (41 a 70% dos resíduos sólido urbano).

A quantificação do impacto ambiental e seus indicadores variam de região para região, dependendo do método construtivo utilizado, do índice de desenvolvimento, do monitoramento da destinação dos resíduos gerados, entre outros. Parte dos RCC é constituída de materiais recicláveis como papel, metal, plásticos e madeira, que têm um aproveitamento imediato devido ao seu valor comercial (PINTO, 1999).

Carneiro (2005) em seu estudo apresenta a composição média dos resíduos de atividades construtivas da cidade do Recife, identifica que a maior geração de resíduos de madeira (bioRCC) está na etapa de execução da estrutura, com uma participação de 6% na composição da amostra de RCC. No diagnóstico da situação do RCC realizada por Falcão (2011) na cidade de Olinda, onde foram encontrados até 10% de bioRCC, enquanto que nos pontos de deposição irregular do município apenas 1%. A possível justificativa desta baixa quantidade de madeira presente nos pontos de deposição irregular deve-se em grande parte a coleta desse resíduo por pequenos catadores que comercializam estes materiais.

### **Biomassa e Energia**

Até o século XIX, mais de 50% da energia consumida no Brasil e no mundo provinha da madeira. No final do século XIX, a biomassa começou a perder a liderança histórica para a energia do carvão, e no século XX, a civilização moderna com o crescimento industrial optou pelo uso generalizado de combustíveis fósseis (petróleo, gás e derivados). O uso da lenha foi até recentemente considerado um indício de atraso, não apenas econômico ou tecnológico, mas até quanto ao nível de civilização de uma nação. A utilização da biomassa foi reduzida praticamente às residências particulares em regiões agrícolas (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008).

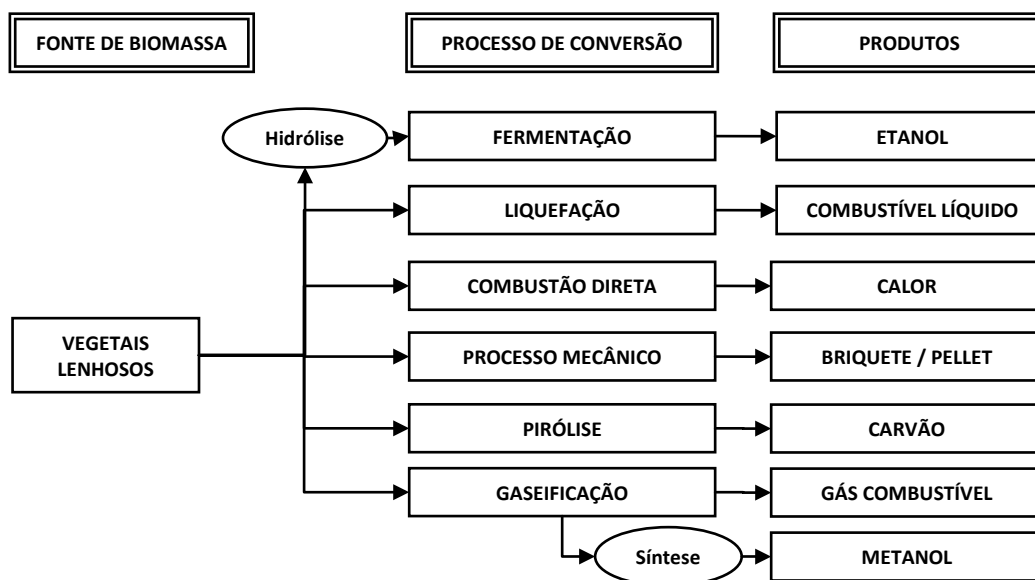
No mundo começa a ser fortalecida a teoria de que o uso do combustível fóssil é uma prática meramente extrativista, não muito diferente daquela que os primatas colhem seu alimento de árvores, mas com consequências climáticas catastróficas pelo aumento da temperatura média do globo devido às emissões de gases do efeito estufa (GEE). Por isso, hoje, o aproveitamento da biomassa é associado a estágios mais elevados de produção, envolvendo sofisticadas técnicas agrícolas e o processamento físico e químico dos insumos (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008).

O Brasil apresenta uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável. A utilização da biomassa como fonte de energia elétrica tem sido crescente no Brasil, principalmente em sistemas de cogeração (pela qual é possível obter energia térmica e elétrica) dos setores industriais e de serviços. Em 2012, ela foi responsável pela oferta de 40,3 TWh (terawatts-hora), segundo o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2013 (BRASIL, 2013). Este volume foi 124% superior ao de 2007 e, ao corresponder a 6,8% da oferta total de energia elétrica, obteve a segunda posição na matriz da eletricidade nacional. Somando as importações, pode-se afirmar que 85% da eletricidade no Brasil é originada de fontes renováveis (incluindo importação). Na relação das fontes internas, a biomassa só foi superada pela hidreletricidade, com participação de 76,9%. Uma das características termelétricas movidas a biomassa é o pequeno porte com potência instalada de até 60 MW, o que favorece a instalação nas proximidades dos centros de consumo e suprimento. (BRASIL, 2008; BRASIL, 2013)

Para se ter uma idéia do potencial energético envolvido, considerando o percentual médio de bioRCC como sendo 5% dos resíduos totais durante a construção de uma edificação na Região Metropolitana do Recife (RMR) e uma geração de resíduos da construção civil atinja entre 3.000 e 4.000 toneladas por dia, conforme Gusmão (2008), a geração de resíduos de madeira em canteiros de obra (bioRCC) atingiria valores em torno de 200 toneladas diárias. Com base na National Association for Forest Industries, da Austrália (2005), que considera uma geração de energia elétrica entre 1200 a 1800 kWh por tonelada de madeira seca, portanto, a biomassa existente nos RCC na RMR, possui uma capacidade teórica de geração de energia mensal de até 10.000 MWh, que seria suficiente para suprir aproximadamente 75.000 casas populares.

- **Tecnologia de Conversão dos Resíduos de Madeira em Energia ou em Combustível**

Vários são os procedimentos que permitem transformar os resíduos em energia. As tecnologias utilizadas para geração de energia elétrica a partir da biomassa são a combustão direta acoplada a um ciclo de vapor, a pirólise e a gaseificação. A queima direta pode gerar calor e empregado para produzir vapor, denominado de ciclo Rankine (ciclo térmico a vapor). A pirólise e a gaseificação podem gerar um gás combustível ou um gás de síntese (monóxido de carbono – CO e hidrogênio – H<sub>2</sub>) que pode ser utilizado com grupos geradores que operam nos ciclos Otto (motores à centelha), Brayton (turbinas a gás) e/ou combinado (Brayton/Rankine). A carbonização produz um carvão vegetal energético ou de termo-redução na indústria siderúrgica, ou um carvão ativo (QUIRINO, 2000). A Figura 1 mostra os processos de conversão energética dos resíduos de madeira.



**Figura 1: Processos de transformação de vegetais lenhosos**  
(Adaptado de BRASIL, 2005).

A gaseificação e a combustão direta acoplada a um ciclo de vapor apresentam-se como importantes tecnologias utilizadas dentre os processos de conversão e geração de energia elétrica a partir da biomassa. Estes processos consistem da reação dos componentes da biomassa com o ar. A combustão direta ocorre com excesso de oxigênio para garantir a queima completa da biomassa. Na gaseificação ocorre uma combustão subestequiométrica, ou seja, deficiente de oxigênio, para que ocorra uma combustão incompleta capaz de gerar CO e H<sub>2</sub> (gases combustíveis), que estão diluídos em CO<sub>2</sub> e N<sub>2</sub>, gerando desta maneira um gás combustível.

A gaseificação e a pirólise são processos termoquímicos utilizados para transformar a biomassa num combustível mais fácil de ser utilizado (combustível gasoso), transportado ou até mesmo ser convertido em combustível líquido.

A gaseificação não é uma tecnologia nova, pois em 1850, a maioria da cidade de Londres foi iluminada pelo gás produzido a partir da gaseificação do carvão (REED e DAS, 1988). A gaseificação é um processo termoquímico de converter um insumo sólido (i.e. resíduos de biomassa) ou líquido num combustível gasoso (CORTEZ, LORA e GÓMEZ, 2008). A conversão termoquímica quebra a estrutura molecular (química) da biomassa por meio de alta temperatura, e forma gases e líquidos mais leves e menos complexos. É uma maneira de transformar a biomassa num combustível mais fácil de ser utilizado, transportado ou até mesmo ser convertido em líquido ou gás. O processo objetiva converter o máximo da biomassa em gás de síntese (CO – monóxido de carbono e H<sub>2</sub> – hidrogênio), transformando não só a água e os voláteis em vapor e gases, como também converter o carbono fixo em gases. Os principais compostos formados nesse processo são monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), hidrogênio (H<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>) e nitrogênio (N<sub>2</sub>), com traços de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> e C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>, bem como alcatrão e particulado (PERES, 1997; SALES, ANDRADE e LORA, 2006).

Idealmente, o processo produz apenas gases não condensáveis e resíduos de cinza. Porém, na realidade, a gaseificação incompleta do carvão e o alcatrão da pirólise irão produzir um gás combustível contendo vários contaminantes. A composição do gás e o nível de contaminação variam com a matéria-prima, tipo de reator e parâmetros de operação. Características típicas do syngas são mostradas na Tabela 1.

**Tabela 1: Características do gás produto**

Tecnologia	Composição (%)					PCS [MJ.Nm <sup>-3</sup> ]	Qualidade do gás	
	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>		Alcatrão	Particulado
Leito fixo atmosférico	9	14	20	7	50	5,4	Regular	Pobre
Updraft atmosférico	11	24	9	3	53	5,5	Pobre	Boa
<i>Downdraft atmosférico</i>	<i>17</i>	<i>21</i>	<i>13</i>	<i>1</i>	<i>48</i>	<i>5,7</i>	<i>Boa</i>	<i>Regular</i>
Downdraft oxigenado	32	48	15	2	3	10,4	Boa	Boa
Leito fluidizado multi-sólido	15	47	15	23	0	16,1	Regular	Pobre
Leito fluidizado (twin)	31	48	0	21	0	17,4	Regular	Pobre

**Fonte: Bridgwater, Toft e Brammer (2002)**

Embora as tecnologias de gaseificação de biomassa tenham demonstrado sucesso em larga escala e vários projetos estejam em operação ou em fase avançada de construção, eles ainda são relativamente caros em comparação de energia com base fóssil e, também, encontram barreiras econômicas e outras barreiras não técnicas ao tentar penetrar no mercado de energia. Gaseificação de biomassa só será capaz de penetrar o mercado de energia se estiver completamente integrado a um sistema de biomassa, ou seja, a integração da tecnologia de gaseificação em sistemas existentes ou recém-desenvolvido onde pode ser demonstrado que o sistema global oferece melhores perspectivas para o desenvolvimento econômico (BRIDGEWATER, 2003).

## MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa constitui de um trabalho no campo experimental que visa levantar as propriedades e características energéticas dos resíduos de biomassa (bioRCC) e realização dos ensaios de gaseificação com amostras das madeiras de RCC (bioRCC) coletados na obra de referência. Para atingir os objetivos a metodologia está dividida em 03 (três) etapas: coleta e preparo da biomassa, caracterização energética da biomassa, e gaseificação da biomassa.

### Coleta e Preparo da Biomassa

A primeira fase consistiu em trabalhos de campo para coleta de amostras dos resíduos de madeira (bioRCC) em canteiros de obras durante a etapa de construção de um edifício residencial multifamiliar construído em estrutura de concreto armado. Nesta etapa foram avaliados vários aspectos como a composição gravimétrica da biomassa, as dimensões das peças, o material constituinte (resina, colas, selantes, plastificantes), a presença de elementos metálicos (pregos, parafusos, grampos, arames) e impurezas (resíduos de tintas, óleos desmoldantes, pó de cimento).

Observou-se que as peças de madeira usadas na obra podiam ser separadas em 4 (quatro) grandes grupos (Figura 2), considerando o tipo de madeira constituinte, processo de fabricação do insumo e o seu emprego, sendo nomeadas da seguinte forma: RCC Misto, RCC Pinus, RCC Plastificado e RCC Resinado.

Antes da utilização dos resíduos de madeiras da construção civil para geração de energia existe a necessidade da separação do material desejado junto aos outros gerados pela obra. A separação pode ser feita no próprio canteiro de obra, pela implantação de um sistema de gestão diferenciada dos RCC. Normalmente, algum tratamento termomecânico necessita ser realizado nos resíduos da madeira, pois não podem ser utilizados como combustíveis na forma em que se encontram disponíveis. Rendeiro et al. (2008) apresenta os tratamentos mais usuais como sendo: secagem, torrefação, briquetagem, peletização e trituração.



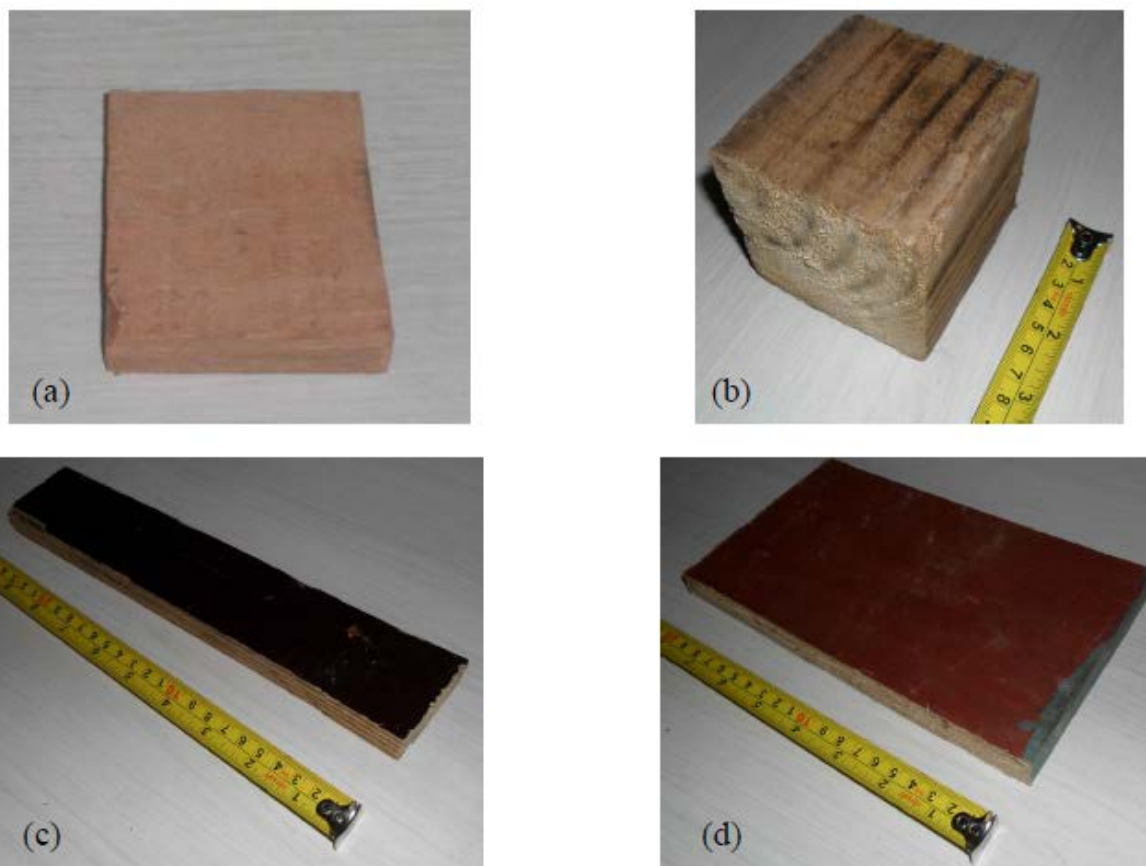


Figura 2: (a) RCC Misto - madeira serrada mista (b) RCC Pinus - madeira serrada pinus (c) RCC Plastificado - compensado plastificado (d) RCC Resinado - compensado resinado.

### Caracterização Energética da Biomassa

Na segunda etapa foram realizados ensaios para caracterização energética da biomassa. Todo o trabalho experimental foi realizado no Laboratório de Combustíveis e Energia (POLICOM) da Universidade de Pernambuco. Nestes ensaios foram determinados: a análise termogravimétrica (TGA e DTA) (ASTM D 3172-73 a D 3175-73, 1983), o poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI) (ASTM D 2015-77, 1983) das amostras. A seguir são descritas em linhas gerais as finalidades dos principais ensaios laboratoriais previstos nesta pesquisa.

#### • Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica é usada para determinar alterações da massa de amostras em função da temperatura, identificando as etapas que ocorrem durante a carbonização. Foi usada uma balança termogravimétrica Shimadzu, modelo DTG-60. Os resultados obtidos são apresentados em gráficos TGA (análise termogravimétrica) e DTA (análise termogravimétrica derivada). A aplicação típica desta técnica está na avaliação da estabilidade térmica e temperatura de decomposição. A derivada primeira da curva termogravimétrica (TG) é a termogravimetria derivada (DTG), que mostra a variação de massa em função da temperatura sob a forma de picos, que definem melhor o início e o fim de um processo.

#### • Poder Calorífico

É a quantidade de calorias liberadas na combustão completa de uma unidade de massa do combustível. A unidade mais usada no Brasil para combustíveis sólidos é a kcal.kg-1 ou cal.g-1, porém, deve ser adotado as unidades derivadas do Sistema Internacional (SI), que reportam os valores em termos de MJ.kg-1. Para combustíveis gasosos é MJ.m-3, com a opção de utilização da unidade em kcal.m-3. Sua determinação pode ser teórica pelo conhecimento da composição química do combustível ou experimental com o auxílio da

bomba calorimétrica (QUIRINO, 2000). As análises para obtenção do PCS e PCI foram realizadas num calorímetro IKA/WERKE, modelo C 2000.

A bomba calorimétrica é um equipamento frequentemente utilizado para a determinação do poder calorífico de combustíveis sólidos e líquidos. Uma determinada quantidade do combustível é fechada dentro de um recipiente de metal, que posteriormente, sofre uma injeção de oxigênio para atingir a pressão requerida pelo equipamento de teste. Para o Calorímetro IKA C-2000 esta pressão é de 30 bar. A bomba é então mergulhada em um recipiente com parede dupla contendo água em seu interior. A temperatura da água é medida em função do tempo antes, durante e depois do processo de ignição e conhecendo-se a massa de água do sistema, massa e calor específico do recipiente e as curvas de aquecimento e resfriamento da água; a energia liberada durante o processo de combustão pode ser determinada. Um agitador assegura a uniformidade da temperatura da água ao redor da bomba. Para obtenção do PCI são necessárias titulações, cujos resultados devem ser digitados na tela do calorímetro para cálculo do PCI (procedimento do fabricante).

### **Gaseificação da Biomassa**

Nesta terceira etapa foram realizados ensaios de gaseificação com amostras de bioRCC. A gaseificação objetiva converter um insumo sólido (resíduos de madeira) em combustível gasoso (gás de síntese ou syngas) que é uma mistura em hidrogênio, monóxido de carbono e metano.

No laboratório POLICOM existem 02 (dois) tipos de gaseificadores, um em escala laboratorial (gaseificador de bancada) e um em escala piloto (gaseificador de leito fixo downdraft TERMOQUIP). Os dois estão instalados e em operação, sendo que o segundo encontra-se acoplado a um grupo gerador para produção de energia elétrica.

O gaseificador laboratorial é composto por uma fornalha, em aço Schedule 80 sem costura, disposta horizontalmente, conectada a tubulações secundárias e válvulas. Existem 03 (três) ramificações no forno, separadas entre si de 15cm, em cada uma delas existe um termopar tipo K para monitoramento da temperatura. O centro da tubulação principal pode atingir temperaturas superiores a 900°C. O forno é aquecido indiretamente por duas resistências elétricas (1000 watts) com isolamento térmico cerâmico. Em uma extremidade existe uma válvula de esfera onde são injetadas as amostras e retirados os resíduos da gaseificação. Do lado oposto está conectado o transmissor de pressão. O gás combustível produzido deixa o equipamento através de uma válvula solenóide, que vai para um sistema de filtragem e acondicionado em sacos amostradores (bag).

Foram realizados ensaios de gaseificação para cada tipo de bioRCC, nas temperaturas de 700, 800 e 900°C, com massa inicial injetada de 5g e tempo de residência de 3 (três) minutos. Todos os experimentos foram realizados em triplicata.

A planta piloto do gaseificador utiliza um reator de leito fixo de fluxo concorrente (downdraft), com capacidade de bateladas de 30 -50 kg de biomassa. A tecnologia de gaseificação downdraft é mais utilizada e difundida. Com a alimentação de combustível pelo topo, a alimentação de ar é feita em fluxo descendente (mesmo sentido do fluxo de combustível), passando pela zona de combustão e redução. Com este tipo de configuração, a mistura de gases na saída é relativamente livre de alcatrão (entre 0,1 e 1,2 g.Nm-3), no entanto tem uma quantidade significativa de particulado (cinza e fuligem) (entre 0,1 e 1,0 g.Nm-3), podendo ser filtrado com certa facilidade (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

A amostra utilizada nesta gaseificação possuía a mesma proporção em massa dos tipos de madeira adquirida pela obra de referência. A coleta do gás produzido realizada em intervalos de tempo programada, através de uma válvula de coleta situada no gasômetro, passando por um sistema semelhante ao utilizado no gaseificador de bancada, composto de um filtro e saco amostrador (bag).

- **Cromatografia Gasosa**

Cromatografia é um método físico de separação, no qual os componentes a serem separados são distribuídos entre duas fases: a fase estacionária e a fase móvel. A amostra é transportada por uma corrente de gás através de um tubo, chamado de coluna, com paredes revestidas com diferentes fases estacionárias. As substâncias que

têm a maior interação com a fase estacionária são retidas por maior tempo e, conseqüentemente, diferenciadas daquelas com menor interação, cada composto elui em tempos diferentes (tempo de retenção). O equipamento utilizado na análise cromatográfica foi o cromatógrafo a gás, modelo SRI-8610C, equipado com um detector de condutividade elétrica (TCD). O hidrogênio foi utilizado como gás de arraste para análise dos componentes gasosos, exceto para o próprio hidrogênio que utilizou o argônio.

Para avaliação do gás combustível gerado foram determinados o percentual mássico de cada constituinte dos gases encontrados na gaseificação da biomassa (hidrogênio, monóxido de carbono, oxigênio, nitrogênio, dióxido de carbono e metano). Dessa forma, sabendo-se o número de mols de cada gás individualmente, foi possível calcular o PCS e o PCI do gás combustível produzido. Cada experimento foi realizado em triplicata para cálculo da média aritmética.

No caso dos ensaios realizados no gaseificador laboratorial foi possível determinar a energia total através dos resultados do poder calorífico inferior e volume de gás gerado. A quantidade de gás gerado pode ser calculada usando o aumento da pressão como forma de medida. Conhecendo-se o volume do gaseificador, a temperatura interna e a pressão final, foi possível calcular o volume aproximado de gás produzido pelas amostras assumindo que tanto o ar quanto o gás comportam-se como gases ideais e seguem a Lei do Gás Ideal.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e as correspondentes análises dos ensaios descritos anteriormente serão apresentados a seguir.

### Coleta e Preparo da Biomassa

Na análise da documentação existente no escritório da obra, foi possível levantar a quantidade de madeira utilizada e sua geração de resíduos durante a execução da obra. Na Tabela 2 apresenta a quantidade de madeira adquirida por tipo pela obra estudada.

**Tabela 2: Quantidade adquirida por tipo de madeira**

<b>Amostra</b>	<b>Massa (t)*</b>	<b>Composição percentual (%)</b>
RCC Misto	110	67
RCC Pinus	18	11
RCC Plastificado	24	14
RCC Resinado	12	8
<b>TOTAL</b>	<b>164</b>	<b>100</b>

\*b.u.=base úmida

Verifica-se que o RCC Misto é o grupo de madeira com a maior quantidade adquirida pela obra. Através do controle dos transportes de resíduos de madeira, também, foi possível verificar a quantidade de resíduos de madeira (bioRCC) retirado da obra pela empresa coletora. Observou-se que esta quantidade corresponde a 10,5% (17,23 toneladas) da quantidade adquirida, a redução é justificada pelo fato do grande reaproveitamento do insumo em outras obras ou mesmo por catadores para abastecer os fornos de padarias e pizzaria da cidade.

No canteiro de obra constatou-se que o bioRCC se encontravam em condições impróprias para utilização direta como combustível sólido, em função da desuniformidade dimensional das peças e eventual presença de elementos metálicos (pregos, parafusos) como descrito na literatura.

### Caracterização Energética da Biomassa

A Tabela 3 apresenta os resultados obtidos no ensaio realizado na balança termogravimétrica Shimadzu, modelo DTG-60 das amostras de cada tipo de madeira. A Figura 3 ilustra os resultados dos ensaios termogravimétricos das amostras de RCC Pinus.



Tabela 3: Resultado da análise imediata do RCC

Amostra	Composição (%)			
	Material volátil*	Carbono fixo*	Cinzas (900°C)*	Umidade
RCC Misto	98,59±0,19	0,53±0,11	0,88±0,11	11,35±0,32
RCC Pinus	98,68±0,04	0,50±0,03	0,82±0,06	13,68±0,34
RCC Plastificado	99,42±0,13	0,41±0,07	0,17±0,03	11,88±0,78
RCC Resinado	99,4±0,16	0,34±0,05	0,26±0,07	12,78±0,22
<b>MÉDIA PONDERADA</b>	98,78	0,49	0,72	11,79

\*b.s.=base seca

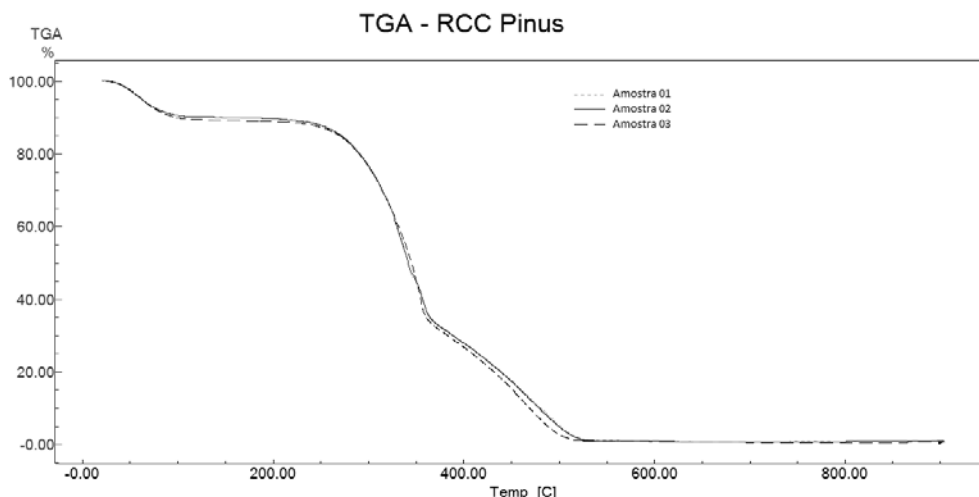


Figura 3: Termograma Múltiplos TGA do RCC Pinus

Na análise detalhada das curvas TGA observa-se em seu primeiro trecho a liberação da água livre até 125 °C, e umidade remanescente e compostos orgânicos voláteis em torno de 250 °C, correspondendo ao teor de umidade médio de 11,79%. Em seguida, uma perda de massa até 600 °C, associada à quantidade de matéria orgânica, a qual corresponde a uma perda média de 98,78%. Finalmente, a perda de massa a 600-900 °C se deve à decomposição do carbono fixo, a qual corresponde a uma perda média de 0,49% da massa total. O resíduo da perda mássica entre 0,17% e 0,88%, corresponde ao material mineral (cinzas).

Na análise imediata, verifica-se que as amostras de bioRCC estudadas possuem elevado teor de matéria volátil (98,78%) e um baixo teor de cinzas (máximo de 0,88% no RCC Misto). Estas características conferem boas condições de inflamabilidade e queima para os coprodutos estudados e favorece a sua utilização como matéria-prima em processos termoquímicos de conversão.

As análises calorimétricas de cada tipo de resíduo podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4: Poder Calorífico Superior e Inferior dos RCC

Amostra	PCS (MJ.kg <sup>-1</sup> )	PCI (MJ.kg <sup>-1</sup> )
RCC Misto	18,205±97	17,988±113
RCC Pinus	17,701±153	17,509±172
RCC Plastificado	17,723±101	17,487±124
RCC Resinado	17,804±84	17,560±88
<b>MÉDIA PONDERADA</b>	18,050	17,831

Com os resultados obtidos pelos diferentes ensaios realizados para cada tipo de RCC, permite evidenciar que o poder calorífico das amostras se manteve constante, e compatível com os valores encontrados em outras biomassas. Esta condição pode ser explicada devido à combinação da quantidade de carbono e do teor de umidade encontradas nas amostras, pois o poder calorífico aumenta com a quantidade de carbono presente na biomassa, mas também é afetado devido à presença de humidade.

Conhecendo-se o poder calorífico inferior e a densidade aparente bioRCC, foi possível calcular a densidade energética para cada amostra estudada. A Figura 4 apresenta os valores de energia disponível para cada metro

cúbico de bioRCC. A densidade energética de madeira de RCC Misto é maior se comparada aos outros bioRCC. Por exemplo, enquanto a queima de 1m<sup>3</sup> de madeira de RCC Pinus disponibiliza 7,2 GJ, a combustão do mesmo volume de RCC Misto libera 2 vezes mais energia (14,4 GJ).

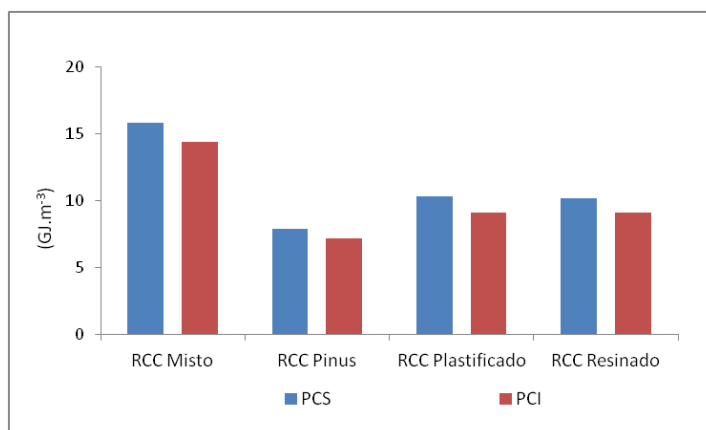


Figura 4: Gráfico da densidade energética dos bioRCC.

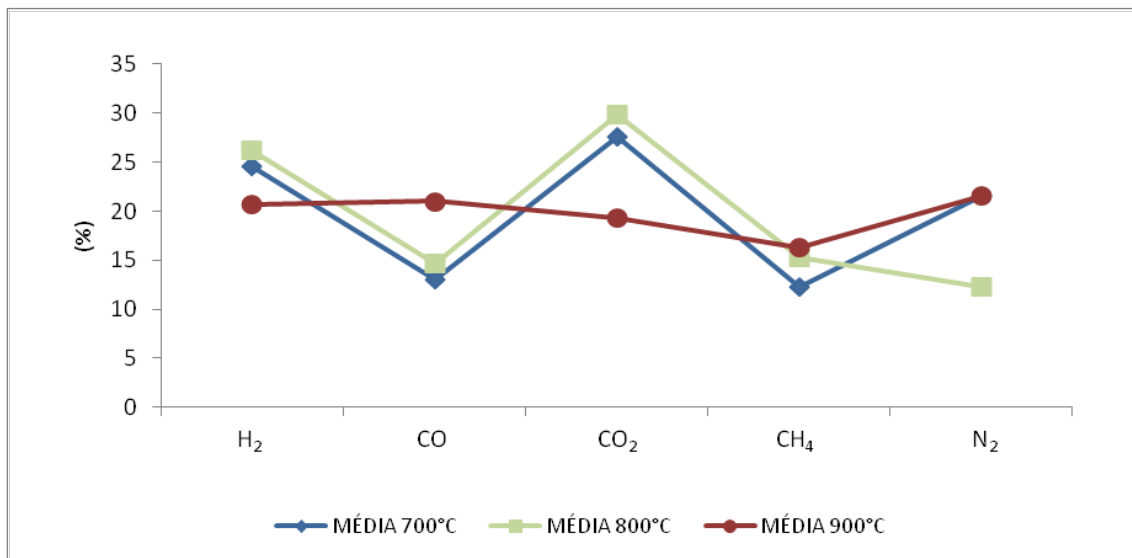
### Conversão termoquímica da Biomassa

A gaseificação em escala laboratorial estudou o efeito da variação da temperatura interna do reator na formação do gás de síntese para cada tipo de bioRCC injetado. A análise por cromatografia gasosa das amostras coletadas nos sacos amostradores forneceu as concentrações molares individuais dos gases hidrogênio, monóxido de carbono, dióxido de carbono, nitrogênio, oxigênio e metano, componentes do gás de síntese. Os resultados médios obtidos da composição dos gases resultantes do gaseificador em escala laboratorial são mostrados na Tabela 5.

Tabela 5: Composição dos gases resultantes do gaseificador de bancada

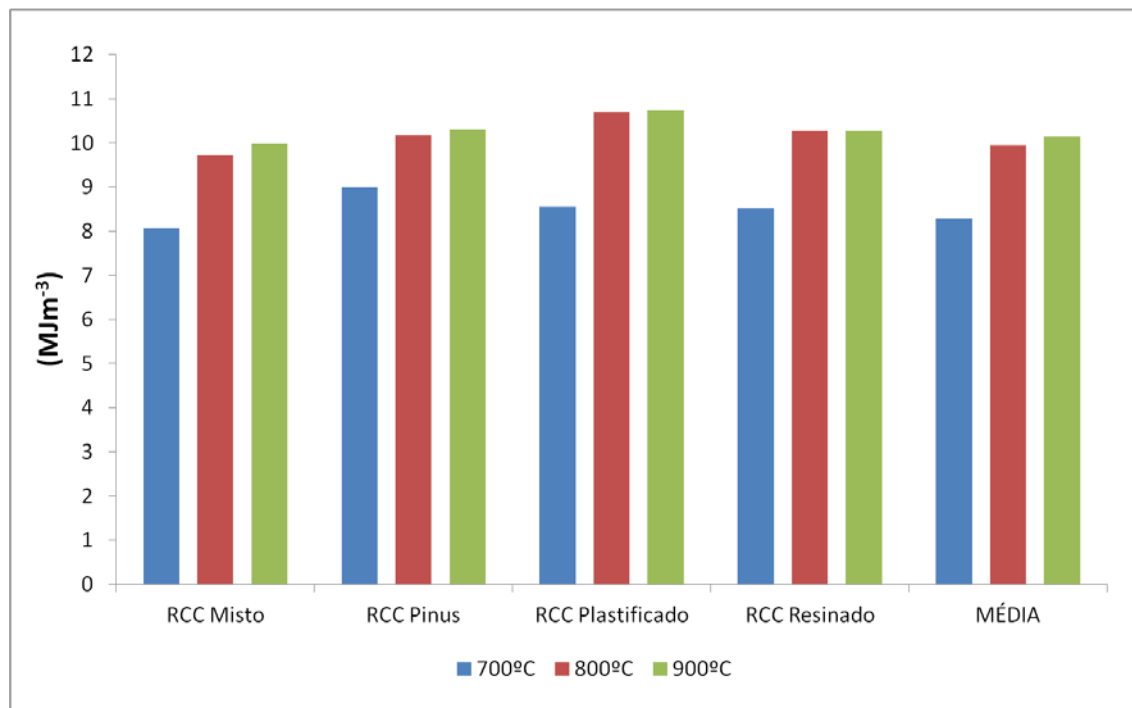
Temperatura = 700°C						
Amostra	Composição (%)					PCI (MJ.Nm <sup>-3</sup> )
	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	
RCC Misto	25,2 ± 0,8	13,1 ± 1,3	27,5 ± 1,2	11,7 ± 0,1	21,8 ± 1,3	8,07 ± 0,15
RCC Pinus	22,5 ± 2,2	14,1 ± 1,0	28,1 ± 0,9	13,9 ± 0,3	20,0 ± 1,0	8,99 ± 0,47
RCC Plastificado	24,1 ± 1,5	11,7 ± 0,2	28,4 ± 0,5	13,3 ± 0,7	21,3 ± 0,3	8,55 ± 0,22
RCC Resinado	22,8 ± 2,0	12,4 ± 0,9	27,2 ± 2,0	13,3 ± 0,9	23,1 ± 1,9	8,53 ± 0,41
MÉDIA PONDERADA	24,6 ± 1,1	13,0 ± 0,9	27,6 ± 0,5	12,3 ± 0,8	21,6 ± 1,1	8,28 ± 0,35
Temperatura = 800°C						
Amostra	Composição (%)					PCI (MJ.Nm <sup>-3</sup> )
	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	
RCC Misto	25,4 ± 2,4	14,9 ± 0,6	31,1 ± 2,0	14,8 ± 0,3	12,3 ± 1,0	9,72 ± 0,43
RCC Pinus	21,8 ± 1,7	15,9 ± 0,3	31,9 ± 2,4	16,8 ± 1,6	12,0 ± 0,8	10,18 ± 0,68
RCC Plastificado	31,5 ± 0,4	13,4 ± 0,5	25,8 ± 2,4	16,1 ± 0,3	11,4 ± 0,9	10,70 ± 0,11
RCC Resinado	30,2 ± 2,3	14,5 ± 1,3	24,1 ± 2,4	15,5 ± 0,3	14,3 ± 0,8	10,28 ± 0,40
MÉDIA PONDERADA	26,2 ± 3,9	14,7 ± 0,9	29,9 ± 3,3	15,3 ± 0,7	12,3 ± 1,1	9,95 ± 0,39
Temperatura = 900°C						
Amostra	Composição (%)					PCI (MJ.Nm <sup>-3</sup> )
	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	
RCC Misto	19,7 ± 1,9	20,4 ± 1,4	18,9 ± 1,0	17,0 ± 0,2	23,5 ± 1,3	9,97 ± 0,21
RCC Pinus	19,1 ± 1,8	21,4 ± 1,3	20,4 ± 1,6	17,0 ± 1,4	21,0 ± 1,8	10,31 ± 0,68
RCC Plastificado	24,8 ± 1,9	23,3 ± 1,7	20,7 ± 1,2	14,4 ± 1,0	14,7 ± 1,3	10,74 ± 0,29
RCC Resinado	24,6 ± 2,1	21,8 ± 1,6	19,0 ± 0,8	13,1 ± 0,6	19,2 ± 1,9	10,28 ± 0,26
MÉDIA PONDERADA	20,7 ± 2,7	21,0 ± 1,1	19,3 ± 0,8	16,3 ± 1,7	21,6 ± 2,2	10,14 ± 0,31

No gráfico da Figura 5, observa-se que nas temperaturas de 700°C e 800°C não ocorre variações nas proporções gasosas do gás produzido, entretanto, na temperatura de 900°C ocorreu a redução da concentração de CO<sub>2</sub> e o correspondente aumento na concentração de CO.

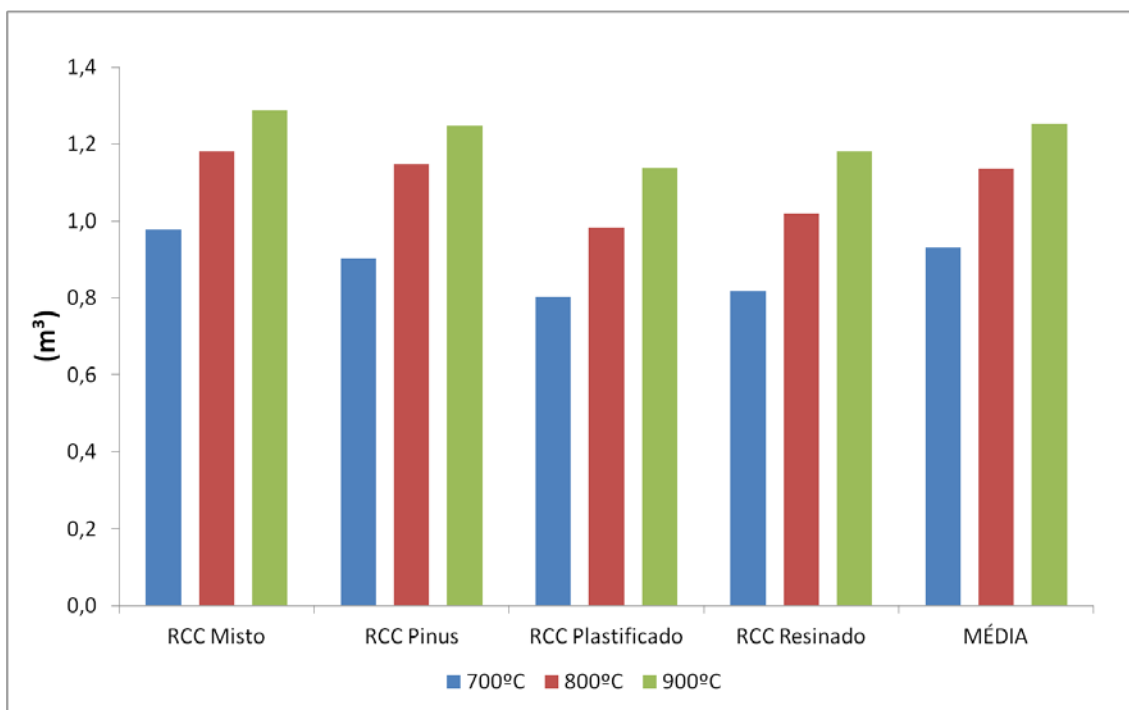


**Figura 5: Composição média do gás produzido (bancada).**

As Figuras 6 e 7 mostram, respectivamente, os gráficos dos valores médios encontrados do poder calorífico inferior e volume de gás produzido no gaseificador de bancada para as diversas temperaturas e amostras de bioRCC estudadas. O resultado do PCI médio obtido a 900°C no gaseificador de bancada (10,1 MJ.m<sup>-3</sup>) corresponde a 30% do poder calorífico do gás natural.

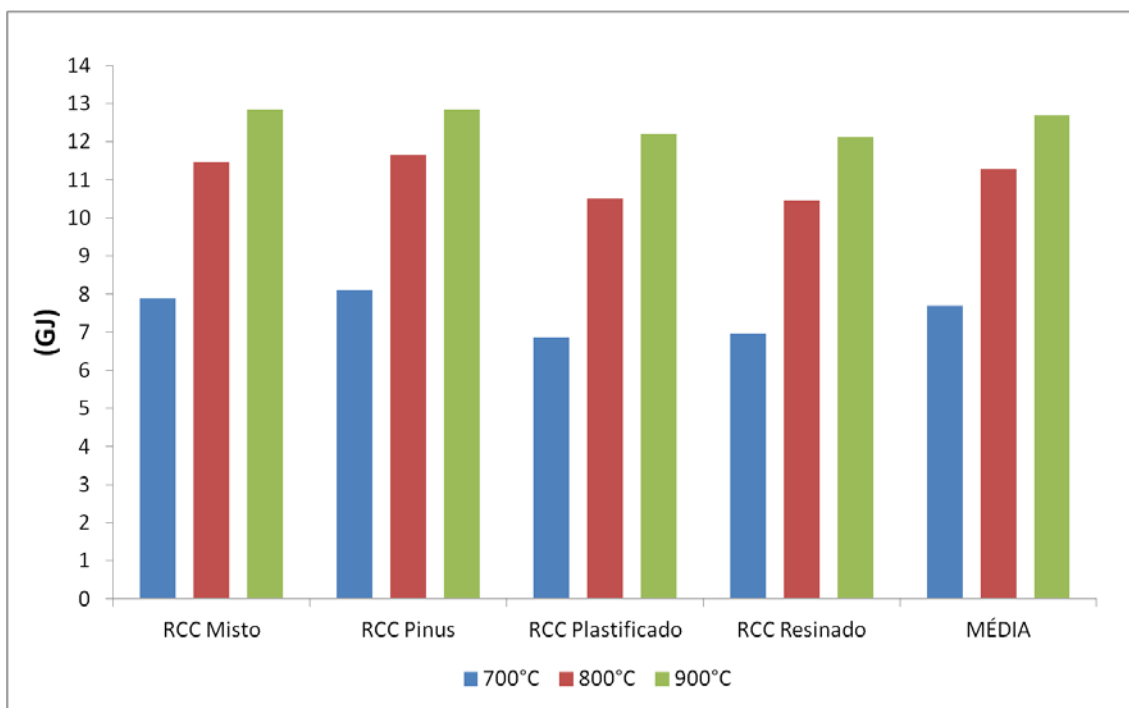


**Figura 6: Poder calorífico inferior vs temperatura**



**Figura 7: Volume produzido vs temperatura**

Conhecendo-se o poder calorífico inferior e o volume de gás produzido, foi possível calcular a energia total disponível em cada situação experimental. A Figura 8 apresenta os valores energia total disponível para cada tonelada de bioRCC gaseificado.



**Figura 8: Energia gerada vs temperatura**

Por meio da análise dos resultados acima, verificou-se que apesar das amostras de madeiras compensadas (RCC Plastificado e RCC Resinado) apresentarem poder calorífico acima das amostras de madeira serrada

(RCC Misto e RCC Pinus), estas últimas produziram um volume de gás maior que as primeiras, e, conseqüentemente, um aumento no aporte energético.

A partir da análise da energia total disponível do gás gerado, observou-se que a gaseificação do bioRCC a 900°C produziu uma energia média de 12,7 MJ.kg<sup>-1</sup>. Neste caso, fazendo o balanço de massa e energia do gaseificador de bancada, relacionando a energia média disponível com o poder calorífico inferior médio do bioRCC (17,8 MJ.kg<sup>-1</sup>), isto correspondeu a uma eficiência de conversão de 71%.

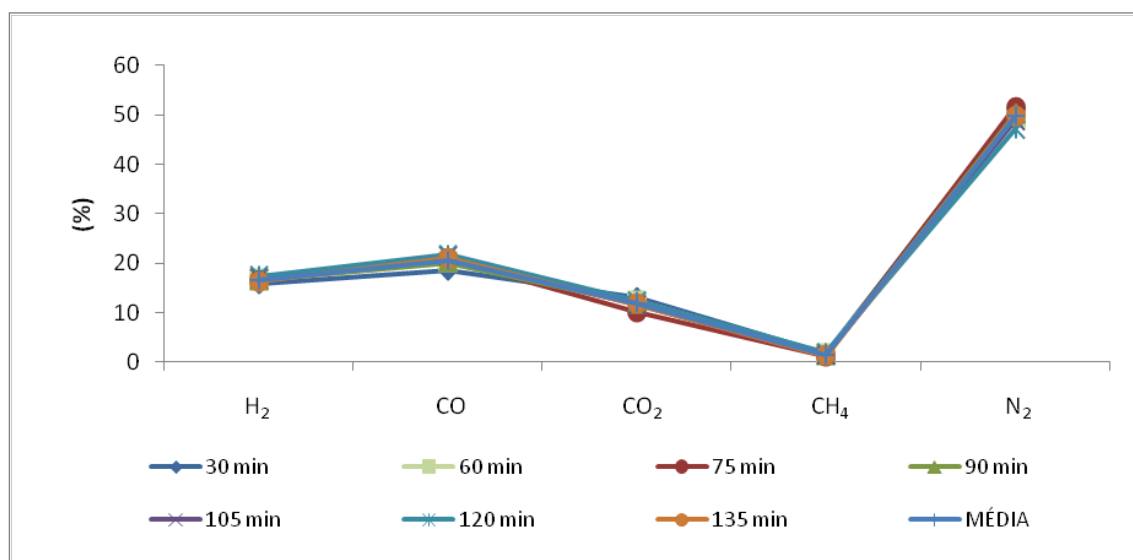
Para se ter uma idéia de grandeza do potencial energético envolvido, no caso de se aproveitar as 200 toneladas de bioRCC produzidas diariamente na Região Metropolitana do Recife (RMR), a energia produzida, experimentalmente, indica um aporte energético de 6.400 MWh por mês ou 76.000 MWh por ano, suficiente para suprir aproximadamente 50.000 casas populares.

Na última fase dos ensaios de gaseificação foi utilizado o gaseificador de leito fixo downdraft TERMOQUIP, para realização de experimentos em escala piloto. Foram realizados ensaios de gaseificação com amostras de bioRCC na proporção de cada tipo adquirido pela obra de referência. A média dos resultados de 07 (sete) amostras do gás combustível produzido está apresentada na Tabela 6.

**Tabela 6: Composição dos gases resultantes no gaseificador downdraft**

Tecnologia	Composição (%)					PCI (MJ.Nm <sup>-3</sup> )
	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	N <sub>2</sub>	
Gaseificador Downdraft	16,6 ± 0,4	20,5 ± 0,8	11,8 ± 0,7	1,4 ± 0,2	49,6 ± 1,1	4,40 ± 0,13

No gráfico da Figura 9, mostra os resultados da análise por cromatografia gasosa das amostras coletadas nos tempos programados, onde não se verifica variações nas proporções gasosas do gás produzido durante todo funcionamento do equipamento. A composição dos gases obtida pelo gaseificador de leito fixo downdraft do POLICOM está coerente com aqueles achados na literatura (Bridgwater et al., 2002).



**Figura 9: Composição média do gás produzido (downdraft).**

Considerando os poderes caloríficos inferiores do metano (CH<sub>4</sub>), monóxido de carbono (CO) e do hidrogênio (H<sub>2</sub>), respectivamente, como 32,08 MJ.Nm<sup>-3</sup>, 11,32 MJ.Nm<sup>-3</sup> e 9,68 MJ.Nm<sup>-3</sup> (PERES, 1997), um normal metro cúbico do gás gerado produz, em média, 4,40 MJ de energia. No gaseificador de leito fixo downdraft, o poder calorífico inferior reduziu para 40% em relação à média dos resultados alcançados no gaseificador de bancada. Diante disto, pode se estimar que a eficiência de conversão termoquímica reduza na mesma proporção. Os resultados dos poderes caloríficos de cada amostra coletada estão apresentados na Figura 10.



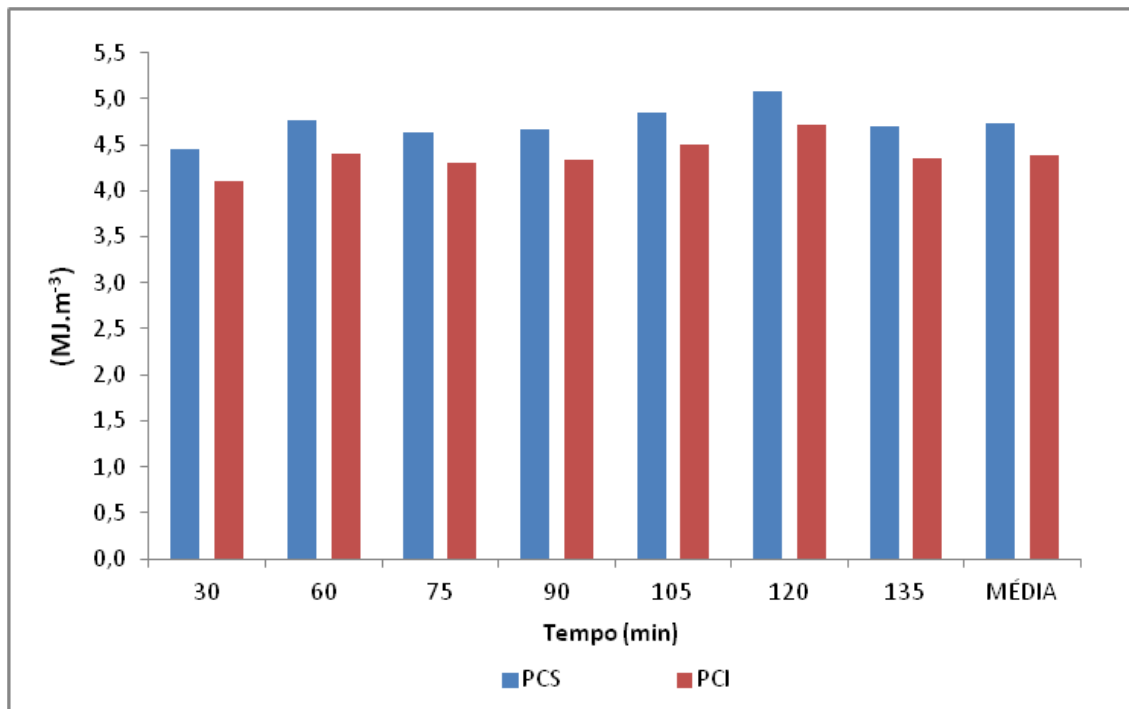


Figura 10: Poder calorífico do gás produzido (gaseificador downdraft)

## CONCLUSÕES

Na análise gravimétrica das madeiras adquiridas pela obra foi verificada que 67% correspondem à madeira mista (RCC Misto), as quais são madeiras serradas (tábuas, sarrafos e barrote), utilizadas na confecção de fôrmas, escoramentos, instalações provisórias, proteções de periferia, entre outros. Estas madeiras são produzidas sem nenhum tratamento químico ou associação com outros produtos químicos, os quais poderiam de alguma forma emitir gases tóxicos durante a gaseificação. Durante a coleta das amostras foi evidenciada a heterogeneidade das peças de madeira (formas e tamanhos irregulares) e, eventualmente, a presença de elementos metálicos, visto que existia o cuidado de retirar todos os pregos na desmontagem das peças.

Observou-se a quantidade de resíduos de madeira retirados da obra pela empresa coletora corresponde a 10,5% da quantidade total de madeira adquirida, devido ao reaproveitamento ou recolhimentos clandestinos. Entretanto, considera-se que todo volume de madeira adquirida pelas obras em algum momento ocorrerá seu descarte definitivo como bioRCC.

Na análise imediata dos RCC foram observados alto conteúdo de material volátil (média de 98,8%) e baixo teor de cinzas (média de 0,7%), fatores considerados importante para otimização do processo de conversão do combustível sólido em gasoso.

Os resultados dos ensaios de calorimetria realizados para cada tipo de bioRCC mostrou que o poder calorífico das amostras se manteve constante ( $17,8 \text{ kJ.kg}^{-1}$  PCI médio), e a densidade energética da madeira de RCC Misto ( $14,4 \text{ GJ.m}^{-3}$ ) é maior se comparada aos outros bioRCC ( $7,2 \text{ GJ.m}^{-3}$  do RCC Pinus).

Durante a etapa de gaseificação das amostras de bioRCC foi possível observar a maior concentração média de CO e CH<sub>4</sub> obtida foi de 21,0% e 16,3%, na temperatura de 900°C. A maior concentração média de H<sub>2</sub> (26,2%) e CO<sub>2</sub> (29,9%) foi observada na temperatura de 800°C, e menor concentração de N<sub>2</sub>, em média 12,3%. Os melhores resultados de poder calorífico dos gases produzidos ocorreram na temperatura do reator de 900°C, utilizando tempo de residência igual a 3 minutos.

O resultado energético médio, em termos de PCI, foi de  $10,1 \text{ MJ.m}^{-3}$  para o gás formado a partir da gaseificação à 900°C do bioRCC. Este valor corresponde a 30% do poder calorífico do gás natural. A maior

quantidade de energia total disponível, obtida pela gaseificação de bioRCC, também ocorreu nesta temperatura, em média  $12,7 \text{ MJ.kg}^{-1}$ . Se convertida esta energia em eletricidade seria suficiente para suprir aproximadamente 50.000 casas populares na RMR, considerando uma geração diária de 200 toneladas de bioRCC.

Com base nos resultados médios da energia total disponível ( $12,7 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ) e do poder calorífico inferior do bioRCC ( $17,8 \text{ MJ.kg}^{-1}$ ) foi possível realizar o balanço de massa e energia do gaseificador de bancada, correspondendo a uma eficiência de conversão de 71%.

Nos ensaios realizados no gaseificador em escala piloto (unidade de gaseificação *downdraft* de leito fixo), o gás gerado produziu, em média,  $4,40 \text{ MJ.m}^{-3}$  de PCI, reduzindo para 40% em relação à média dos resultados do PCI médio obtido a  $900^\circ\text{C}$  no gaseificador de bancada. Estimou-se que a eficiência de conversão termoquímica, também, reduza na mesma proporção.

Os resultados experimentais demonstram a boa qualidade do bioRCC para geração de energia elétrica do combustível gasoso produzido pelo bioRCC, utilizando a gaseificação como processo de conversão.

Esta pesquisa contribuiu para determinação de parâmetros de avaliação do potencial energético dos resíduos gerados pelas atividades da construção civil na cidade do Recife, podendo ser estendida para outras cidades no Brasil, assim como para subsidiar os processos de reciclagem e consequentemente a redução dos impactos ambientais gerados pela disposição inadequada de tais resíduos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standards Methods for Proximate Analysis of Coal and Coke, in Annual Book of ASTM Standards, section D3172-73 a D3175-73, 1983.
- 2 AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). Standards Methods for Gross Calorific Value of Solid Fuel by the Adiabatic Bomb Calorimeter, in Annual Book of ASTM Standards, section D2015-77, 1983.
- 3 AUSTRÁLIA. National Association of Forest Industries. Report 4 – Converting wood waste into renewable energy: a summary of biomass energy conversion technologies. Canberra. Austrália, 2005.
- 4 BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica do Brasil. 2. ed. Brasília: ANEEL, 2005. 243 p.
- 5 BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Atlas de energia elétrica do Brasil. 3. ed. Brasília: Aneel, 2008. 236 p.
- 6 BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço energético nacional 2013: Ano Base 2012. Rio de Janeiro: EPE, 2013. 288p.
- 7 BRIDGEWATER, A.V. Renewable fuels and chemicals by thermal processing of biomass. Chemical Engineering and Applied Chemistry Department, Bio-Energy Research Group, Aston University, Birmingham B4 7ET, UK: Chemical Engineering Journal, 2003. v.91, p. 87-102.
- 8 BRIDGWATER, A.V., TOFT, A.J., BRAMMER, J.G. A technoeconomic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion, *Sustain. Renew Energy. rev.* 6, n. 3, p. 181–248, 2002.
- 9 CARNEIRO, F. P. Diagnóstico e ações da atual situação dos resíduos de construção e demolição na cidade do Recife. 2005. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Centro Tecnológico de Engenharia Urbana, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- 10 CORTEZ, L. A. B., LORA, E. E. S., GÓMEZ, E. O. Biomassa para energia. Campinas: Unicamp, 2008. 736p.
- 11 FALCÃO, N. C. B. Diagnóstico da situação atual dos resíduos da construção civil no município de Olinda. 127 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de Pernambuco, Recife, 2011.
- 12 GUSMÃO, A. D. Manual de gestão dos resíduos da construção civil. Camaragibe: CCS Grafica Editora, 2008. 140p.
- 13 PERES, S. Catalytic indirect heated gasification of sugarcane bagasse. Ph.D. Thesis. University of Florida, Gainesville-USA, 1997.
- 14 PINTO, T. P. Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. 1999. 189 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

- 15 QUIRINO, W. F. Utilização energética de resíduos vegetais. Laboratório de produtos florestais LPF/IBAMA. Módulo do Curso “Capacitação de agentes multiplicadores em valorização da madeira e dos resíduos vegetais”, 2000.
- 16 REED, T. B; DAS, A. Handbook of biomass downdraft gasifier engine systems. Press 3rd. edition Golden, Colorado, USA, 1988.
- 17 RENDEIRO, G., NOGUEIRA, M. F. M., BRASIL, A. C. M., CRUZ, D. O. A., GUERRA, D. R. S., MACÊDO, E. N., ICHIHARA, J. A. Combustão e gasificação de biomassa sólida. Brasília: Ministério de Minas e Energia, 2008. p. 192.
- 18 SALES, C. V. B.; ANDRADE, R. V.; LORA, E. E. S. Geração de eletricidade a partir da gaseificação de biomassa. In: Encontro de Energia no Meio Rural, 6., 2006, Campinas.