

PABLO GOMES PASSAGLIA

**Aproveitamento energético de resíduos de poda no Campus
Aeroporto da Universidade de Uberaba**

**São Paulo
2021**

PABLO GOMES PASSAGLIA

**Aproveitamento energético de resíduos de poda no Campus
Aeroporto da Universidade de Uberaba**

Monografia apresentada ao Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.
Orientadora: Prof. Msc. Mônica Anater.

São Paulo

2021

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família e amigos, pela paciência e compreensão pela ausência dos últimos dois anos.

Um agradecimento especial faço a Sociedade Educacional Uberabense, mantenedora da Universidade de Uberaba, em especial às pessoas do Professor Lucio A. Scalon - Superintendente Administrativo e Professor Marcelo Palmerio - Reitor, pelo inestimável apoio para realização deste curso de especialização.

A professora Mônica J. N. Anater, minha eterna gratidão, pela ajuda e orientação, sem os quais não teria sido possível concluir este trabalho.

Aos colegas de curso, agradeço o companheirismo e amizade durante toda jornada.

Agradeço a todos aqueles que de forma direta ou indireta contribuíram para conclusão deste tão prestigiado curso de pós-graduação.

RESUMO

Atualmente, 2,01 bilhões de toneladas de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) são geradas anualmente pelo mundo. Dentre estes, estão os resíduos de poda urbana, que possuem alto potencial de aproveitamento. Com o intuito de estabelecer diretrizes para a gestão integrada dos resíduos sólidos no Brasil, foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos, pela Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, a qual determina no seu inciso VII do parágrafo 3º que a destinação final ambientalmente adequada de resíduos inclui, dentre outros, o aproveitamento energético do material. Apesar disso, a grande maioria dos resíduos de poda urbana produzidos no país ainda são dispostos em aterros ou lixões, descartando o potencial energético dessa biomassa. Dessa forma, este trabalho analisou alternativas de aproveitamento energético dos resíduos de biomassa vegetal gerados pela manutenção do espaço do Campus da Universidade de Uberaba, Minas Gerais. Após o levantamento dos procedimentos de manejo, destinação atual, e da quantificação dos resíduos oriundos de podas, roçagem e limpeza das áreas vegetadas, foi avaliado o potencial energético passível de aproveitamento. Foram consideradas quatro formas de tratamento da biomassa: densificação, biodigestão, gaseificação e pirólise. Os resultados demonstraram que todas as rotas analisadas são passíveis de aplicação para o aproveitamento energético da biomassa gerada. A economia com a energia elétrica gerada, foi avaliada em no máximo 2,1%, 1,1%, 3,8% e 3,2% respectivamente para a densificação, biodigestão, gaseificação e pirólise. Conclui-se que apesar do volume significativo de resíduos de poda gerados no local de estudo, a economia de energia gerada não justificaria o investimento na implantação de sistemas de conversão desses resíduos.

Palavras-chave: Potencial energético. Resíduos urbanos. Biomassa florestal residual. Gestão de resíduos.

ABSTRACT

Currently, 2.01 billion tons of municipal solid waste (MSW) are generated annually around the world. Among these, are the urban pruning wastes, which have high potential for utilization. In order to establish guidelines for the integrated management of solid waste in Brazil, the National Policy for Solid Waste was established by Law No. 12.305 of August 2, 2010, which determines in item VII of paragraph 3 that the final disposal environmentally appropriate waste includes, among others, the energy recovery of the material. Despite this, most of the urban pruning waste produced in the country are still disposed of in landfills or dumps, discarding the energy potential of this biomass. Thus, this work analyzed alternatives for the energy use of vegetable biomass waste generated by the maintenance of the campus space of the University of Uberaba, Minas Gerais. After the survey of management procedures, current destination, and quantification of waste from pruning, cutting and cleaning of vegetated areas, the energy potential of use was evaluated. Four forms of biomass treatment were considered: densification, biodigestion, gasification and pyrolysis. The results showed that all the analyzed routes are feasible for the energy use of the generated biomass. The economy with the generated electric energy was evaluated at a maximum of 2.1%, 1.1%, 3.8% and 3.2% respectively for densification, biodigestion, gasification and pyrolysis. It is concluded that despite the significant volume of pruning waste generated at the study site, the energy savings generated would not justify the investment in the implementation of conversion systems for these wastes.

Keywords: Energy potential. Urban waste. Residual forest biomass. Waste management.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Processo de conversão energética da biomassa..... | 18 |
| Figura 2 - Forno micro-ondas ONDATEC®: estrutura do forno (A); cavidade sextavada com cesto giratório (B) | 26 |
| Figura 3 - Forno de microondas para produção de carvão vegetal - UPE250 ONDATEC® | 26 |
| Figura 4 - Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese..... | 28 |
| Figura 5 - Biodigestor modelo indiano..... | 29 |
| Figura 6 - Biodigestor modelo Chinês. | 30 |
| Figura 7 - Biodigestor modelo da Marinha ou Canadense. | 30 |
| Figura 8 - Biodigestor a batelada. | 31 |
| Figura 9 - Biodigestor do tipo UASB-IC..... | 32 |
| Figura 10 - Campus Aeroporto da Universidade de Uberaba..... | 33 |
| Figura 11 - Imagem aérea Campus Aeroporto. | 34 |
| Figura 12- Principais espécies vegetais no Campus Aeroporto da Universidade de Uberaba..... | 41 |
| Figura 13 - Flores e folhas de Ipê Roxo (<i>Handroanthus impetiginosus</i>)..... | 42 |
| Figura 14 - Folhas e flores de Ipê Amarelo (<i>Handroanthus albus</i>)..... | 42 |
| Figura 15 - Poda de árvores..... | 43 |
| Figura 16 -Supressão de árvore - Pau Rei (<i>Pterygota brasiliensis</i>)..... | 43 |
| Figura 17- Ocasionalidade ocorrida por fortes chuvas – Sete copas (<i>Terminalia catappa</i> L). | 44 |
| Figura 18 - Resíduos de poda coletado em bag de 1m ³ onde predomina-se folhas. 46 | |
| Figura 19 - Resíduos de poda coletado em bag de 1m ³ onde predomina-se flores. 46 | |
| Figura 20 - Resíduos de poda coletado em bag de 1m ³ onde predomina-se gramíneas. | 47 |
| Figura 21- A esquerda, área de compostagem com material lançado; a direita valeta preparada para receber material. | 48 |
| Figura 22 - Local atual de destinação dos resíduos de poda | 48 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Versões da tecnologia de pirólise (Bridgwater e Bridge, 1991)..... | 23 |
| Tabela 2 - Sumário da avaliação econômica das tecnologias de liquefação termoquímica da biomassa* (Wilhelm et al., 1981) | 24 |
| Tabela 3 - Capacidade de produção da UPEC 250 em função da madeira de Pinus (Pinus elliottii Engelm., Pinaceae) | 27 |
| Tabela 4 - Determinação de pesos unitários dos diversos tipos de resíduos..... | 44 |
| Tabela 5 - Determinação dos volumes e pesos totais..... | 45 |
| Tabela 6 - Coeficientes de Equivalência médios para os combustíveis sólidos | 50 |
| Tabela 7 - Análise do potencial energético dos resíduos de poda por tecnologia de conversão..... | 55 |
| Tabela 8 - Custo das tecnologias para conversão de biomassa em energia elétrica | 56 |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 9 |
| 2. OBJETIVO GERAL | 11 |
| 2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS | 11 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 12 |
| 3.1 PROCESSOS FÍSICOS | 19 |
| 3.2 PROCESSOS TERMOQUÍMICOS | 20 |
| 3.3 PROCESSOS BIOLÓGICOS | 27 |
| 4. ESTUDO DE CASO | 32 |
| 4.1. LOCAL DE ESTUDO | 32 |
| 4.2 QUANTIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS | 34 |
| 4.3. POTENCIAL ENERGÉTICO A PARTIR DE DIVERSAS TECNOLOGIAS ... | 35 |
| 4.3.1 Pellets/ Briquetes | 35 |
| 4.4.2 Biodigestão | 36 |
| 4.4.3 Gaseificação..... | 38 |
| 4.4.4 Pirólise..... | 39 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 41 |
| 5.1 QUANTIFICAÇÃO DE RESÍDUOS | 41 |
| 5.2 DESTINAÇÃO..... | 47 |
| 5.3 TECNOLOGIAS APLICÁVEIS AO ESTUDO DE CASO – CAMPUS AEROPORTO – UNIUBE..... | 49 |
| 5.3.2 Gaseificação..... | 51 |
| 5.3.3 Pirólise..... | 53 |
| 5.3.4 Biodigestão anaeróbia | 54 |
| 5.3.5 Compilação dos resultados | 55 |
| 6. CONCLUSÕES | 57 |
| 7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS | 59 |
| REFERÊNCIAS | 60 |
| APÊNDICE A – QUESTIONÁRIOS APLICADOS PARA AVALIAÇÃO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS. | 64 |
| ANEXO A – CONTA DE ENERGIA | 68 |

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a crescente crise econômica e social, agravada pela pandemia provocada pelo SARS COVID 19, sofreu acréscimo de mais um indicador negativo, a crise hídrica ocasionada pela falta de chuvas nas principais bacias hidrográficas das regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste do país. Especialistas apontam que há alta probabilidade de racionamento de energia nos próximos anos, ou até mesmo “apagões” como os ocorridos no ano de 2001 (JANONE; BARRETO, 2021).

O setor energético brasileiro passou por reformulações e avanços significativos nos últimos anos, no entanto a dependência de hidrelétricas e de termoelétricas principalmente derivadas de combustíveis fósseis tem levado a uma crescente busca por alternativas energéticas mais eficientes e provenientes de fontes renováveis. Segundo EPE (2021) a capacidade instalada da matriz elétrica brasileira no ano de 2020 era composta por 62,5% de fontes hidrelétricas, 15,9% fontes não renováveis, sobretudo fóssil, 9,8% de fonte eólica, 8,8% provenientes de biomassa, 1,9% de fonte solar e 1,1% proveniente de energia nuclear.

A análise da participação de cada fonte deixa claro a dependência da matriz energética brasileira das fontes hidrelétrica e fósseis. Mesmo assim, é observado que as energias renováveis em especial a energia eólica e a biomassa possuem participação importante na matriz energética. No geral a matriz energética brasileira é 83% composta por energias renováveis, é sem dúvida uma vantagem econômica/ambiental a ser explorada.

No entanto, a geração de energia a partir da biomassa, poderia ter resultados mais expressivos se houvesse um melhor aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU). Estima-se que, a depender da tecnologia aplicada e do tipo de resíduos, já descontado o consumo próprio, o potencial de geração de energia a partir de resíduos de biomassa pode chegar a 0,2 MWh por tonelada de resíduos, no caso de um ciclo a vapor (NASCIMENTO et al., 2019) .

Tecnologias como a biodigestão, pirólise, densificação e gaseificação podem ser aplicadas para aproveitamento energético de forma distribuída, contribuindo significativamente para o equilíbrio entre oferta e demanda de energia, diminuindo a dependência das hidroelétricas e reduzindo a necessidade de investimentos em linhas de transmissão de grandes distâncias (TOLMASQUIM, 2016).

Dentre os resíduos sólidos urbanos produzidos, os resíduos de poda e manutenção das áreas vegetadas de espaços públicos urbanos, tem se apresentado particularmente de difícil gestão. Tais resíduos são gerados tanto pelas concessionárias de energia na manutenção das redes elétricas, quanto pelos municípios para conservação e segurança do espaço público. A grande questão que se coloca, é qual a destinação destes resíduos? Qual seu volume? O atual manejo cumpre as diretrizes do Plano Nacional de Resíduos Sólidos? Há grandes geradores privados? É possível aproveitar estes resíduos de forma mais sustentável e racional?

Neste contexto, este trabalho tem por objetivo avaliar situação singular de uma Instituição de Ensino Superior (IES), especificamente no que diz respeito a possibilidade de aproveitamento energético de resíduos de poda e de manutenção da área vegetada de seu principal campus.

A situação vivenciada no cotidiano do trabalho nesta instituição, somado aos conhecimentos adquiridos durante o curso de especialização em Energias renováveis, Geração distribuída e Eficiência energética, da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, levou a indagação de como seria possível aproveitar de forma energética os resíduos de poda deste Campus Universitário.

Através de pesquisa bibliográfica, diversas rotas de conversão desta biomassa em energia foram avaliadas, conjuntamente, avaliou-se a possibilidade de redução da logística de descarte atualmente empregada, possibilitando desta maneira a análise quantitativa do resíduo gerado e seu potencial energético.

2. OBJETIVO GERAL

Avaliar o potencial de aproveitamento e o potencial energético dos resíduos de poda gerados no Campus Aeroporto da Universidade de Uberaba (UNIUBE), Uberaba, Minas Gerais.

2.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Quantificação e caracterização dos resíduos de poda gerados nas dependências da Universidade de Uberaba;
- Avaliação das possíveis rotas de conversão do resíduo gerado e o seu potencial energético;
- Determinação da economia financeira gerada pelo aproveitamento energético dos resíduos de poda em comparação ao custo anual de energia elétrica do Campus Universitário.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A biomassa, sobretudo na forma de lenha, foi durante muitos séculos a fonte de energia mais explorada em todo mundo. Este cenário começou a mudar somente no século XIX, a partir da revolução industrial, onde a demanda por energia cresceu exponencialmente (NOGUEIRA; LORA, 2003). Já no século XX, a demanda por energia, sobretudo elétrica, necessária para manter o ritmo de crescimento urbano, levou a busca por outras fontes de energia, principalmente baseadas em combustíveis fósseis (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2009).

No entanto no final do século XX, início de XXI, as questões ambientais e os conceitos de sustentabilidade, somado as incertezas quanto a disponibilidade de combustíveis fósseis e seus custos, trouxeram novamente à tona a necessidade de extrair energia de fontes renováveis em quantidade suficiente para suprimento da demanda (COELHO et al., 2020). Avaliando este cenário, Johansson et al. (1993) estimam que a biomassa produzida de maneira sustentável e com modernas tecnologias de transformação poderiam fornecer aproximadamente 17% da eletricidade e 38% do consumo direto de combustíveis no mundo em 2050.

O relatório *What a Waste 2.0* (2018) do Banco Mundial, aponta que aproximadamente 2,01 bilhões de toneladas de RSU são geradas anualmente pelo mundo. Espera-se que em 2050 esse número chegue a 3,40 bilhões de toneladas, um aumento de quase 70% em relação ao ano de 2018 (KAZA et al., 2018).

A busca por redução de volume de resíduos sólidos gerados, seu aproveitamento energético ou conversão em matéria orgânica adequada para a adubação de lavouras, tem levado ao desenvolvimento de inúmeras tecnologias (SILVA, 2016). Dentre os diversos sistemas para tratamento de resíduos sólidos, a compostagem é uma das técnicas mais antigas (CORTEZ et al., 2008). No entanto, com o crescimento exponencial das populações urbanas e conseqüentemente da geração de resíduos sólidos, a técnica de compostagem em sua forma natural tem se demonstrado pouco eficiente, pois demanda, em geral, períodos longos de tratamento, ocupa grandes áreas, gera odores indesejáveis entre outros problemas (CORTEZ et al., 1999). Neste cenário, novas técnicas vêm sendo avaliadas para acelerar o processo de compostagem, buscando mitigar vários outros problemas ocasionados pelo método tradicional. Um exemplo é o estudo de Kumar et al. (2018) que aponta a utilização de larvas de *black soldier fly* (BSF) como uma alternativa

interessante, pois além de acelerar o processo de biodegradação da matéria orgânica a BSF pode transformar os resíduos biodegradáveis em biocombustíveis e subprodutos a um custo mínimo.

Em países onde não há uma matriz energética tão diversificada e onde a dependência de combustíveis fósseis se torna uma das poucas alternativas disponíveis, o olhar mais atento as tecnologias que aproveitam resíduos agrícolas pode ser uma alternativa economicamente viável e ambientalmente adequada.

Um estudo recente, realizado na Grécia, avaliou a digestão anaeróbica para produção de energia a partir de resíduos de biomassa agrícola. De acordo com o estudo de Moustakas, Parmaxidou e Vakalis (2020), realizado na região da Tessalia, a produção de biomassa agrícola primária em base anual foi estimada em 707.164 toneladas. Estima-se que o processo de digestão anaeróbia proposto, aproveitando as plantas de biodigestão existentes, e considerando toda a quantidade de biomassa, a produção de energia anual poderá atingir 619 GWh e poderá gerar até 895 GWh de energia térmica, isto poderia elevar a contribuição desta fonte energética dos atuais 2,34% para 4,14% de participação na matriz energética da região de estudo.

Na China, país que teve nas últimas décadas crescimento exponencial da sua população urbana necessidade de desenvolvimento de projetos urbanísticos que pudessem absorver este fluxo, estudo aponta que o potencial de produção de biocombustíveis, a partir da biomassa residual dos jardins das residências no país, pode chegar a 260 petajoules (PJ), respondendo por 20,7% do consumo de eletricidade residencial urbano da China, ou 12,6% da demanda de gasolina de transporte da China em 2008. Essa técnica poderia contribuir para cidades de baixo carbono. No entanto, ainda existem muitas dificuldades como por exemplo quantificar com precisão a biomassa de resíduos de jardim disponível e questões técnicas e financeiras com a exploração de biomassa de resíduos de jardim para a produção de energia (SHI et al., 2013).

Os recursos dendroenergéticos, ou seja, aqueles relacionados a produção florestal de forma direta ou indireta é, a milhares de anos, umas das fontes mais importantes de recursos energéticos disponíveis no planeta. Dentre estes recursos podemos destacar as florestas nativas, que, se trabalhadas de forma sustentável, poderiam gerar 2,71 tep/ha.ano (NOGUEIRA; LORA, 2003). Outro recurso importante são os cultivos energéticos como silvicultura, onde estima-se que para as florestas atualmente plantadas o potencial energético é de aproximadamente 3,25 tep/ha. ano.

As culturas anuais como a da cana-de-açúcar, o milho, mandioca e outras também têm comprovado sua alta eficiência energética, tanto na produção de combustíveis, como também no aproveitamento energético de seus resíduos (NOGUEIRA; LORA, 2003).

No Brasil, o aproveitamento energético de resíduos vem sendo desenvolvido a algumas décadas, sendo o setor sucroalcooleiro um dos mais desenvolvidos no aproveitamento da biomassa residual da produção de açúcar e álcool (COELHO et al., 2020). No entanto, o aproveitamento energético de outros resíduos ainda é pouco avaliado e raros são os dados acerca do potencial energético dos resíduos de poda urbana (SILVA, 2016). Ferreira et al. (2018) avaliam que a produção anual de resíduos de varredura e podas pode chegar 20.887.745,50 t/ano. Caso aproveitados em biodigestores, esses resíduos poderiam gerar 3.655.355.462,50 Nm³/ano de biogás o que poderia produzir 5.227,16 GWh/ano.

O aproveitamento energético da biomassa orgânica proveniente dos resíduos de poda, ainda é bastante incipiente no país. Conhecer a cadeia logística deste recurso é um grande desafio. Outro desafio é a mensuração de quantitativos de geração deste resíduo, bem como suas propriedades e potencial energético, sobre tudo por fatores como diferentes espécies vegetais associadas ao processo e seus diferentes graus de umidade, como apontado por (MACCARINI; BESSA; ERRERA, 2020).

A busca pelo aproveitamento energético, em especial de poda e limpezas de áreas vegetadas urbanas, vem se demonstrando tema de interesse em pesquisas em diversos países do mundo (SOUZA; GUIMARÃES; VELASCO, 2020).

As diversas rotas de conversão de resíduos sólidos em energia, seja térmica, elétrica ou a combinação das duas em sistemas de cogeração, tem se demonstrado alternativa viável para mitigação de problemas ambientais, de gestão de resíduos e na diminuição do uso de combustíveis fósseis (PETRICOSKI, 2017).

A incineração pode ser uma alternativa para diminuição do volume de resíduos sólidos e seu melhor aproveitamento energético. No entanto, como avaliado por Cardozo, Mannarino e Ferreira (2021), a legislação Brasileira ainda não definiu parâmetros para avaliação do potencial de contaminação ambiental destes empreendimentos, ao contrário da União Europeia, que está em estágio legislativo mais avançado. Segundo a Empresa de Pesquisa Energética(EPE), o Brasil tem um potencial para gerar até 5,4% da demanda nacional por meio de usinas de tratamento

térmico de RSU. Atualmente, há 106 unidades gerando 236.520 GWh/ano e uma potência instalada total de 3.176 MW. Há também o potencial de gerar 1,5% da demanda nacional por meio da biodigestão anaeróbica acelerada¹, com a capacidade instalada total de 868MW, gerando 6.701 GWh/ano. No total, estima-se que os RSU podem gerar até 7% da demanda nacional de energia (MME, 2014).

Do ponto de vista de potência energética, a ABiogás estima que até 2030 a produção de biogás poderá atingir 30 milhões de m³/dia, o que equivale a aproximadamente 2,6 GW de potência instalada (ABIOGAS, 2020), no entanto se todo o resíduo gerado tivesse aproveitamento energético este valor seria praticamente o dobro. Este fato pode ser comprovado em estudos como os de Lino e Ismail (2018), realizado na cidade de Campinas, que demonstram que o RSU, que hoje é tido como um problema socioambiental grave, poderia se transformar em um modelo econômico, ambiental e energético sustentável, trazendo benefícios até então não mensurados.

Na última década, houve um crescimento exponencial de plantas de produção de biogás no Brasil, passando de 39 plantas em 2010 para 638 plantas em 2020 (CIBIOGAS, 2020). No entanto estudos como os de Nascimento et al. (2019) apontam que no Brasil são explorados somente de 7 a 20% do biogás produzido nos aterros de resíduos para fins energéticos. Se esta realidade se confirmar para outras áreas de geração de biogás, observaremos um imenso potencial energético sendo negligenciado, ao mesmo tempo que poderíamos evitar uma quantidade significativa de emissão de gases de efeito estufa (GEE).

No Brasil, a Política nacional de Resíduos Sólidos, instituída pela Lei nº 12.305 de 2010, no artigo 3º, define resíduo sólido como:

“ ... material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).”

Este mesmo artigo traz outras definições importantes para compreensão da lei, dentre eles um dos mais importantes é o conceito de rejeito:

¹ A tecnologia de digestão anaeróbica acelerada requer o aproveitamento apenas do lixo orgânico, que deve ser separado dos demais componentes e processado.

“... resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010).”

Como pode ser observado pelas próprias definições da legislação vigente, teríamos que esgotar todas as possibilidades de aproveitamento dos resíduos sólidos antes que sejam considerados efetivamente rejeitos e desta forma seguir para destinação final. Dentre as possibilidades de aproveitamento, inclui-se o aproveitamento energético da biomassa.

No Brasil, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), as cidades brasileiras geraram em 2018 cerca de 79 milhões de toneladas de RSU, sendo que a coleta chegou a 92% desse total, equivalentes a pouco mais de 72 milhões de toneladas, dos quais apenas 43,3 milhões de toneladas (59,5% do coletado) foi disposto em aterros sanitários, o restante (40,5%) teve destinação incorreta, evidenciando um problema ambiental grave (ABRELPE, 2020).

No Brasil, até o ano de 2016, foram registrados 30 projetos com iniciativas de aproveitamento energético dos gases gerados nos aterros de resíduos sólidos, onde somados tem potencial de gerar 286,04 MW de energia elétrica. Estes projetos estão localizados principalmente na região sudeste (20 projetos) e são responsáveis por 72% do total do potencial estimado (206,2 MW). Dentre os projetos registrados para geração de energia elétrica somente sete foram implementados, os quais juntos geram 56,1 MW (NASCIMENTO et al., 2019).

O novo Marco Legal do Saneamento, aprovado em 2020, determinou no 12º parágrafo do artigo 4º que Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA):

“... contribuirá para a articulação entre o Plano Nacional de Saneamento Básico, o Plano Nacional de Resíduos Sólidos e o Plano Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 2020)”.

Desta maneira, a expectativa é que haja uma coordenação mais efetiva para integrar as ações previstas pela Política Nacional de Resíduos Sólidos, em especial o disposto no inciso VII do parágrafo 3º, onde define a destinação final ambientalmente adequada como:

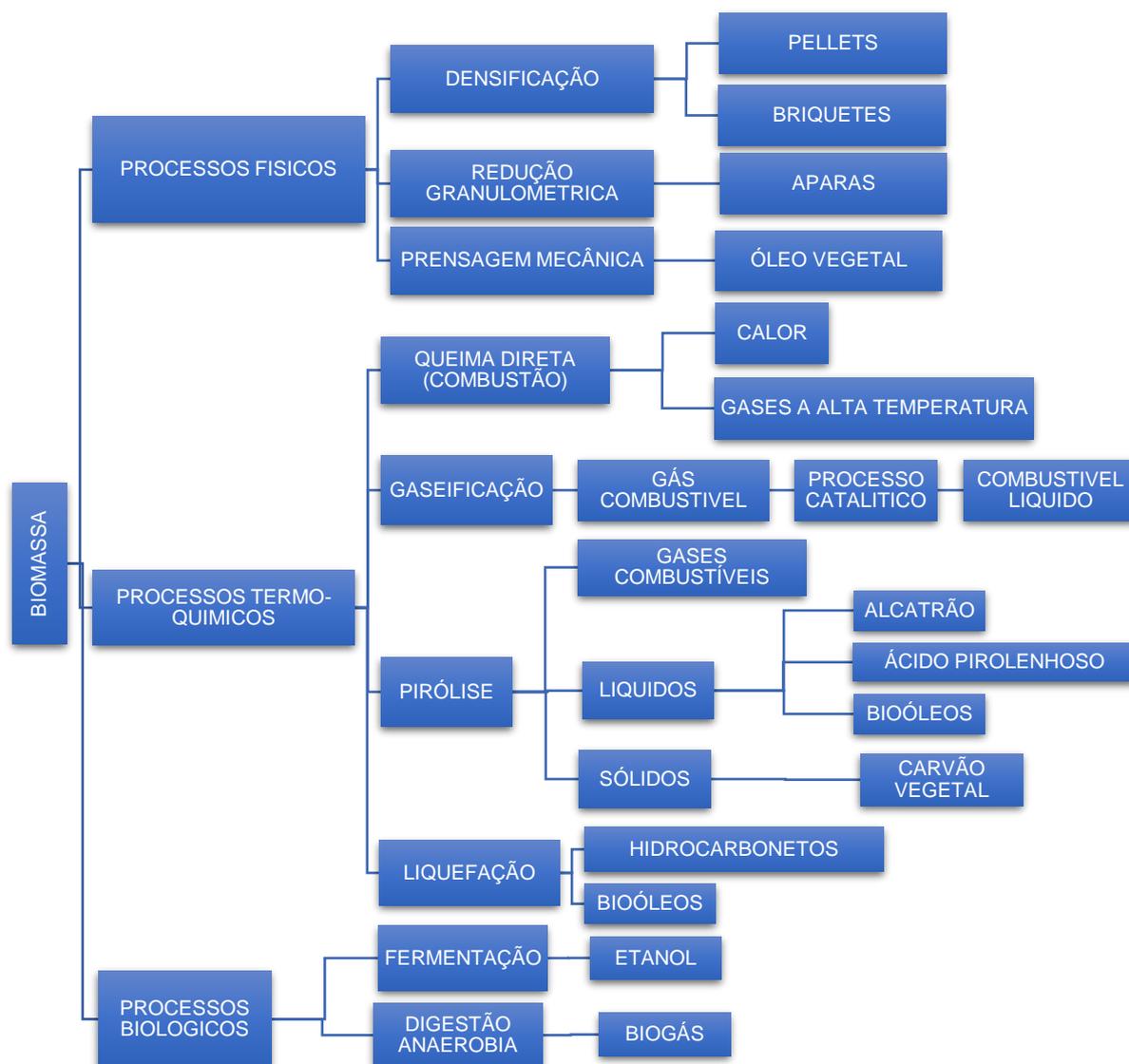
“...destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos (BRASIL, 2010).”

Com estes marcos legais espera-se que haja um maior desenvolvimento do setor de aproveitamento energético de resíduos sólidos, promovendo o desenvolvimento econômico, ambiental e social, além de possibilitar que esta fonte renovável de energia possa ter uma maior participação na matriz energética brasileira.

Por longo tempo, a queima direta (combustão) foi a única forma de aproveitamento energético tanto da lenha quanto dos resíduos florestais de forma geral. Todavia as tecnologias avançam e cada vez mais é possível extrair de forma mais eficiente e com menor custo a energia proveniente da biomassa orgânica, em especial, como ponto de interesse deste estudo, da biomassa gerada a partir dos resíduos de poda.

A Figura 1 apresenta as principais rotas de conversão de biomassa em energia.

Figura 1- Processo de conversão energética da biomassa



Fonte: Adaptado de Nogueira e Lora (2003).

Podemos observar que o processo de conversão energético da biomassa pode ser classificado em três grandes grupos: processos físicos, termoquímicos e biológicos. Processos físicos englobam a densificação, redução granulométrica e a obtenção de óleos vegetais por processos de prensagem. Os processos termoquímicos se caracterizam por temperaturas elevadas e incluem a combustão direta, gaseificação, pirólise e liquefação. Os processos de conversão biológica envolvem geralmente biomassa com alto teor de umidade e se caracteriza pelos processos de digestão anaeróbia e fermentação alcoólica (NOGUEIRA; LORA, 2003).

Várias são as características que influenciam diretamente no conteúdo energético da biomassa, entre elas:

1. O teor de umidade pode ser determinado pelo método do forno de secagem (E871-82)(ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL, 2014) ou de diferença da massa final e inicial.
2. O teor de voláteis pode ser determinado de acordo com as normas ASTM para análise imediata de madeira (E871-82, E872 e D1102-84)(ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL, 2014). A fração de voláteis é composta de hidrocarbonetos e gases hidrogênio, monóxido de carbono e metano.
3. O teor de cinzas pode ser determinado através da norma ASTM E1755-01(ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL, 2015).
4. A quantidade de carbono fixo é determinada por diferença entre a soma dos teores (%) de umidade, matéria volátil e cinzas e 100%, através da norma ASTM E870 – 82 (ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL, 2011).
5. A composição química elementar de uma amostra, sendo o conteúdo percentual em massa dos principais elementos que constituem a biomassa: Hidrogênio (H), Carbono (C), Enxofre (S), Oxigênio (O), Nitrogênio(N), umidade (W) e Material residual (Cinzas)(A) (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2009). A composição elementar pode ser Determinada através da ASTM-D3176-74(ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL, 2009).
6. O poder calorífico, PCI e PCS, podem ser calculados através da fórmula de DULONG e MEDELIEV e por bomba colorimétrica pela norma E711-87 (ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL, 2004).

3.1 PROCESSOS FÍSICOS

Dentre os processos físicos, a redução granulométrica e a secagem se apresentam como etapas essenciais para melhor aproveitamento energético da biomassa gerada através de resíduos de poda. A redução granulométrica consiste basicamente em uma operação mecânica para redução do tamanho das partículas dos resíduos iniciais, e traz como principal vantagem a homogeneização do resíduo o que em muitas aplicações se demonstra fundamental para aumento da eficiência energética do dispositivo a ser abastecido. A secagem é outro fator de extrema importância, uma vez que o excesso de umidade diminui sensivelmente a quantidade

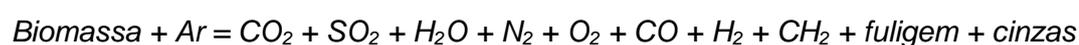
de energia disponível para conversão em calor. A produção de pellets ou briquetes a partir da biomassa de resíduos de poda se dá principalmente pela combinação de calor e pressão, sendo as principais rotas de densificação. Em geral, o material pelletizado ou briquetizado tem densidade entre 1.100 até 1.330 kg/m³. Os principais dispositivos utilizados para produção de pellets e briquetes são prensas com acionamento mecânico, hidráulico ou por extrusão com matriz em forma de disco ou anular (NOGUEIRA; LORA, 2003).

A briquetagem de resíduos de poda foi estudado por Silva (2016), que verificou que embora seja possível realizar esse processo, os briquetes produzidos a partir destes resíduos apresentaram baixa resistência mecânica, tornando-se inviáveis para o transporte ou uso desse produto. Já a produção de pellets dos resíduos de poda, que também foi estudada por Silva (2016), se demonstrou bastante promissora, pois se comparado aos resultados obtidos por GARCIA; CARASCHI; VENTORIM, (2012) os quais avaliaram a densidades energéticas da serragem 2,68 GJ/m³ e do cavaco 3,39 GJ/m³, os pellets de madeira de pinus e eucalipto, florestas plantadas para fins energéticos, superam em até 4 vezes a densidade da serragem e em 3 vezes a do cavaco. Quando os resultados são comparados com a melhor condição de pellets produzidos no estudo sobre resíduos florestais, verificam-se os aumentos de 3,4 vezes da densidade energética se comparado a serragem e 2,7 vezes se comparado a densidade energética do cavaco. Desta maneira é possível avaliar que os pellets produzidos com resíduos florestais podem ser comparados energeticamente com os produzidos com madeiras provenientes de plantações energéticas (SILVA, 2016).

3.2 PROCESSOS TERMOQUÍMICOS

No que tange aos processos termoquímicos há uma grande variação de rendimento energético a depender da tecnologia de conversão aplicada e do aproveitamento combinado para geração de calor e energia.

A combustão ou queima direta é a técnica mais antiga de aproveitamento energético de resíduos florestais, e consiste resumidamente na reação de um combustível com ar e pode ser representada da seguinte forma (NOGUEIRA; LORA, 2003):



Em termos físico-químicos a combustão da biomassa se dá basicamente em três processos: secagem, volatilização e oxidação (NOGUEIRA; LORA, 2003). Os equipamentos que empregam biomassa necessitam especial atenção ao excesso de ar na combustão uma vez que este é um dos fatores determinantes para eficiência do processo. A combustão direta é empregada das mais diversas maneiras: desde fogões domésticos, fornos e caldeiras para geração de calor e vapor. Neste último caso, o emprego de modernos equipamentos em ciclos combinados aumentam significativamente a eficiência do processo e o aproveitamento energético da biomassa (NOGUEIRA; LORA, 2003).

A gaseificação consiste em processo termoquímico com objetivo de converter um insumo líquido ou sólido em um gás com características combustíveis. Se dá principalmente através de sua oxidação parcial a temperaturas acima das recomendadas para pirólise e abaixo das recomendadas para os processos de combustão. O poder calorífico do gás produzido pelos gaseificadores está intrinsicamente ligado a injeção da mistura de ar ou outros gases no processo. A gaseificação com ar produz gás com baixo poder calorífico, em torno de 5MJ/Nm^3 . Já a gaseificação com oxigênio puro ou com vapor d'água, consegue um poder calorífico de aproximadamente 10 a 15MJ/Nm^3 (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2009).

A gaseificação da biomassa traz vantagens significativas sobre a queima direta, sobretudo quando realizadas por ciclos combinados com turbina a gás e gerador de vapor, em processos de cogeração (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2009). Essas instalações são conhecidas como sistemas BIG/GT (*Biomass Integrated Gasifier/Gas Turbine*). Entre os principais tipos de gaseificadores temos (NOGUEIRA; LORA, 2003):

1. Gaseificadores contracorrentes – este tipo de gaseificador tem como característica a entrada de ar na parte inferior do gaseificador e o combustível é inserido pela parte superior. Este se movimenta para baixo pela ação da gravidade conforme é consumido, os gases têm fluxo ascendente contrário ao fluxo do combustível;
2. Gaseificadores concorrentes – Neste tipo de gaseificador a alimentação do combustível é feita pelo topo e a alimentação de ar é feita em fluxo descendente (mesmo sentido do combustível). Nestes gaseificadores as

zonas de combustão e redução ficam posicionadas de forma oposta à dos gaseificadores contracorrentes.

3. Gaseificadores de fluxo cruzado – Os gaseificadores de fluxo cruzado se caracterizam por ter a saída do gás na mesma altura da entrada de ar. Estes gaseificadores se caracterizam por produzir um gás combustível com características entre os gaseificadores concorrentes e contracorrentes. Uma das principais vantagens deste tipo de gaseificador é a possibilidade de rápidas respostas a alterações de carga, seu peso reduzido e sua simplicidade construtiva. Por outro lado, são muito sensíveis a composição e umidade da biomassa de alimentação.

4. Gaseificadores de leito fluidizado – nestes modelos de gaseificadores as partículas do combustível são mantidas em suspensão em um leito de partículas inertes (areia, sílica, alumina etc.), fluidizadas pelo fluxo do agente de gaseificação. Nestes sistemas, a maioria dos voláteis estará em contato com o leito aquecido, realizando desta forma um processo de gaseificação tecnicamente mais eficiente e limpo. A principal vantagem deste tipo de gaseificador é maior facilidade do controle de temperatura na zona de reação, a qual se dá através da variação na alimentação de ar. Uma das principais desvantagens destes gaseificadores é a demora a responder as demandas no consumo de gás (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2009).

A pirólise se caracteriza por um processo físico-químico no qual a biomassa é aquecida a temperaturas relativamente baixas (500°C – 800°C) em atmosfera não oxidante, formando compostos sólidos, líquidos e gasosos a depender do método de pirólise a ser empregado (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2009).

O produto resultante da pirólise da biomassa está diretamente ligado a composição da biomassa e a tecnologia empregada conforme pode ser observado na Tabela 1.

Tabela 1 - Versões da tecnologia de pirólise.

| Processo de pirólise | Tempo de residência | Taxa de aquecimento | Temperatura máxima(°C) | Produtos principais |
|-----------------------|---------------------|---------------------|------------------------|-------------------------------------|
| Carbonização | Horas-dias | Muito pequena | 400 | Carvão vegetal |
| Convencional | 5-30 minutos | Pequena | 600 | Bioóleo, carvão e gás |
| Rápida | 0,5 – 5 segundos | Intermediaria | 650 | Bioóleo |
| Flash Pirolise | < 1 segundo | alta | < 650 | Bioóleo, gás |
| Ultra-rápida | <0,5 segundos | Muito alta | 1000 | Produtos químicos e gás combustível |
| Vácuo | 2 – 30 segundos | Intermediaria | 400 | Bioóleo |
| Hidropirólise | < 10 segundos | Alta | <500 | Bioóleo e produtos químicos |
| metanopirólise | <10 segundos | Alta | >700 | Produtos químicos |

Fonte: (BRIDGWATER; BRIDGE, 1991)

A carbonização é o mais antigo tratamento térmico da biomassa e se dá pela queima da madeira em ambiente fechado, tornando-se preta e friável, resultando no carvão vegetal (NOGUEIRA; LORA, 2003).

A pirólise convencional é utilizada para obtenção de carvão vegetal e bio-óleo, e difere-se da carbonização por necessitar de um tratamento prévio da biomassa, com redução da granulometria (entre 5mm e 50mm) e teor de umidade máximo de 15%. O tempo de produção de cada carga do reator é em torno de 5 horas. O carvão produzido por este processo tem em média um poder calorífico de 29,3 – 30 MJ/kg. O rendimento em porcentagem de massa seca em relação a biomassa original é de aproximadamente 30% para carvão e 15% para o bio-óleo (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2009);

A pirólise rápida se caracteriza por utilizar reatores que são alimentados por biomassa com partículas de aproximadamente 5mm misturando-se nos sistemas com um gás de arraste, normalmente nitrogênio, em temperatura de aproximadamente 700°C e em alta velocidade, em torno de 400 m/s. O principal objetivo é a produção em larga escala de bio-óleo (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2009);

A pirólise ultrarrápida utiliza dispositivos que permitem altas velocidades de aquecimento em curtos tempos de residência. Esse processo em geral se baseia no aquecimento indireto da biomassa, como por exemplo em fornos rotativos e sistemas de leito fluidizado (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2009).

A liquefação da biomassa pode ser definida como o processo para obtenção de líquidos (óleos) a partir de materiais lignocelulosicos (lignina, celulose e hemicelulose). Basicamente dois processos são aplicados para obtenção de combustíveis através do método da liquefação (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2009):

1. Processos redutores – neste método o oxigênio da biomassa é removido como CO e CO₂, restando então hidrocarbonetos puros com alto poder calorífico e prontos para serem usados como combustível ou matéria prima para produtos químicos;
2. Processos oxidativos – neste método o oxigênio é incorporado a biomassa gerando grupos polares, como hidroxil, carboxil e carbonil. Obtém-se ainda fenóis mononucleares e ácidos mono e dicarboxilicos que podem ser usados na indústria química.

Diversos estudos com diferentes técnicas vêm sendo desenvolvidos para obtenção de óleos combustíveis através da liquefação da biomassa, entre eles podemos citar a hidrogenólise, hidrogenação catalítica, solvólise e hidrólise. De toda forma, o óleo obtido no processo de gaseificação deve ser refinado para produção de combustíveis e produtos comercialmente aplicáveis, sendo este um dos gargalos desta tecnologia (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2009).

A Tabela 2 ilustra uma avaliação econômica de algumas tecnologias de liquefação termoquímica de biomassa.

Tabela 2 - Sumário da avaliação econômica das tecnologias de liquefação termoquímica da biomassa*.

| Produto | Processo | Investimento médio de capital (US\$ milhões) | Custo médio** (US\$/GJ) |
|-----------------|--|---|--------------------------------|
| Metanol | Gaseificação e síntese | 115,2 | 16,1 |
| Gasolina | Madeira para metanol e catalise (Mobil) ² | 135,3 | 22,3 |
| Gasolina | Pirólise e polimerização adicional de olefinas | 60,7 | 26,2 |

* Considerando que os processos utilizam madeira como material de partida a um consumo de 2000 t/dia. O custo da matéria-prima foi estimado em US\$1,25/MJ.

** Valor de venda do produto obtido necessário para tornar o processo economicamente viável.

² Refino utilizando catalizador similar a zeólitas desenvolvido pela MOBIL.

| | | | |
|--|---|-------|------|
| Óleo de pirólise | Pirólise | 25,8 | 8,8 |
| Líquidos semelhantes ao petróleo | PERC ³ (Liquefação catalítica) | 56,1 | 10,7 |
| Líquidos semelhantes ao petróleo | LBL ⁴ (Liquefação catalítica) | 39,5 | 9,6 |
| Combustível com 13,5% de H e 86,5% de C | PERC, seguido de hidrogenação | 109,0 | 17,7 |
| Combustível com 13,5% de H e 86,5% de C | LBL, seguido de hidrogenação | 97,0 | 18,0 |

Fonte: (WILHELM; KAM; STALLINGS, 1981)

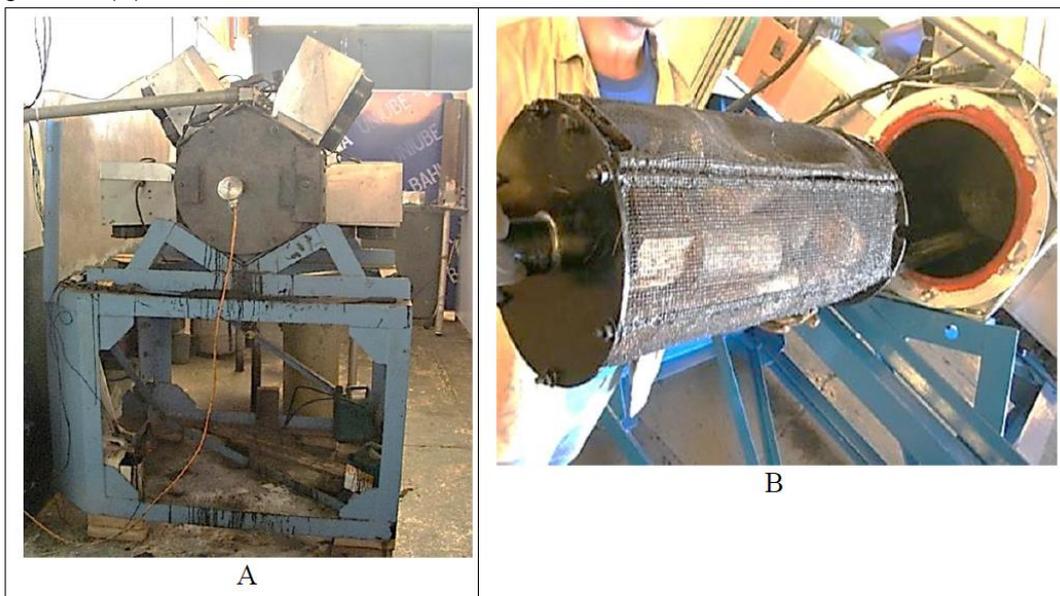
Para o presente trabalho, destaca-se a tecnologia de pirólise por micro-ondas. Neste processo, o aquecimento pelas micro-ondas apresenta uma melhora na distribuição da temperatura, na taxa de aquecimento e no tempo de permanência dos voláteis no material em tratamento, se comparado com o processo convencional de pirólise, sendo esta uma alternativa tecnológica interessante sobre os processos convencionais, sobretudo do ponto de vista da velocidade de processamento, bem como da qualidade dos produtos obtidos (FERNANDEZ; ARENILLAS; ANGEL, 2011)

Tal tecnologia está disponível no laboratório de energias não ionizantes no Campus da Universidade de Uberaba. O equipamento disponível em escala laboratorial (Figura 2) é um forno micro-ondas de cavidade rotativa, desenvolvido pela empresa ONDATEC®, e doado a Universidade no ano de 2018. O equipamento apresenta as seguintes características: potência: 20 kW, tensão de alimentação: 220V 60 Hz, um reator de cavidade sextavada e rotativa de capacidade de 650 litros, rotação ajustável por inversor de frequência: 30 a 60 Hz, com 24 válvulas de magnetrons e controle manual de potência com acionamento individual de cada válvula de magnetron; sistema de separação e coletor de gases condensados (GC) e gases não condensados (GNC); sistema de armazenamento de bio-óleo; funcionamento em batelada (JUNIOR, 2018).

³ PERC - Pittsburg Energy Research Center.

⁴ LBL – Lawrence Berkeley Laboratory.

Figura 2 - Forno micro-ondas ONDATEC®: estrutura do forno (A); cavidade sextavada com cesto giratório (B)



Fonte: (ONDATEC®, 2021)

Há ainda um equipamento de grande porte (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**), da mesma empresa, instalado em um projeto piloto para produção de carvão vegetal, no Campus Fazenda Escola Alexandre Barbosa, da Universidade de Uberaba.

Figura 3 - Forno de micro-ondas para produção de carvão vegetal - UPE250 ONDATEC®



Fonte: (ONDATEC®, 2021)

A capacidade de produção deste equipamento é apresentada na

Tabela 3:

Tabela 3 - Capacidade de produção da UPEC 250 em função da madeira de Pinus (*Pinus elliottii* Engelm., Pinaceae).

| Carbono Fixo | Umidade | Densidade | Lignina | Celulose | Hemicelulose | RG* | Produção |
|---------------------|----------------|-------------------------|----------------|-----------------|---------------------|------------|-----------------|
| % | % | kg/m³ | % | % | % | | (kg/h) |
| 65,3 | 5 | 550 | 32 | 46 | 22 | 44,4 | 513 |
| 68,3 | 25 | 550 | 32 | 46 | 22 | 38,7 | 319 |
| 70,3 | 5 | 550 | 32 | 46 | 22 | 35,5 | 328 |
| 73 | 5 | 550 | 32 | 46 | 22 | 32,1 | 296 |
| 79 | 5 | 550 | 32 | 46 | 22 | 26,3 | 148 |
| 69,2 | 25 | 550 | 35 | 43 | 22 | 39,5 | 327 |
| 69 | 25 | 450 | 36 | 41 | 23 | 40,3 | 370 |
| 68 | 25 | 450 | 26 | 46 | 28 | 34,4 | 298 |
| 68,5 | 25 | 480 | 20 | 46 | 34 | 26,5 | 191 |

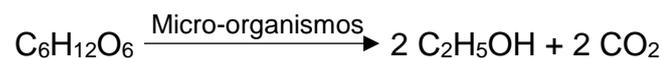
Fonte: ONDATEC® (2021).

*RG= rendimento gravimétrico: relação entre a massa de carvão produzida menos os tiços, pela massa de madeira seca.

3.3 PROCESSOS BIOLÓGICOS

Em termos biológicos o processo de conversão da biomassa em energia se dá basicamente por dois caminhos: a fermentação e a digestão anaeróbia (NOGUEIRA; LORA, 2003).

A fermentação compreende basicamente a conversão de açúcares (glicose, frutose ou outros sacarídeos que lhe dão origem) em etanol e CO₂, seguindo resumidamente a equação (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2009):



A principal estratégia utilizada ainda hoje na produção de etanol deriva do processo originalmente chamado de Melle-Boinot de 1938, e consiste em manter uma superpopulação de leveduras, o que aumenta a produtividade e reduz o tempo de fermentação. Essa superpopulação de leveduras é tratada e alimentada em condições

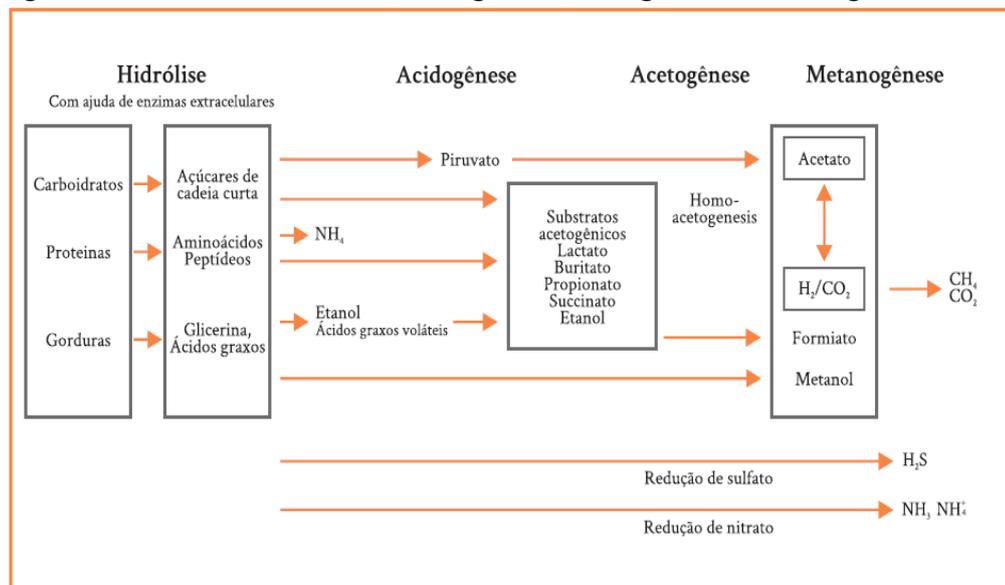
de temperatura e pH controlados de forma a minimizar a síntese de outros produtos que não o álcool e o CO₂ (CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2009).

A biodigestão anaeróbia se dá através da degradação biológica da matéria orgânica e depende da atividade conjunta de uma associação de microrganismos para transformar material orgânico em dióxido de carbono e metano. Um dos principais objetivos da conversão de biomassa pelo processo de biodigestão se dá pelo grande potencial de captura do gás metano (CH₄) que é produzido por este método, cerca de 65% do gás produzido ou mais, a depender da matéria orgânica. Esta captura traz como principais benefícios, evitar o lançamento do gás metano diretamente na atmosfera, uma vez que ele é cerca de 28 vezes mais poluente que o dióxido de carbono (CO₂) e a possibilidade de seu uso como combustível (COELHO et al., 2020).

O processo de biodigestão anaeróbia pode ser dividido em quatro fases, sendo: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese (KUNZ; STEINMETZ; AMARAL, 2019). Cada etapa é realizada por diferentes grupos de microrganismos, em simbiose, e podem requerer diferentes condições ambientais (

Figura 4).

Figura 4 - Processos de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese.



Fonte: Adaptado de Deublein e Steinhauser (2008)

Para avaliar o potencial de produção de biogás e o nível tecnológico a ser empregado para tornar o processo economicamente viável, se faz necessário

avaliação de uma série de parâmetros físicos, químicos e bioquímicos. Destaca-se nos parâmetros físicos, a quantidade de matéria orgânica disponível, pois este fator influencia diretamente no tipo de reator a ser usado, a densidade, o tamanho, a viscosidade e o teor de sólidos contidos no efluente. Os principais parâmetros bioquímicos a serem observados, são a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), a demanda química de oxigênio (DQO) e o carbono orgânico total (COT). Em termos químicos deve-se observar o pH sendo este ideal para o processo entre 7,0 a 7,2, a condutividade, a concentração de nutrientes, sendo a ideal para produção de biogás, aquela com uma baixa relação Carbono/Nitrogênio (C/N) e sem a presença de elementos tóxicos e pesados.

Os dispositivos utilizados para conversão da biomassa em energia pelo processo de biodigestão anaeróbia, são conhecidos como biodigestores. Existem várias tecnologias de biodigestores os quais foram desenvolvidos de acordo com a aplicação e o nível tecnológico disponíveis. Os principais modelos disponíveis são:

1. Modelos Indiano (Figura 5) - de fácil construção, possui uma campânula móvel na parte superior e produz gás a uma pressão constante(CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2009).

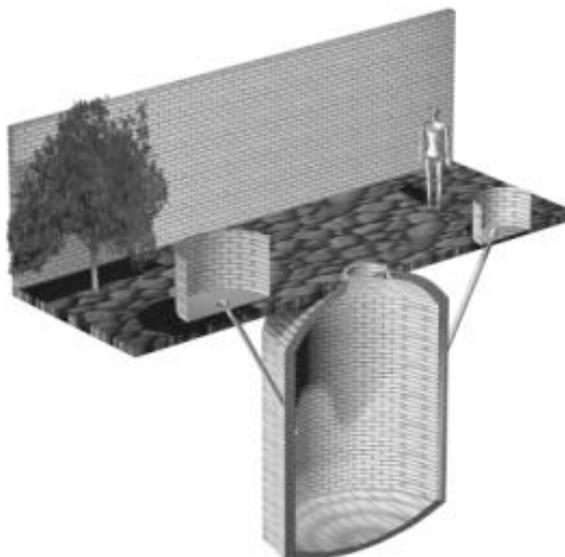
Figura 5 - Biodigestor modelo indiano.



Fonte: (DEGANUTTI et al., 2002)

2. Modelo chinês (Figura 6) – é bastante parecido com o modelo Indiano, diferenciando-se por não possuir uma campânula móvel, esta alteração provoca variação na pressão disponível para o gás gerado.

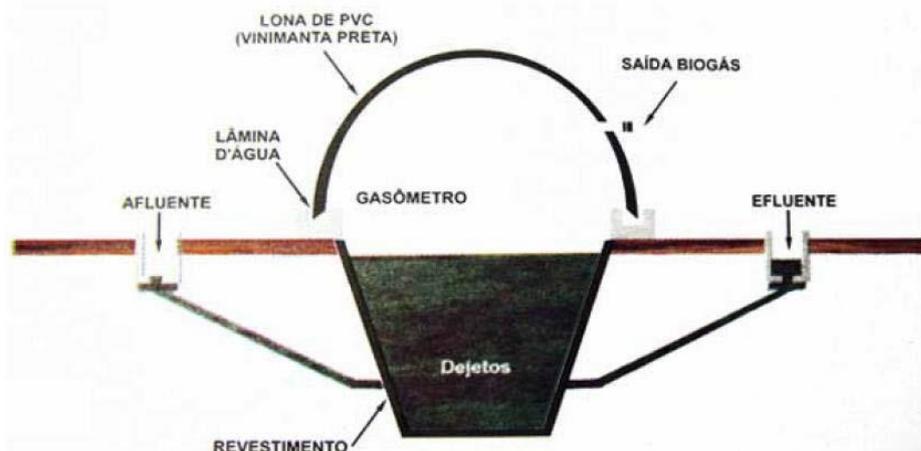
Figura 6 - Biodigestor modelo Chinês.



Fonte: (DEGANUTTI et al., 2002)

3. Modelo da Marinha ou Canadense (Figura 7) – caracteriza-se por ter o gasômetro separado e produzir gás a pressão constante, possui ainda elemento de aquecimento e agitação o que possibilita um menor tempo de residência, no entanto tem custo de implantação e operação maiores(CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2009).

Figura 7 - Biodigestor modelo da Marinha ou Canadense.



Fonte: (OLIVER et al., 2008,p.9).

4. Modelo Tipo batelada (Figura 8) – tem como principal característica o tratamento de efluentes com produção descontínua e alto teor de sólidos, até 25%. Neste sistema o biodigestor é carregado com a carga orgânica a qual permanecerá por um tempo maior.

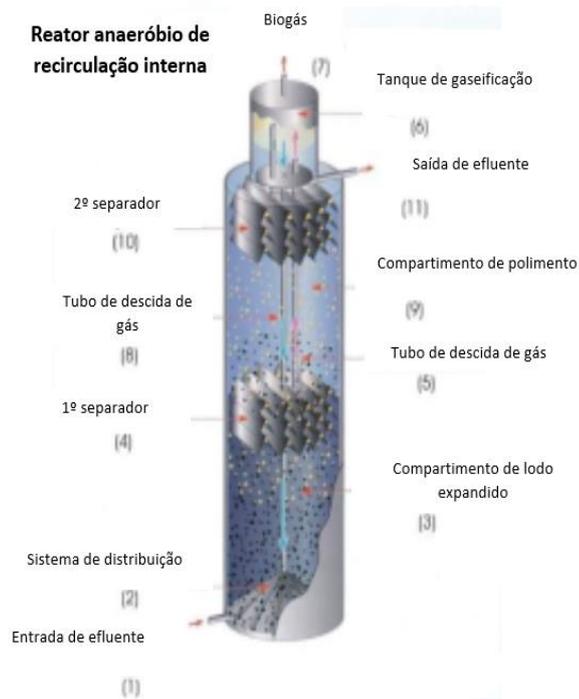
Figura 8 - Biodigestor a batelada.



Fonte: (DEGANUTTI et al., 2002).

5. Modelo Holandês ou UASB (Figura 9) – Para tratamento de resíduos com teor de sólidos abaixo de 2%, o emprego de biodigestores do tipo UASB - *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* (biodigestores de fluxo ascendente com leito de lodo), demonstra-se bastante eficiente pelo baixo tempo de residência dos resíduos e, a depender da tecnologia, como por exemplo de recirculação interna, alta produção de gás(CORTEZ; LORA; GOMEZ, 2009).

Figura 9 - Biodigestor do tipo UASB-IC



Fonte: (PAQUES, 2021).

4. ESTUDO DE CASO

4.1. LOCAL DE ESTUDO

A Universidade de Uberaba é uma instituição de ensino superior com 74 anos de história, sendo reconhecida como uma das maiores instituições particulares de ensino de Minas Gerais. Promove a formação de profissionais em diversas áreas do conhecimento e hoje conta com Campi nas cidades de Uberaba e Uberlândia e diversos polos para apoio ao ensino a distância.

O Campus Aeroporto da Universidade de Uberaba, objeto do estudo, consiste em uma área de 385.000 m², localizado em área urbana próximo ao aeroporto da cidade de Uberaba, Minas Gerais. O Campus em estudo é uma área altamente arborizada e vegetada (

Figura 10). Esta área exige manutenção e cuidados permanentes, visto a constante produção de resíduos de poda, limpeza das áreas vegetadas, roçagem e eventuais supressões.

A logística empregada hoje na gestão dos resíduos de poda, envolve cerca de dez jardineiros, motorista e veículos diversos. Atualmente, esses resíduos são destinados para uma área afastada do Campus a qual vem sendo utilizada como uma composteira natural. Devido ao tempo de compostagem, há uma necessidade constante de abertura de novas áreas para depositar o resíduo gerado.

Figura 10 - Campus Aeroporto da Universidade de Uberaba.



Fonte: O autor.

Figura 11 - Imagem aérea Campus Aeroporto.



Fonte: (ARCGIS, 2021).

4.2 QUANTIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS

Para a quantificação dos resíduos foi desenvolvido um questionário semiestruturado (Apêndice A), o qual foi submetido a encarregada e a líder do setor de jardinagem, que possuem acesso direto aos dados de geração dos resíduos. Durante dois meses (setembro e outubro) acompanhou-se o manejo e o tratamento dado aos resíduos de poda na Universidade.

Para a estimativa do peso anual dos resíduos gerados foi utilizada a seguinte metodologia:

- A partir do material coletado e armazenado em *bags* com volume de 1m^3 , foram extraídas amostras em diversos pontos do Campus;
- As amostras foram acondicionadas em sacos de 100 litros;
- Estes volumes ficaram armazenados em temperatura ambiente por 24 horas;
- Após o período de estabilização as amostras foram pesadas.

Para aferição do peso, foram padronizadas amostras em sacos de 100 litros e, com a utilização de balança eletrônica de plataforma da marca *Elgin*, modelo *BPW 10.000*, calibrada, foi realizada a pesagem. Foi avaliado o tipo de resíduo principal e

o volume (m^3) dos resíduos gerados. Utilizando de uma média aritmética simples chegamos ao volume e peso dos resíduos coletados no Campus Aeroporto anualmente.

Os resíduos de poda de galhos de maior monta (diâmetros maiores que 50mm), e supressão de árvores, consideradas com risco de queda, também foram documentadas, porém seu volume não foi considerado neste estudo em virtude de sua ocasionalidade e produção bastante irregular.

4.3. POTENCIAL ENERGÉTICO A PARTIR DE DIVERSAS TECNOLOGIAS

Em função do tipo de resíduo gerado no Campus universitário em estudo, seus volumes, e as pesquisas para desenvolvimento do presente trabalho, levando em consideração a infraestrutura existente e as possibilidades de aplicação energética da biomassa disponível, avaliamos potencialidade utilizando a tecnologia de densificação, biodigestão, gaseificação e pirólise.

Para determinação do potencial energético da biomassa em questão, é necessário conhecer suas características físico-químicas e termoquímicas, ou seja, sua composição imediata, elementar e seu poder calorífico. Desta forma, este trabalho buscou estudos similares que apresentassem resultados compatíveis com o tipo de resíduo gerado no local de estudo. Um dos estudos utilizados como base para esses dados foi o estudo de Souza, Alencar e Mazzonetto (2016).

4.3.1 Pellets/ Briquetes

O cálculo do potencial energético dos pellets ou briquetes com produção a partir dos resíduos de poda coletados anualmente no local de estudo, deu-se a partir dos resultados obtidos por Silva (2016) para pellets e Petricoski (2017) para briquetes, que realizaram estudos sobre potencial energético de resíduos de poda. Os dois estudos obtiveram potencial energético similar para pellets e briquetes.

Levando em consideração uma densidade média de 1.200 kg/m^3 , e considerando os resultados obtidos por Petricoski (2017), o qual indica que o PCI do briquete produzido com 100% de resíduos de poda é de $16,165 \text{ MJ.kg}^{-1}$, temos que o potencial energético para o resíduo de poda do local de estudo, pode ser avaliado pela seguinte expressão:

$$Pe = \frac{\rho_{RPU}}{\rho_{PD}} \times P_{RPU-A} \times 16,165 \text{ MJ/kg} \quad (1)$$

Onde:

Pe – Potencial energético em MJ;

ρ_{RPU} – Densidade dos resíduos de poda coletados no local de estudo kg/m³;

ρ_{PD} – Densidade média dos produtos de densificação (Pellets ou Briquetes) kg/m³;

P_{RPU-A} – Peso dos resíduos de poda da área de estudo (em kg).

4.4.2 Biodigestão

A determinação do potencial energético dos resíduos de poda do local de estudo, por meio de biodigestão, baseou-se nos cálculos desenvolvidos no Atlas de Bioenergia do estado de São Paulo, do ano de 2020 (COELHO et al., 2020).

Para calcular a quantidade de biogás produzido a partir do tratamento anaeróbio da fração orgânica dos RSU equação (2), o referido atlas utilizou-se do fator apresentado por Achinas *et al.* (2017), de 101,5 Nm³ por tonelada de resíduo. Ainda de acordo com Achinas *et al.* (2017) o biogás gerado por esse tipo de resíduo possui aproximadamente 55% de metano.

$$V_{\text{biogás}} = MO_{\text{RSU}} * F_{\text{MO}} \quad (2)$$

Onde:

$V_{\text{biogás}}$ = Volume de biogás produzido (Nm³/ano)

MO_{RSU} = Quantidade de matéria orgânica presente no RSU (t/ano)

F_{MO} = Fator de produção de biogás a partir do tratamento anaeróbio da matéria orgânica do RSU (101,5 Nm³biogás/t de resíduo, conforme (Achinas *et al.*; 2017)

O potencial de geração de biometano pode ser calculado conforme Equação (3):

$$V_{\text{biom}} = \frac{V_{\text{biogás}} * (\text{Con.CH}_4)}{\%_{\text{metano}}_{\text{biometano}}} \quad (3)$$

Onde:

V_{biom} = Volume de biometano produzido por ano (Nm^3/ano);

$V_{\text{biogás}}$ = Volume de biogás produzido (Nm^3/ano);

$\text{Con.}_{\text{CH}_4}$ = Concentração de metano presente no biogás do tratamento anaeróbico da fração orgânica do RSU (55% conforme Achinas *et al.*, 2017);

% **metano**_{biometano} = Porcentagem de metano presente no biometano.

No cálculo do volume de biometano foi considerado um valor médio de purificação do biogás de 97%⁵, citado pelo Atlas de bioenergia do estado de São Paulo. A diferença para 100% representa as perdas de metano mais as impurezas residuais (COELHO *et al.*, 2020).

Para determinação do potencial de energia elétrica disponível anualmente, a partir do tratamento anaeróbico da biomassa produzida pelos resíduos de poda, utiliza-se a Equação (4) (COELHO *et al.*, 2020).

$$EE = \frac{(V_{\text{biogás}} \times \text{Con.}_{\text{CH}_4} \times \text{PCI}_{\text{CH}_4} \times \text{Ef.}_{\text{ele}})}{1000} \quad (4)$$

Onde:

EE = Potencial geração de energia elétrica por ano a partir do biogás produzido no tratamento anaeróbico da fração orgânica dos RSU, em cada município (MWh/ano);

$V_{\text{biogás}}$ = Volume de biogás produzido (Nm^3/ano);

$\text{Con.}_{\text{CH}_4}$ = Concentração de metano presente no biogás do tratamento anaeróbico da fração orgânica do RSU (55% conforme Achinas *et al.*, 2017);

PCI_{CH_4} = Poder Calorífico Inferior do metano ($\text{kWh}/\text{Nm}^3\text{CH}_4$) (neste estudo utilizou-se o fator de 9,97 $\text{kWh}/\text{m}^3\text{CH}_4$, conforme apresentado por (BUENO *et al.*, 2016)

Ef._{ele} = Eficiência de conversão energética para motor ciclo Otto a biogás (neste estudo utilizou-se os fatores de 0,35 para vazões de biogás de até 5.000 Nm^3/dia e de 0,42 para vazões acima 5.000 Nm^3/dia , conforme metodologia fornecida pela (ABIOGAS, 2018);

⁵ O índice de 97% corresponde as especificações da ANP e é o que as empresas garantem que as tecnologias disponíveis são capazes de purificar.

1000 = conversão de kWh para MWh.

4.4.3 Gaseificação

Para aplicação do processo de gaseificação aos resíduos sólidos urbanos (RSU) e, em especial para resíduos de poda urbana (RPU), se faz necessário a transformação dos mesmos em CDR (Combustível Derivado de Resíduo, obtido após a secagem, separação e trituração dos RSU). Desta maneira o CDR com 25% de umidade apresenta PCI de 3.225 kcal/kg e rendimento aproximado de 60% do RSU inicial (COELHO et al., 2020).

Estimativa da energia de entrada no sistema, equação (5):

$$Ee = (V_{\text{resíduo}}) \times (PCI_{\text{resíduo}}) \quad (5)$$

Onde:

Ee = Energia de entrada (kcal/h)

$V_{\text{resíduo}}$ = volume de RSU (kg/h)

$PCI_{\text{resíduo}}$ = Poder Calorífico Inferior do RSU (kcal/kg)

A partir da análise de sistema em operação Coelho et al. (2020), avaliou que a eficiência para conversão do CDR em *syngas* foi de 70% e o poder calorífico inferior (PCI) do *syngas* é de 1.160 kcal/Nm³. Desta maneira a vazão volumétrica do *syngas* pode ser determinada pela equação (6).

$$Q = \frac{Ee}{PCI_{\text{syngas}}} \quad (6)$$

Onde:

Q = Vazão do *syngas* (Nm³/h)

Ee = Energia de entrada (kcal/h)

PCI_{syngas} = Poder Calorífico Inferior do *syngas* (kcal/Nm³)

Considerando que o gás de síntese produzido seria direcionado para um motogerador ciclo Otto diesel, preferencialmente *dual-fuel*, a potência elétrica do gás de síntese no motogerador pode ser determinada pela equação (7).

$$P = \frac{(Q) \times (PCI_{syngas}) \times (\eta)}{\text{fator de conversão}} \times (FC_{motor}) \quad (7)$$

Onde:

P = Potência disponível (MW);

(Q) = Vazão do gás (Nm³/h);

(PCI_{syngas}) = Poder Calorífico inferior do syngas (kcal/Nm³);

(η) = Eficiência do motor ciclo diesel (%)

(FC_{motor}) = Fator de capacidade do motor (%)

(Fator de conversão) (kcal/h para MW) = 860.000

Desta maneira é possível estimar a geração de energia elétrica do RSU através da transformação termoquímica com sistema de gaseificação, por meio da equação (8):

$$E = P \times F_{\text{carga}} \times \text{Tempo de operação} \quad (8)$$

Onde:

E = energia elétrica disponível (MWh/dia);

P = potência disponível (MW);

F_{carga} = fator de carga na geração (%);

Tempo de operação motor = (h/dia).

4.4.4 Pirólise

A avaliação do potencial energético da biomassa pela tecnologia de pirólise, se deu avaliando a bibliografia disponível acerca de equipamento do tipo forno de micro-ondas, devido a disponibilidade do equipamento no local de estudo. Para tal, foram analisados os resultados obtidos por Morais et al. (2017) para tecnologia de pirólise

em forno de micro-ondas. O equipamento apresentado no estudo de Morais et al. (2017) é uma versão em escala industrial do aparelho similar de escala laboratorial existente no laboratório de tecnologias não ionizantes no Campus, objeto deste estudo. A pirólise realizada neste equipamento traz como principal benefício a conversão de cerca de 45% da biomassa em carvão. Este resultado é cerca de 50% maior do que as tecnologias convencionais de carbonização, sendo possível ainda o aproveitamento dos outros materiais residuais gerados no processo, como bio-óleo e gases não condensáveis. A biomassa bruta e os produtos de pirólise são calculados por meio da determinação do poder calorífico superior, equação (9), desenvolvida pelo Institute of Gas Technology (IGT) (JAHIRUL et al., 2012);

$$PCS_{\text{kcal/kg}} = 354,68 C + 1376,29 H - 15,92 \text{ cinzas} - 124,69 (O + N) + 71,26 \quad (9)$$

O poder calorífico inferior pode ser obtido através das equação (10) (JÚNIOR et al., 2015):

$$PC_{\text{kcal/kg}} = (PCS - 25,11 \times U) / [(100 + U) \times 100] \quad (10)$$

Em que: U = umidade (%).

Desta maneira a energia disponível após carbonização em forno de micro-ondas pode ser determinado pela equação 11.

$$E = M_{\text{rsu}} \times 0,35 \times PCI_6 \quad (11)$$

Onde:

E = Energia disponível em kcal

M_{rsu} = Resíduo em kg;

PCI = Poder calorífico inferior do carvão em kcal.kg⁻¹

⁶ Para o estudo referenciado com base na pirólise da madeira de eucalipto citriodora com umidade de 5% obteve-se um PCI de aproximadamente 5.000kcal.kg⁻¹, compatível com os estudos elaborados por Júnior et al. (2015).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 QUANTIFICAÇÃO DE RESÍDUOS

Com o intuito de ilustrar a diversidade de espécies vegetais presentes no estudo, foi elaborado uma apresentação gráfica, mapeando as espécies predominantes nas principais áreas do Campus.

Figura 12- Principais espécies vegetais no Campus Aeroporto da Universidade de Uberaba.



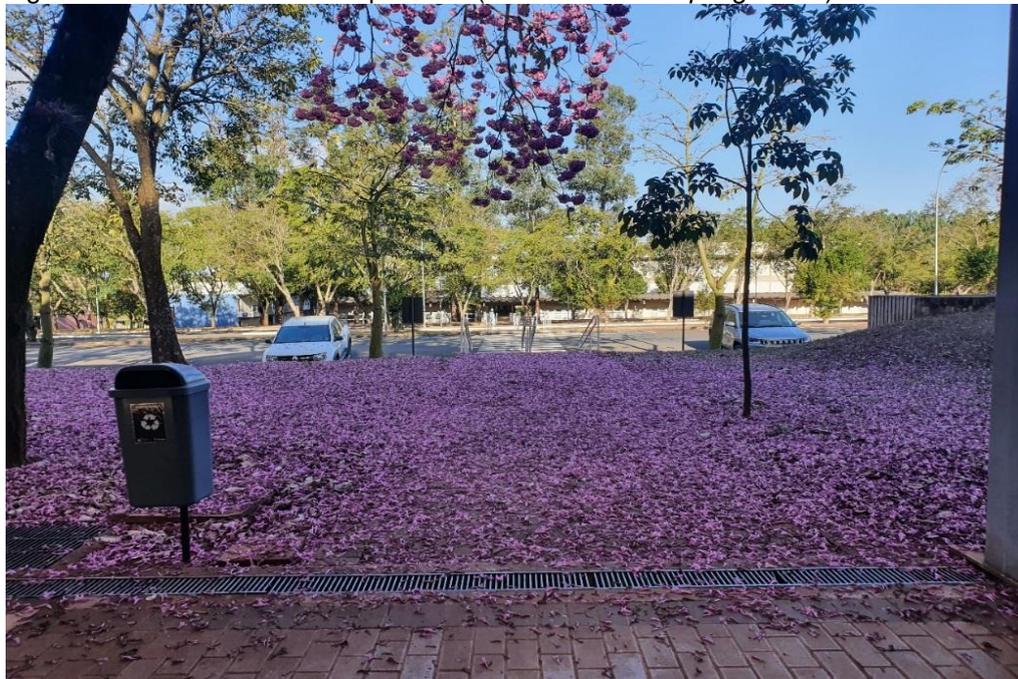
Fonte: o Autor

Com as observações, análise dos questionários e entrevistas dos trabalhadores responsáveis, constatou-se que o volume de resíduos gerados, são relativamente constantes mesmo com a sazonalidade anual. Nos meses de baixa pluviosidade (de abril a outubro) a maior parte do resíduo é gerado pela queda de folhas, flores, galhos e pela poda ou corte de árvores. Já nos meses úmidos (de novembro a março), o maior volume gerado se dá em virtude da poda para manutenção de gramados, além de podas e eventuais supressões de árvores.

A observação da geração de resíduos e os resultados dos questionários confirmaram que o volume médio de resíduos gerados é em torno de 50m³ semanais,

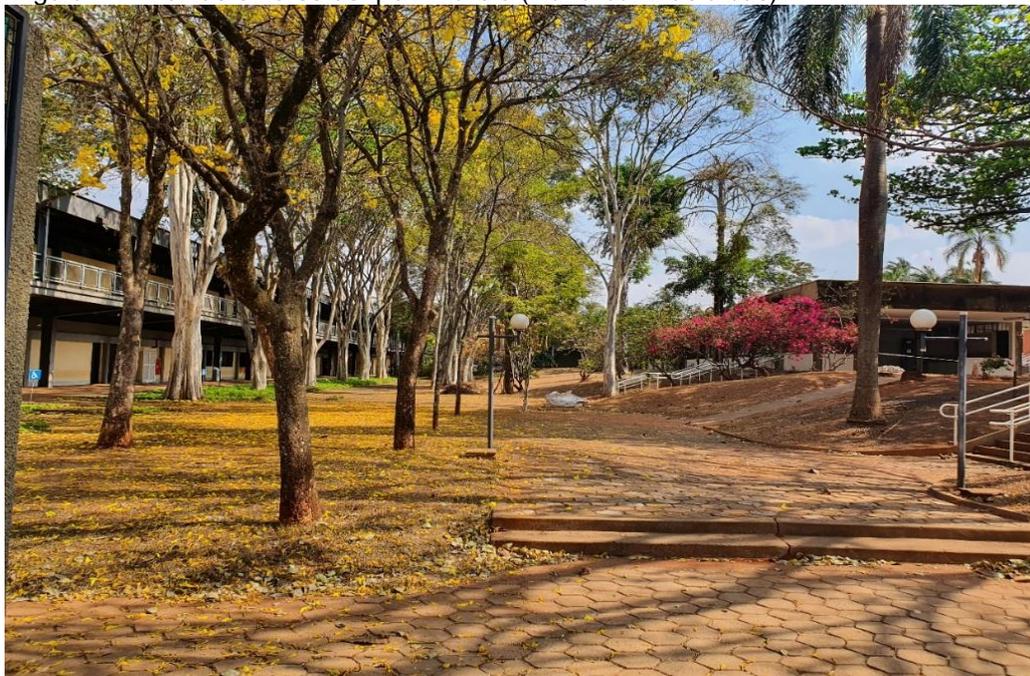
excluindo dos resíduos os galhos de maior dimensão (lenha) e árvores suprimidas. As imagens abaixo ilustram áreas do Campus antes da coleta destes resíduos:

Figura 13 - Flores e folhas de Ipê Roxo (*Handroanthus impetiginosus*).



Fonte: O Autor.

Figura 14 - Folhas e flores de Ipê Amarelo (*Handroanthus albus*).



Fonte: O Autor.

Figura 15 - Poda de árvores.



Fonte: O Autor.

Figura 16 -Supressão de árvore - Pau Rei (*Pterygota brasiliensis*).



Fonte: O Autor

Figura 17- Ocasionalidade ocorrida por fortes chuvas – Sete copas (*Terminalia catappa* L).



Fonte: O Autor

O volume e peso unitário médio dos diversos tipos de resíduos estão apresentados na

Tabela 4. A estimativa do peso e volume anual gerado no Campus Aeroporto pode ser verificado na Tabela 5.

Tabela 4 - Determinação de pesos unitários dos diversos tipos de resíduos.

| Imagem | Tipo de resíduo principal | Volume (m³) | Peso médio (kg) |
|---|----------------------------------|-------------------------------|------------------------|
|  | Folhas secas | 0,1 | 4,2 |

| | | | |
|---|-----------------------|-----|------|
|  | Flores e folhas secas | 0,1 | 7,15 |
|  | Gramíneas | 0,1 | 5,3 |

Tabela 5 - Determinação dos volumes e pesos totais.

| Tipo de resíduo Principal | Volume semanal(m ³) | Volume Anual(m ³) | Peso semanal médio (kg) | Peso anual médio (kg) |
|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| Poda e limpeza | 50 | 2.600 | 2.775 | 144.300 |

Observou-se nestes dois meses de acompanhamento que o tipo de material orgânico gerado pela poda, supressão e eventuais quedas de árvores é bastante diversificado. Todavia os resíduos coletados na limpeza das áreas vegetadas se caracterizam basicamente por folhas secas, flores em processo de secagem, lascas e sementes. Todo o material coletado (com exceção da supressão de árvores e podas de galhos de maior monta) é misturado nos bags, como pode ser observado nas imagens abaixo:

Figura 18 - Resíduos de poda coletado em bag de 1m³ onde predomina-se folhas.



Fonte: O Autor

Figura 19 - Resíduos de poda coletado em bag de 1m³ onde predomina-se flores.



Fonte: O Autor

Figura 20 - Resíduos de poda coletado em bag de 1m³ onde predomina-se gramíneas.



Fonte: o Autor

5.2 DESTINAÇÃO

A logística empregada hoje, na gestão dos resíduos de poda, envolve cerca de dez jardineiros, motorista e veículos diversos. Atualmente, os resíduos de poda, gerados no Campus Aeroporto, são destinados em terreno próprio, distante cerca de 2,5km, sendo utilizado como composteira natural, que, devido ao tempo de compostagem, demanda constante abertura de novas áreas para depósito de resíduos.

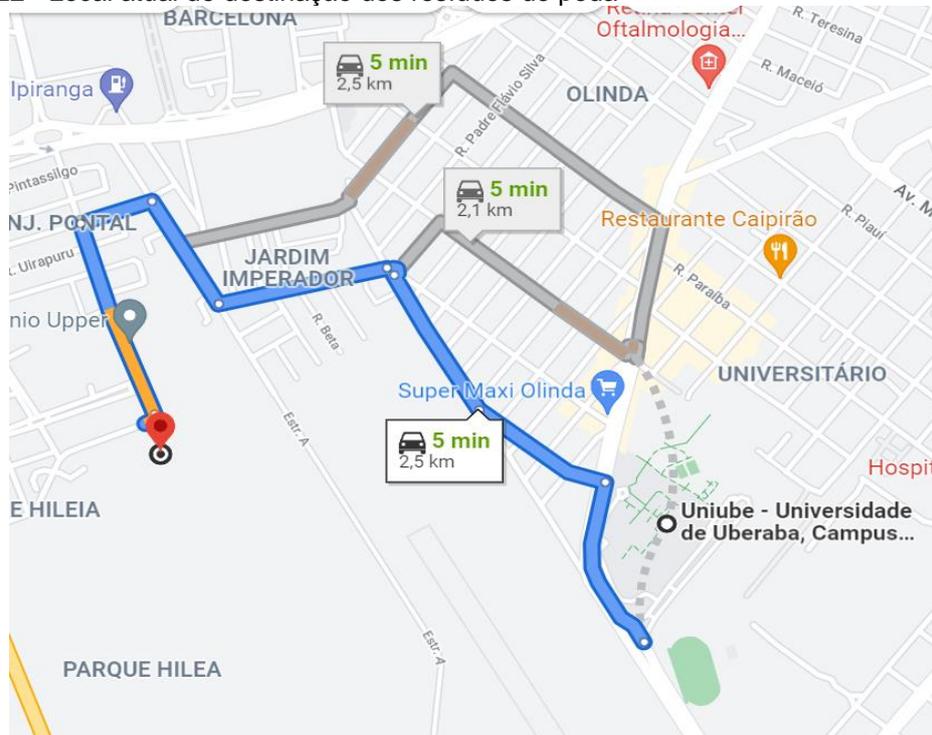
Figura 21- A esquerda, área de compostagem com material lançado; a direita valeta preparada para receber material.



Fonte: O Autor.

Atualmente os resíduos de poda gerados no Campus Aeroporto são destinados em terreno próprio da universidade distante cerca de 2,5 km.

Figura 22 - Local atual de destinação dos resíduos de poda



Fonte: Google – Maps

Esta logística tem se demonstrado bastante ineficiente e dispendiosa, uma vez que envolve o mão-de-obra para o carregamento, transporte, transbordo e descarga. Além disso, envolve custos com transporte, veículos, combustíveis, motorista etc. Por último, a atividade ainda exige a ocupação de uma área que poderia ter outra destinação, uma vez que os volumes ali depositados - por não ser uma compostagem com manejo adequado - tem seu tempo de retenção e decomposição estendidos. Não se avalia atualmente o impacto ambiental do atual manejo e nem os custos envolvidos.

Conforme apresentado na revisão bibliográfica, há várias possibilidades para a destinação dos resíduos de poda, que vão desde o seu descarte em aterros, queima direta ou aplicação de técnicas mais modernas, onde pode-se obter melhores resultados no que tange ao aproveitamento destes resíduo. O próximo item apresenta, de acordo com o volume de resíduos gerados no local de estudo e sua tipologia, as principais possibilidade de aproveitamento energético deste material.

5.3 TECNOLOGIAS APLICÁVEIS AO ESTUDO DE CASO – CAMPUS AEROPORTO – UNIUBE

Conforme avaliado durante as pesquisas que embasaram este trabalho, todos os processos de conversão da biomassa seriam possíveis de serem aplicados no estudo de caso em questão. No entanto, fatores como os volumes produzidos, uma avaliação prévia de custos (expostas nas bibliografias consultadas), tecnologias disponíveis, espaço necessário para armazenamento e montagem da planta de conversão, levaram a optar por tecnologias que possuam capacidade de conversão compatível com a demanda energética do Campus e demandem menor espaço para operação. Optou-se ainda por tecnologias que possam ser adaptadas a variação da biomassa produzida, bem como a fatores de umidade variáveis. Desta maneira, foram escolhidas as seguintes tecnologias: Densificação, gaseificação, pirólise e digestão anaeróbia.

5.3.1 Densificação

A densificação é um processo de conversão da biomassa bastante interessante, em especial pelos aspectos de baixo custo e robustez dos equipamentos envolvidos, somado a facilidade de manutenção e operação.

O cálculo do potencial energético através da rota de densificação, compreendeu a avaliação das tecnologias de produção de pellets e briquetes a partir dos resíduos de poda coletados anualmente no local de estudo, desta maneira, esta avaliação se deu com base no potencial energético da lenha, informado na Tabela 6, retirada do Balanço Energético Nacional do ano de 2021 (MME, 2021), e análise comparativa dos resultados obtidos por Petricoski (2017).

Tabela 6 - Coeficientes de Equivalência médios para os combustíveis sólidos

| Multiplicar por Toneladas de: | Giga-caloria | tep (10 ⁴ kcal/kg) | bep | tec (7000kcal/kg) | Giga-joule | 10 ⁶ BTU | Megawatt-hora (860kcal/kWh) |
|-------------------------------|--------------|-------------------------------|------|-------------------|------------|---------------------|-----------------------------|
| Lenha | 3,1 | 0,310 | 2,18 | 0,443 | 12,98 | 12,30 | 3,61 |

Fonte: Adaptado de EPE (2021)

Conforme pode ser observado na tabela 6, temos que:

$$1 \text{ kg de lenha} = 7000 \text{ kcal/kg} \times 0,443;$$

$$1 \text{ kg de lenha} = 3.101 \text{ kcal ou } 12,98 \text{ MJ};$$

A diferença de 12,98MJ (da lenha) para 16,165MJ⁷ (dos pellets) se demonstra bastante coerente, visto que a lenha tem umidade e volumetria maior se comparada com pellets ou briquetes que sofreram o processo de densificação, demonstrando a concentração energética dada pela diminuição de volumes e perda de umidade.

O potencial energético estimado por esta rota de conversão, baseado no volume de resíduos gerados anualmente no local de estudo, se dá por:

$$Pe = \frac{\rho_{RPU}}{\rho_{PD}} \times P_{RPU-A} \times 16,165 \text{ MJ/kg} \quad (1)$$

$$Pe = \frac{144.300 \text{ kg}}{2600 \text{ m}^3} \times 144.300 \text{ kg/ano} \times 16,165 \text{ MJ/kg}$$

⁷ PCI determinado por (PETRICOSKI, 2017) para amostra formada 100% por resíduos de poda.

$$Pe = 107.883 \text{ MJ/ano}$$

Onde:

Pe – Potencial energético em MJ;

ρ_{RPU} – Densidade dos resíduos de poda coletados no local de estudo kg/m^3 (calculada pelo autor);

ρ_{PD} – Densidade média dos produtos de densificação (Pellets ou Briquetes) kg/m^3 (NOGUEIRA; LORA, 2003);

$P_{\text{RPU-A}}$ – Peso anual dos resíduos de poda da área de estudo (kg/ano).

Outra vantagem da densificação é a significativa redução volumétrica dos resíduos de poda. Comparando a densidade dos resíduos de poda *in natura* verificada neste trabalho, que foi de $55,5 \text{ kg/m}^3$, com a de Nogueira e Lora (2003), que encontrou que os produtos produzidos a partir dos mesmo tipo de resíduos aqui analisados podem chegar a 1.200 kg/m^3 , temos que com o processo de densificação seria possível a redução de até 95% do volume gerado. Isso significa que, no caso dos resíduos de poda gerados pela universidade, passaríamos de um volume $2.600 \text{ m}^3/\text{ano}$ para apenas $120,25 \text{ m}^3/\text{ano}$.

5.3.2 Gaseificação

Para avaliação do potencial energético a ser obtido pelo processo de gaseificação, a partir da quantificação dos resíduos gerados no Campus universitário em estudo, será adotada a metodologia exposta no Item 4.4.3, a qual será adequada para possibilitar a aplicação do volume anual de resíduos de poda gerados e sua disponibilidade para o processo de gaseificação.

Considerações:

A transformação do RPU (Resíduos de Poda Urbana) em CDR (Combustível Derivado de Resíduo) se dá:

$$\text{CDR} = P_{\text{RPU}} * 0,8$$

Onde:

P_{RPU} - Peso de resíduos de poda gerados anualmente: 144.300 kg/ano.

0,8 = Fator estimado em virtude do tipo de RPU gerado no local de análise.

Assim, o fluxo de massa (em kg/h) de resíduo pode ser encontrado por:

$$V_{\text{resíduo}} = \frac{CDR}{(52\text{semanas} \times 5\text{dias} \times 3\text{horas})^8}$$

$$V_{\text{resíduo}} = 148 \text{ kg/h.}$$

Considerando operação em horário de ponta, e um PCI = 4.300 kcal/kg (CORTEZ, 2011), temos:

$$Ee = (V_{\text{resíduo}}) \times (PCI_{\text{resíduo}}) \quad (5)$$

$$Ee = 148 \text{ kg/h} \times 4.300\text{kcal/kg}$$

$$Ee = 636.400 \text{ kcal/h}$$

Vazão volumétrica:

$$Q = \frac{Ee}{PCI_{\text{syngas}}} \quad (6)$$

$$Q = \frac{636.400\text{kcal/h}}{1160\text{kcal/Nm}^3}$$

$$Q = 548.62 \text{ Nm}^3/\text{h}$$

Considerando as mesmas premissas expostas no Atlas de Bioenergia do Estado de São Paulo (COELHO et al., 2020), onde o gás de síntese produzido será direcionado para um motogerador ciclo Otto diesel, preferencialmente *dual-fuel*, a

⁸ Período definido pela distribuidora e aprovado pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica para toda sua área de concessão, considerando a curva de carga de seu sistema elétrico e composto por 3 (três) horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos, terça-feira de carnaval, sexta-feira da Paixão, Corpus Christi e feriados definidos por lei federal.

potência elétrica do gás de síntese no motogerador pode ser determinada pela equação (7).

$$P = \frac{(Q) \times (PCI_{\text{syngas}}) \times (\eta)}{\text{fator de conversão}} \times (\text{FC}_{\text{motor}}) \quad (7)$$

$$P = \frac{548.62 \frac{\text{Nm}^3}{\text{h}} \times \frac{1160 \text{kcal}}{\text{Nm}^3} \times 0,288}{860000} \times 1$$

$$P = 0,21 \text{ MW.}$$

Desta maneira é possível estimar a geração de energia elétrica do RSU através da transformação termoquímica com sistema de gaseificação, por meio da equação (8):

$$E = P \times \text{Fcarga} \times \text{Tempo de operação} \quad (8)$$

$$E = 0,21 \times 0,9 \times 3$$

$$E = 0,57 \text{ MWh/dia}$$

O gaseificador utilizado neste modelo tem eficiência estimada em 28%, o que seria suficiente para suprir cerca de 30% do Campus em questão, em horário de ponta. No entanto, como demonstrado por Nogueira e Lora (2003), a estudos que apontam que a aplicação da tecnologia BIG/GT, pode gerar uma eficiência para o sistema de gaseificação maior que 40%. Outras tecnologias ainda em desenvolvimento podem obter resultados ainda melhores, como é o caso de sistema de gaseificação associado a células combustíveis, os quais podem chegar até 80% de eficiência (NOGUEIRA; LORA, 2003).

5.3.3 Pirólise

A conversão da biomassa gerada no Campus universitário e sua conversão em energia pelo método de pirólise em forno de micro-ondas, se demonstra particularmente interessante neste caso, pois há disponibilidade do equipamento no local de estudo. A avaliação do potencial energético se dá pela análise do poder calorífico inferior do material de entrada no forno, já considerado a conversão de RPU em CDR.

$$E = M_{rsu} \times 0,35 \times PCI \quad (11)$$

$$E = 144.300\text{kg} \times 0,35 \times 4300\text{kcal/kg}$$

$$E = 217.171.500\text{kcal}$$

$$E = 909.200\text{MJ/ano}$$

No entanto, estudo desenvolvido por (MORAIS et al., 2017), para a tecnologia de conversão em análise, avalia que para cada tonelada de eucalipto alimentado no forno de micro-ondas, existe possibilidade de geração de 5,6 MW de energia térmica a partir do carvão produzido. Levando em conta o consumo de energia do forno de micro-ondas de 1,4 MWh por tonelada de carvão e considerando um equipamento para conversão elétrica com eficiência de 40%, tal como observado no trabalho de Morais et al. (2017), teríamos uma potência elétrica disponível de 2,24MWh. Desta forma, temos que o balanço energético é positivo em cerca de 0,84 MWh por tonelada de carvão. Assumido que o PCI do carvão de eucalipto⁹ é cerca de 14% maior que o aqui avaliado, temos que por tonelada de Carvão de RPU poderíamos ter o equivalente a 0,72 MWh.

Avaliando ainda que, segundo o fabricante do equipamento, a conversão da biomassa em carvão é da ordem de 45% da massa inicial, determinamos que haveria uma disponibilidade energética por esta rota de conversão e tecnologia, de cerca de 46,8 MWh ao ano. Tal volume significaria uma economia anual de aproximadamente 3,0% dos custos com energia, conforme pode ser observado na Tabela 7.

A pirólise ainda gera subprodutos que podem ser aproveitados ou produzidos a depender da técnica empregada, pirólise lenta, rápida ou flash que pode produzir além do carvão, gás, bio-óleos e outros produtos químicos de grande valor.

5.3.4 Biodigestão anaeróbia

⁹ Tal como disponível na “Tabela 3: Poder calorífico da madeira e do carvão vegetal dos materiais genéticos estudados (kcal.kg-1)” (MORAIS et al., 2017).

Para avaliação do potencial energético da conversão dos resíduos de poda pela tecnologia de biodigestão anaeróbia, foi considerado que estes resíduos são compostos por 100% de matéria orgânica. Considerando as informações obtidas no formulário aplicado e as considerações apresentadas no Atlas de Bionergia do estado de São Paulo, do ano de 2020 (COELHO et al., 2020), temos:

$$V_{\text{biogás}} = \text{MOR}_{\text{RSU}} * F_{\text{MO}} \quad (2)$$

$$V_{\text{biogás}} = 1 * 101,5 \text{ Nm}^3_{\text{biogás}} / \text{t} * 144,3 \text{ t}$$

$$V_{\text{biogás}} = 14.646,45 \text{ Nm}^3 / \text{ano}$$

$$V_{\text{biom}} = \frac{V_{\text{biogás}} * (\text{Con.CH}_4)}{\%_{\text{metano}}_{\text{biometano}}} \quad (3)$$

$$V_{\text{biom}} = \frac{14.646,45 \text{ Nm}^3 * 0,55}{0,97}$$

$$V_{\text{biom}} = 8.304,68 \text{ Nm}^3 / \text{ano}$$

$$EE = \frac{(V_{\text{biogas}} * \text{Con.CH}_4 * \text{PCI}_{\text{CH}_4} * \text{Ef.}_{\text{ele}})}{1000} \quad (4)$$

$$EE = \frac{(8.304,68 * 0,55 * 9,97 * 0,35)}{1000}$$

$$EE = 15,94 \text{ MWh} / \text{ano}$$

5.3.5 Compilação dos resultados

A Tabela 7 demonstra o potencial identificado para aproveitamento dos resíduos vegetais gerados do Campus universitário em análise. Desta maneira, foi avaliado que o consumo anual de energia para período compreendido entre agosto de 2020 a setembro de 2021 (12 meses), foi de 1.441MWh, conforme pode ser observado na conta de energia constante no Anexo A.

Tabela 7 - Análise do potencial energético dos resíduos de poda por tecnologia de conversão.

| Biodigestão | Densificação | Gaseificação | Pirólise |
|-------------|--------------|--------------|----------|
|-------------|--------------|--------------|----------|

| | | | | |
|---|---|--|--|---|
| Potencial (volume) | 14.646,45Nm ³ /ano | 120,25 m ³ de pellets | 548.62 Nm ³ _{Syngas} /h | 65m ³ |
| Potencial energético | 57.384 MJ/ano | 107.883 MJ/ano | 196.560 MJ/ano | 909.200 MJ/ano |
| Potencial de geração de eletricidade | 15,94 MWh/ano | 29,97 MWh/ano | 54,6 MWh/ano | 46,8MWh/ano |
| Possível uso final | Produção de eletricidade para abastecimento de chiller de 75TR ¹⁰ no horário de ponta. | Aquecimento da piscina olímpica e da piscina acadêmica. Substituição do gás GLP do refeitório. | Produção de eletricidade para abastecimento de Campus em horário de ponta em dois meses ano. | Produção de eletricidade para abastecimento de Campus em horário de ponta em dois meses do ano. |
| Economia financeira anual projetada ¹¹ | R\$ 19.224,24 | R\$ 36.144,94 | R\$ 65.849,65 | R\$ 56.442,55 |
| % relativo ao consumo de energia | 1,1% | 2,1% | 3,8% | 3,2% |

Considerando os custos anuais com energia elétrica do Campus, objeto deste estudo, o qual nos últimos 12 meses ficou em torno de R\$ 1.890.000,00, temos uma economia variando de 1,1% a 3,8% ano a depender da tecnologia adotada. No entanto, se observarmos a tabela abaixo, veremos que para conversão dos resíduos de poda em energia, o fator custo é um limitador importante a ser considerado.

Tabela 8 - Custo das tecnologias para conversão de biomassa em energia elétrica

| Tecnologia | Eficiência % | Custo US\$/kW | Capacidade kW |
|---|--------------|---------------|---------------|
| Motores Stirling ¹² | >30 | 2000-5000 | <40 |
| Gaseificadores e motores alternativos | 20 | 1200 | 5 a 1000 |
| Células a combustível | 80 | 3000-4000 | <250 |
| Gaseificador e microturbina a gás ¹³ | >30 | 2500 | >200 |

Fonte: Adaptado de (NOGUEIRA; LORA, 2003).

Das tecnologias avaliadas, a produção de pellets se apresenta como uma alternativa potencial sobretudo pela redução do volume de resíduos gerados, diminuição da logística atualmente empregada e possibilidade de armazenamento de energia para aplicação futura.

¹⁰ TR - Toneladas de refrigeração, medida de potência de refrigeração.

¹¹ Baseado no valor médio do kWh de R\$ 1,21 pago pela universidade.

¹² Consiste em um motor alternativo a pistão movido por uma fonte externa de calor.

¹³ Avaliação baseada em valores obtidos durante o curso na apresentação de trabalho para disciplina - Uso de biomassa, biodigestores e biogás

6. CONCLUSÕES

Este trabalho foi motivado pelos conhecimentos adquiridos neste curso de pós-graduação, que apresentou novas possibilidades de geração de energia através de fontes renováveis. Este fato, somado à observação dos volumes de resíduos de poda gerados no Campus, objeto deste estudo, e sua atual logística de descarte, levou a este trabalho que buscou avaliar o potencial energético da conversão destes resíduos em energia.

Apesar da significativa produção de resíduos de poda e de manutenção do campus, a economia gerada pelo aproveitamento energético desses resíduos demonstrou-se financeiramente inviável devido aos investimentos necessários para implementação das tecnologias. Mesmo a tecnologia de pirólise em micro-ondas, que já está implantada no Campus, se demonstra inviável, pois ela em si, é fonte de energia primária, necessitando de outros dispositivos para conversão em energia elétrica ou mesmo térmica.

Ressalta-se que este trabalho buscou avaliar somente os resíduos que poderiam ser mensurados e para os quais possuíam formas de registro. No entanto, como apresentado, há um volume significativo de resíduos florestais de maior monta, que não foram aqui contabilizados. Deve ainda ser mencionado, que além dos resíduos de poda, o Campus gera volume significativo de resíduos orgânicos na forma de restos de alimentos, papéis, serragens, maravalhas e outros resíduos que poderiam incrementar significativamente a produção energética sobretudo pela rota de gaseificação ou mesmo pelo sistema de biodigestão.

O desenvolvimento deste trabalho bem como a análise bibliográfica, traz a convicção de que o caminho para o máximo aproveitamento energético passará sem dúvida pelas rotas de conversão dos resíduos sólidos urbanos em energia, sua aplicação na geração distribuída, pelo desenvolvimento e aperfeiçoamento das tecnologias existentes de conversão destes resíduos em energia e sua contribuição para mitigação de emissões de gases de efeito estufa.

Conclui-se, portanto, que apesar do volume significativo de resíduos gerados no local de estudo, este ainda é baixo para viabilizar a produção energética, uma vez que a economia gerada através da energia produzida varia entre 1,1% e 3,8% ao ano a depender da tecnologia aplicada e o investimento necessário para conversão dos resíduos de poda em energia é bastante alto conforme demonstrado na

Tabela 8. Com isso evidencia-se a inviabilidade da conversão dos resíduos de poda em energia elétrica.

A densificação dos resíduos de poda gerados e sua conversão em pellets pode reduzir em até 95% o resíduo gerado, demonstrando bom potencial de implantação, pois traria a possibilidade de armazenamento do RPU, com consequente ganho energético e possibilidade de aplicação futura.

Apesar da evidenciação de que os volumes de resíduos avaliados neste estudo não são suficientes para justificar financeiramente a implantação de sistemas de conversão dos resíduos gerados em energia no Campus em análise, este estudo colabora como ponto de partida para que a Universidade perceba o potencial energético contido nos resíduos de poda produzidos por ela, e estenda esta análise aos outros resíduos gerados em suas unidades. Desta maneira, novas parcerias e projetos de pesquisa poderiam ter um leque significativo de oportunidades, para que o meio acadêmico desenvolvesse novos e inovadores projetos baseados na produção de energia a partir dos resíduos sólidos.

Sendo a Universidade formadora de opinião e centro de inovação regional, ela poderia fomentar junto ao poder público a busca por desenvolvimento de políticas públicas voltadas a viabilização de projetos com vistas ao aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos. Desta maneira, a Universidade poderia ter papel de destaque na proposição de políticas de saneamento mais sustentáveis, visando a correta destinação dos resíduos sólidos municipais e da microrregião do vale do Rio Grande, o que certamente seria um caminho mais sustentável e com grande potencial de desenvolvimento econômico e tecnológico, se contrapondo aos atuais sistemas de coleta e destinação final dos resíduos sólidos urbanos.

7. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

Visto a geração de resíduos em outros setores do Campus estudado, como na área de saúde, marcenaria, resíduos florestais de eucaliptos de uma área plantada dentro da área da Universidade, etc. Sugere-se a análise da possibilidade de aproveitamento energético utilizando todos os resíduos gerados pelo local. A economia gerada pela utilização da energia de resíduos é outro ponto a ser estudado.

Uma outra possibilidade de estudo é a avaliação do processo de compostagem com manejo adequado e buscando novas técnicas para aceleração do processo, propiciando desta maneira a produção de composto orgânico, o qual poderia ser comercializado. Desta forma, os resíduos deixariam de ser um passivo ambiental para se tornar um ativo financeiro.

Por fim, um estudo passível de realização é a da mitigação de emissões de gases de efeito estufa pelo aproveitamento energético dos resíduos gerados pelo campus, já que atualmente os resíduos são dispostos em locais da própria universidade e em aterros sanitários.

REFERÊNCIAS

- ABIOGAS, A. B. DO B. E DO B.-. POTENCIAL BRASILEIRO DE BIOGÁS 2020. **Potencial Brasileiro de Biogás**, p. 28, 2020.
- ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE**, p. 51, 2020.
- ACHINAS, S.; ACHINAS, V.; EUVERINK, G. J. W. A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. **Engineering**, v. 3, n. 3, p. 299–307, 2017.
- ARCGIS. **ArcGis**, 2021. Disponível em: <<https://www.arcgis.com/home/webmap/viewer.html>>
- ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb. **Annual Book of ASTM Standards**, v. 87, n. E711-87, p. 1–8, 2004.
- ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. Ultimate analysis of coal and coke. **Annual Book of ASTM Standards**, v. 89, n. D3176, p. 1–4, 2009.
- ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. Standard Test Methods for Analysis of Wood Fuels E870 - 82. **Annual Book of ASTM Standards**, v. 82, n. E870-82, p. 1–2, 2011.
- ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels 1. **Annual Book of ASTM Standards**, v. 82, n. E871-82, p. 2, 2014.
- ASTM-AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIAL. Standard Test Method for Ash in Biomass. **Annual Book of ASTM Standards**, v. 25, n. E1755- 01, p. 1–3, 2015.
- BRASIL, R. F. DO. **Política Nacional de Resíduos Sólidos** Brasil, 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>
- BRIDGWATER, A. V.; BRIDGE, S. A. A Review of Biomass Pyrolysis and Pyrolysis Technologies. **Biomass Pyrolysis Liquids Upgrading and Utilization**, p. 11–92, 1991.
- BUENO, F. DE S. et al. Avaliação da produção de biogás e do potencial energético dos resíduos orgânicos provenientes do restaurante universitário da each – usp. 2016.
- CARDOZO, B. C.; MANNARINO, C. F.; FERREIRA, J. A. Análise do monitoramento ambiental da incineração de resíduos sólidos urbanos na Europa e a necessidade de alterações na legislação brasileira. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 26, n. 1, p. 123–131, 2021.
- CIBIOGAS. **BiogasData**. Disponível em: <<https://mapbiogas.cibiogas.org/>>. Acesso em: 7 nov. 2021.
- COELHO, S. T. V. P. G. et al. **Atlas de bioenergia do Estado de São Paulo**. 1. ed. São Paulo: [s.n.].
- CORTEZ, C. L. et al. **Compostagem de resíduos de poda urbana** Nota tecnica IX **COMPOSTAGEM DE RESÍDUOS DE PODA URBANA**. [s.l: s.n.].

- CORTEZ, C. L. et al. Alternativa Sustentável Para Utilização De Resíduos De Poda Provenientes Da Manutenção Das Redes De Distribuição De Energia Elétrica. p. 1–10, 2008.
- CORTEZ, C. L. **Estudo Do Potencial De Utilização Da Biomassa Resultante Da Poda De Árvores Urbanas Para a Geração De Energia : Estudo De Caso : Aes Eletropaulo.** [s.l.] USP-Universidade de São Paulo, 2011.
- CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GOMEZ, E. O. **Biomassa para Energia.** 2. ed. Campinas: Unicamp, 2009.
- DEGANUTTI, R. et al. Biodigestores rurais: modelo indiano, chinês e batelada. **Encontro De Energia No Meio Rural**, v. 4, n. Campinas, p. 1–5, 2002.
- DEUBLEIN, D.; STEINHAUSER, A. **Biogas from Waste and Renewable Resources.** Weinheim: [s.n.].
- EPE-EMPRESA DE PESQUISA. Balanço energético nacional. 2021.
- FERNANDEZ, Y.; ARENILLAS, A.; ANGEL, J. Microwave Heating Applied to Pyrolysis. **Advances in Induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials**, 2011.
- FERREIRA, L. R. A. et al. Review of the energy potential of the residual biomass for the distributed generation in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, n. c, p. 440–455, 2018.
- GARCIA, D. P.; CARASCHI, J. C.; VENTORIM, G. CARACTERIZAÇÃO ENERGÉTICA DE PELLETS DE MADEIRA. **Congresso de Bioenergia**, n. 7, p. 6, 2012.
- JAHIRUL, M. I. et al. Biofuels production through biomass pyrolysis- A technological review. **Energies**, v. 5, n. 12, p. 4952–5001, 2012.
- JANONE, L.; BARRETO, E. **Risco de apagões no Brasil é maior entre outubro e novembro, dizem pesquisadores.** Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/risco-de-apagoes-no-brasil-e-maior-entre-outubro-e-novembro-dizem-pesquisadores/>>. Acesso em: 27 out. 2021.
- JOHANSSON, T. B. et al. Renewable Fuels and Electricity for a Growing World Economy: Defining and Achieving the Potential. **Energy Studies Review**, v. 4, n. 3, p. 201–212, 1993.
- JÚNIOR, A. F. D. et al. Potencial energético de sete materiais genéticos de Eucalyptus cultivados no Estado do Rio de Janeiro. **Scientia Forestalis/Forest Sciences**, v. 43, n. 108, p. 833–843, 2015.
- JUNIOR, F. D. A. D. S. **Ação das micro-ondas no lodo orgânico de abatedouros de aves.** [s.l.] UNIUBE-Universidade de Uberaba, 2018.
- KAZA, S. et al. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050.** Washington, DC: © World Bank, 2018.
- KUMAR, S. et al. Rapid composting techniques in Indian context and utilization of black soldier fly for enhanced decomposition of biodegradable wastes - A comprehensive review. **Journal of Environmental Management**, v. 227, n. September, p. 189–199, 2018.
- KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. DO. **Fundamentos da digestão**

anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato. Concordia - SC: [s.n.].

LINO, F. A. M.; ISMAIL, K. A. R. Evaluation of the treatment of municipal solid waste as renewable energy resource in Campinas, Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 29, n. October 2016, p. 19–25, 2018.

MACCARINI, A. C.; BESSA, M. R.; ERRERA, M. R. Energy valuation of urban pruning residues feasibility assessment. **Biomass and Bioenergy**, v. 142, n. December 2019, p. 105763, 2020.

MME/EPE. Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos - NOTA TÉCNICA DEA 18/14. **Recursos Energéticos**, p. 50, 2014.

MORAIS, A. DOS S. et al. Quantificação E Qualificação De Produtos Gerados No Processo Ondatec De Produção De Carvão Vegetal Por Micro-Ondas. p. 107–115, 2017.

MOUSTAKAS, K.; PARMAXIDOU, P.; VAKALIS, S. Anaerobic digestion for energy production from agricultural biomass waste in Greece: Capacity assessment for the region of Thessaly. **Energy**, v. 191, p. 116556, 2020.

NASCIMENTO, M. C. B. et al. Estado da arte dos aterros de resíduos sólidos urbanos que aproveitam o biogás para geração de energia elétrica e biometano no Brasil. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 24, n. 1, p. 143–155, 2019.

NOGUEIRA, L. A. H.; LORA, E. **Dendroenergia: Fundamentos e Aplicações**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003.

OLIVER, A. DE P. M. et al. Manual de treinamento em biodigestão. **Instituto Winrock**, p. 23, 2008.

ONDATEC. **Forno de microndas**Uberaba-MG, 2021. Disponível em: <<http://www.ondatec.com/produtos/upec-250/capacidade-de-producao-por-upec>>

PAQUES. **BIOPAQ®IC - Tratamento de Efluentes Industriais**. Disponível em: <BIOPAQ®IC - Tratamento de Efluentes Industriais>. Acesso em: 7 nov. 2021.

PETRICOSKI, S. M. Briqueletes Produzidos Com Mistura De Podas Urbanas, Glicerina E Resíduos De Processamento De Mandioca. p. 83 folhas, 2017.

SHI, Y. et al. Garden waste biomass for renewable and sustainable energy production in China: Potential, challenges and development. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 22, p. 432–437, 2013.

SILVA, D. P. DA. Avaliação do processo de adensamento de resíduos de poda de árvore visando ao aproveitamento energético: o caso do campus da USP na capital. p. 124, 2016.

SOUZA, C. A.; GUIMARÃES, C. C.; VELASCO, G. D. N. **Reaproveitamento de resíduos de poda e sua colaboração para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. São paulo: 2020

SOUZA, N. R. D. DE; ALENCAR, L. S.; MAZZONETTO, A. W. Potencial Energético Do Resíduo Das Podas De Árvores No Município De Piracicaba – Sp. **Energia Na Agricultura**, v. 31, n. 3, p. 237, 2016.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia Renovável: Hidráulica, Biomassa, Eólica, Solar, Oceânica**. I ed. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2016.

WILHELM, D. J.; KAM, A. Y.; STALLINGS, J. W. Energy from biomass and wastes. **Energy from biomass and wastes**, v. 65, n. V, p. 651–682, 1981.

APÊNDICE A – Questionários aplicados para avaliação da geração de resíduos.

15/09/2021 19:52

Avaliação da geração de resíduos de poda Campus Aeroporto

Avaliação da geração de resíduos de poda Campus Aeroporto

1. Cargo

Encarregado de jardinagem

2. Área de atuação

jardinagem

3. Tempo de trabalho na instituição

20 anos (22-05-2001)

4. Qual o volume de resíduos de poda é gerado semanalmente no Campus Aeroporto?

Marcar apenas uma oval.

10 m³

25m³

50 m³

Outro:

5. Quais os tipos de resíduos gerados?

folhas, galhos, troncos, grammas, sementes e flores.

6. Quais espécies vegetais geram o resíduo?

árvores, ferracões e arbustos

7. Há variação no volume de resíduos gerados em função dos períodos seco e úmido?

Sim, altera quantidade e peso

8. Como é o planejamento de poda e coleta de resíduos? Qual a periodicidade?

A poda é feita praticamente o ano todo (galhos secos, poda de limpeza nas árvores e arbustos e gramados e limpeza nos bequias de folhas e floração secas).

9. Qual a destinação final do resíduo?

- Descarte feito de folhas é feito na zona neutra campus aeroporto e quando tem transporte o descarte é feito no chá cara nessa beira de beirões no parque hiteia.
- troncos e galhos somente no parque hiteia.

10. Quantas pessoas estão envolvidas na coleta, transporte e descarga do resíduo?

- 10 colaboradores coletam
- 4 colaboradores p/ carregar e descarregar.

11. Qual a distancia para destinação do resíduo?

3 Km.

Maria Aparecida de Paiva Ladeira

Este conteúdo não foi criado nem aprovado pelo Google.

Google

Avaliação da geração de resíduos de poda Campus Aeroporto

1. Cargo

Eng. Agrônomo

2. Área de atuação

Jardinagem

3. Tempo de trabalho na instituição

17 anos

4. Qual o volume de resíduos de poda é gerado semanalmente no Campus Aeroporto?

Marcar apenas uma oval.

10 m³

25m³

50 m³

Outro:

5. Quais os tipos de resíduos gerados?

Folhas secas, podas de grama, podas de galhos, sebes

6. Quais espécies vegetais geram o resíduo?

grama batatais / Sete Copas / Sibipiruna / Oiti / Flamboyam

ANEXO A – Conta de energia



Cemig Distribuição S.A. CNPJ 04.561.180/0001-14 / Ins. Estadual 082.502196.0887
Av. Bertazzoni, 1.232 - 17º andar - Ala A1 - CEP 30199-131 - Belo Horizonte - MG

Acesse o Cemig Atende
www.cemigatende.com.br

Emergências: 0800 723 2627
Tarifa Social de Energia Elétrica - TSEE foi criada pela
Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002

| | | |
|--|---|--|
| SOCIEDADE EDUCACIONAL UBERABENSE AV NENE SABINO 1801 CO SANTOS DUMONT 38050-501 UBERABA, MG CNPJ 25.452.301/0002-68 | Nº DO CLIENTE 7000005881 | Nº DA INSTALAÇÃO 3010393335 |
| | Referência a SET/2021 | Vencimento 08/10/2021 |

NOTA FISCAL - CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA - SÉRIEU - Nº065553736 - PTA Nº45.000014006.81

| | | | | |
|----------------------------|---|---|---|--------------------------------------|
| Classe Comercial | Subclasse Outros serviços e outras atividades | Modalidade Tarifária TUSD Livre A4 Azul | Datas de Leitura Anterior 31/08 Atual 30/09 Próxima 31/10 | Data de Emissão 01/10/2021 |
|----------------------------|---|---|---|--------------------------------------|

| | | | | |
|----------------------------|--|--|--|--|
| Informações de faturamento | | | | |
| [REDACTED] | | | | |

| | | | |
|---|--------------------------|-------------------|---------------------|
| Informações Gerais Tarifa vigente conforme Res Anel nº 2.877, de 25/05/2021. ICMS aplicado conforme Lei nº 21.781/15. Pela legislação tributária, os descontos a que se refere o Decreto Federal 7.891/13 também integram a base de cálculo do ICMS, PASEP e COFINS. Considerar nota fiscal quitada após débito em sua cic. AGENTE DE RELACIONAMENTO: SAMUEL C. S. PINTO E-MAIL: SAMUEL.PINTO@cemig.com.br | Valores Faturados | | |
| | Descrição | Quantidade | Tarifa/Preço |
| Componente Fio kW HFP | 663 | | |
| Componente Fio kW HFP s/ ICMS | 237 | | |
| Componente Fio kW HP | 578 | | |
| Componente Fio kW HP s/ ICMS | 422 | | |
| Componente Encargo kWh HFP | 150,285 | | |
| Componente Encargo kWh HP | 24,622 | | |
| Encargos/Cobranças | | | |
| Contrib. Ilum Pública Municipal | | | |

| | | | |
|--|-------------|---|-------------|
| NOTIFICAÇÃO DE DÉBITO(S) Até 01/10/2021 constava(m) o(s) seguinte(s) débito(s) vencido(s): | | | |
| Mês/Ano | Valor (R\$) | Débitos que sujeitam ao corte: Mês/Ano | Valor (R\$) |
| Prev. Corte | | | |
| A religação estará condicionada à inexistência de débitos vencidos na unidade consumidora. | | | |

| | | | | | |
|-----------------------------|-----|-----|--------|---------|----|
| Histórico de Consumo | | | | | |
| Mês/Ano | HP | HFP | HP | HFP | HR |
| SET20 | 578 | 663 | 24.622 | 150.285 | 0 |
| AGO21 | 418 | 513 | 17.835 | 114.583 | 0 |
| JUL21 | 213 | 282 | 9.388 | 83.222 | 0 |
| JUN21 | 291 | 353 | 13.080 | 93.009 | 0 |
| MAY21 | 295 | 401 | 13.993 | 101.434 | 0 |
| ABR21 | 319 | 441 | 10.926 | 95.139 | 0 |
| MAR21 | 367 | 535 | 12.472 | 109.532 | 0 |
| FEB21 | 436 | 547 | 14.453 | 102.653 | 0 |
| JAN21 | 417 | 516 | 9.541 | 105.708 | 0 |
| DEZ20 | 439 | 578 | 15.128 | 109.431 | 0 |
| NOV20 | 420 | 516 | 17.709 | 121.535 | 0 |
| OUT20 | 426 | 557 | 17.935 | 123.207 | 0 |
| SET20 | 371 | 526 | 16.050 | 113.450 | 0 |

| | | | |
|--|------------------------------|---------------------|--------------------|
| Reservado ao Fisco 4BEF.2FD6.04D8.2D8B.C080.B7FB.9128.2AEB | | | |
| | Base de cálculo (R\$) | Alíquota (%) | Valor (R\$) |
| ICMS | 64.314,73 | 18,00 | 11.576,54 |
| PASEP | 76.063,75 | 0,65 | 494,38 |
| COFINS | 76.063,75 | 3,02 | 2.297,11 |

Quilômetro CEMIG: 0800 723 2626 - Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL - Telefone: 197 - Ligação gratuita de telefones fixos móveis



Pague pelo PIX



| | | | |
|--|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|
| Código de Débito Automático 000088188487 | Instalação 3010393335 | Vencimento 08/10/2021 | Total a pagar [REDACTED] |
|--|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|

8360000880-2 75040138000-1 39767085011-4 00088188487-3



Setembro/2021
ATENÇÃO:
DÉBITO AUTOMÁTICO