

unesp  **UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

GYOVANA VIVIAN FERREIRA DA SILVA

**CICLO DE COGERAÇÃO A PARTIR DE RESÍDUOS DE PODA DE
ÁRVORES NA CIDADE DE GUARATINGUETÁ**

Guaratinguetá
2014

GYOVANA VIVIAN FERREIRA DA SILVA

CICLO DE COGERAÇÃO A PARTIR DE RESÍDUOS DE PODA DE ÁRVORES NA
CIDADE DE GUARATINGUETÁ

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para a obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.


Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri

S586c	<p>Silva, Gyovana Vivian Ferreira da Ciclo de cogeração a partir de resíduos de poda de árvores na cidade de Guaratinguetá / Gyovana Vivian Ferreira da Silva – Guaratinguetá, 2014. 55 f : il. Bibliografia: f. 51-55</p> <p>Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014. Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri</p> <p>1. Ciclo Rankine Orgânico 2. Biomassa 3. Poda de árvores urbanas 4. Cogeração I. Título</p> <p style="text-align: right;">CDU 536.72</p>
-------	--


Giovana Vivian Ferreira da Silva

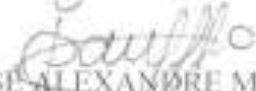
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
"GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA"

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA


Prof. Dr. ANTONIO WAGNER FORTI
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALISTIERI
Orientador/UNESP-FEG


Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI
UNESP-FEG


Prof. Dr. ALEX MENDONÇA BIMBATO
UNESP-FEG

Dezembro de 2014

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à Deus.

Ao meu professor orientador, José Antonio Perrella Balestieri, pela oportunidade, pela amizade e paciência em orientar, motivar e educar. Obrigada por depositar a confiança em mim.

À minha mãe, Viviane Ferreira, que sempre lutou pela minha educação, sem medir esforços, e foi meu apoio durante muitas situações.

Ao meu pai, Cássio Calil, que sempre esteve ao meu lado, sempre acreditou no meu potencial, e me apoiou incondicionalmente. Sem ele nada disso se tornaria realidade.

Ao meu irmão, José Calil, à minha vó, Izabel Ferreira e à minha grande amiga Ana Paula Sales, por todo o carinho amor e torcida ao longo de todos esses anos.

Aos meus amigos de faculdade e de sala, Julia Capuchinho, Pasqual Barretti e Raphael Polydoro que me acompanharam nesta trajetória sempre me motivando e me encorajando, jamais me deixaram desistir.

Às meninas da república, Ingrid Brás, Raíssa Hitomi, Priscila Carvalho, Brunna Pereira, Juliana Quirino, Mariana Agurto e Camila Dourado, que me ensinaram o convívio social, um muito obrigada por tudo.

Aos amigos da faculdade, Sylvia Leite, Daniel Toniolo, Aude Germano, Bruno Montemor, William Aires, Bruna Nunes, Giovanni Colombo, obrigada pelo companheirismo nesses cinco anos de convívio.

Aos amigos de fora, Mariana Bomfim, Mariana Guidoni, Rafaela Altran, Bruno Benevides, Diego Langerhorst e Rodolfo Machado, muito obrigada pela amizade e apoio, foram fundamentais em muitos momentos.

Um agradecimento especial ao meu amigo Pedro Barreto, que sempre me motivou, e me apoiou no estudo do segmento de energia, obrigada pelas conversas e discussões, foram de extrema relevância e importância na minha vida.

Agradeço por fim, aos professores da UNESP do campus de Guaratinguetá pela dedicação e pelo conhecimento compartilhado.

SILVA, G. V. F. **Ciclo de cogeração a partir de resíduos de poda de árvores na cidade de Guaratinguetá.** 2014. 55 f. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

RESUMO

A atual situação socioeconômica trouxe uma necessidade de procurar formas alternativas de obter energia que permitam diminuir a forte dependência das fontes de combustíveis fósseis e ao mesmo tempo desviar das mudanças climáticas que surgem da consequência do uso desses recursos energéticos. As fontes renováveis de energia baixa e média temperatura aparecem como recursos energéticos de elevado potencial que terão uma influência importante no modo de vida das pessoas ao permitir a produção de energia descentralizada. No Brasil, em especial, vê-se também a necessidade de descentralizar a matriz energética, atualmente concentrada na energia proveniente de fonte hídrica. A crise hídrica atual, exemplifica a situação de urgência em apostar em outras fontes de energia, como uma forma auxiliar em situações de emergência, como a atual. Por esse motivo, este estudo avalia a real possibilidade de aplicação da mesma como fonte térmica em um Ciclo Rankine Orgânico onde ao invés de água, utiliza-se fluidos térmicos como fluido de trabalho. Comparou-se as áreas urbanas da cidade de Guaratinguetá com a área urbana da região metropolitana de São Paulo, estabeleceu-se dois cenários e definiu-se também o PCI da biomassa, através de estudo literário. Com isso, foi possível então estabelecer o ciclo a ser utilizado.

PALAVRAS-CHAVE: Ciclo Rankine Orgânico. Biomassa. Poda de árvores urbanas. Cogeração.

SILVA, G. V. F. Cogeneration cycle from tree pruning waste in the city of Guaratinguetá. 2014. 55 f. Graduate work (Graduation in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2014.

ABSTRACT

The current socio-economic situation has brought a need to look for alternative ways to get energy that allow reducing the high dependence on fossil fuel sources while deflect from the climate change arising from the result of the use of these energy resources. Renewable sources of energy, low and medium temperature appear as high potential of energy resources, which have a major influence on the way of life of the people to enable decentralized energy production. In Brazil, in particular, have also the need to decentralize the energy grid, currently focused on energy from water source. The current water crisis, exemplifies the urgency of betting on other energy sources, as a way to help in emergency situations such as the current one. Therefore, this study evaluates the possibility of using biomass as a heat source in a Rankine Cycle Organic where instead of water; it uses thermal fluid as working fluid, was compared the urban areas of the city of Guaratinguetá with the urban area of the metropolitan region of São Paulo. Thus, it was established two scenarios, so it was possible to establish the cycle to be used.

KEYWORDS: Organic Rankine Cycle. Biomass. Pruning of urban trees. Cogeneration.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz de consumo final de energia nos anos de 1973 e 2006.	10
Figura 2 - Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa vegetais lenhosos.	16
Figura 3 - Fluxograma: geração de resíduos x processo de briquetagem.	20
Figura 4 - Dados gerais cidade de Guaratinguetá.	25
Figura 5 - Ciclo CRO simples.	32
Figura 6 - Comparação entre o rendimento do CRO e outras máquinas térmicas para diferentes gamas de potência.	34
Figura 7 - Diagrama T-s dos tipos de fluidos orgânicos.	35
Figura 8 - Diagrama T-s do fluido R123.	40
Figura 9 - Diagrama T-s do fluido R245fa.	40
Figura 10 - Diagrama T-s do fluido n-Pentano.	41
Figura 11 - Arranjo do ciclo.	42
Figura 12 - Janela de programação EES - workfluid R245fa.	45
Figura 13 - Valores termodinâmicos calculados – Workfluid 245fa.	45
Figura 14 - Valores termodinâmicos calculados – Workfluid n-pentano.	46
Figura 15 - Valores termodinâmicos calculados – Workfluid n-pentano.	46
Figura 16 - Média mensal de renda familiar, número de moradores por residência e consumo de energia por residência em cada região geográfica.	49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Consumo de combustíveis a base de madeira em 2005 (PJ).....	11
Tabela 2 - Resultados das análises de poder calorífico em base seca.	28
Tabela 3 - Resultados das análises físico-químicas.....	29
Tabela 4 - Médias das massas específicas aparentes (ρ_{ap} kg m ⁻³)	30
Tabela 5 – Vazão mássica para os cenários estabelecidos.	31
Tabela 6 - Disponibilidade térmica calculada	31
Tabela 7 – Propriedades dos fluídos orgânicos.	36
Tabela 8 - Dados termodinâmicos dos três fluídos de trabalhos abordados no trabalho.	39
Tabela 9 - Resultados finais (workfluid R245fa)	47
Tabela 10 - Resultados finais (workfluid N-Pentano).....	47
Tabela 11 - Resultado final de trabalho líquido, e quantidade de casas abastecidas com a energia produzida.....	49

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	10
1.1	Informações Gerais de Biomassa	10
2	OBJETIVOS.....	13
3	CONCEITOS.....	14
3.1	A biomassa	14
3.2	Fontes de biomassa.....	14
3.2.1.	Papel, celulose e resíduos industriais	14
3.2.2.	Resíduos florestais.....	14
3.2.3.	Resíduos urbanos de madeira	15
3.2.4.	Cultivos Energéticos.....	15
3.3.	Processos de conversão energética da biomassa	15
3.3.1.	Combustão Direta:.....	16
3.3.2.	Gaseificação:	17
3.3.3.	Pirólise.....	17
3.4.	Processos de Pré-Tratamento da Biomassa	18
3.4.1.	Secagem:.....	18
3.4.2.	Torrefação:.....	18
3.4.3.	Briquetes:.....	19
3.4.4.	Péletes:.....	20
3.4.5.	Trituração:	20
4	RESÍDUOS URBANOS	21
4.1.	Definições.....	21
4.2.	Podas de árvores e seus problemas.....	23
5	PANORAMA LOCAL DE PODA DE ÁRVORES.....	25
5.1.	Poder Calorífico.....	27
5.2	Calor Disponível.....	29
6	CICLO RANKINE ORGÂNICO	32
6.1	Comparação entre o ciclo de Rankine convencional e o CRO.....	33
6.2.	Escolha do fluido de trabalho	35
6.3	Máquina de expansão	37
7	MÉTODO	39

8	RESULTADOS	45
10	REFERÊNCIAS	51

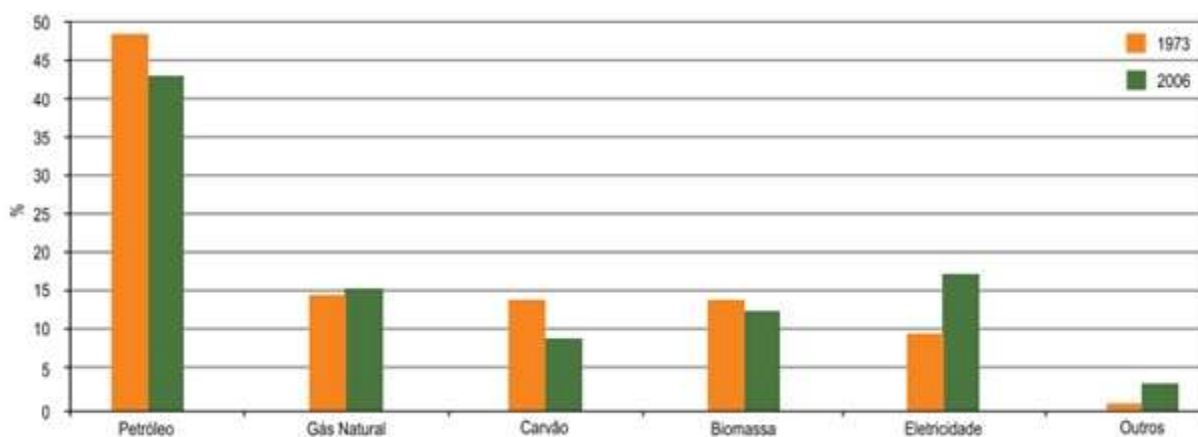
1 INTRODUÇÃO

1.1 Informações Gerais de Biomassa

A biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Dela é possível obter energia elétrica e biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol, cujo consumo é crescente em substituição a derivados de petróleo como o óleo diesel e a gasolina.

Se atualmente a biomassa é uma alternativa energética de vanguarda, historicamente tem sido pouco expressiva na matriz energética mundial. Ao contrário do que ocorre com outras fontes, como carvão, energia hidráulica ou petróleo, a biomassa não tem sido contabilizada com precisão. As estimativas mais aceitas indicam que representa cerca de 13% do consumo mundial de energia primária, como mostra o gráfico da Figura 1 (IEA, 2008). Um dos mais recentes e detalhados estudos publicados a este respeito no mundo, o Survey of Energy Resources 2007 do World Energy Council (WEC), registra que a biomassa respondeu pela produção total de 183,4 em 2005, o que correspondeu a um pouco mais de 1% da energia elétrica produzida no mundo naquele ano.

Figura 1 - Matriz de consumo final de energia nos anos de 1973 e 2006.



Fonte: IEA, 2008

Segundo Hall(1992) e McGowan(1991) a biomassa é o quarto combustível mais consumido no mundo e fornece aproximadamente 14% da necessidade de energia; a

biomassa é a fonte mais importante nos países em desenvolvimento suprimindo aproximadamente 35% da necessidade de energia.

A pequena utilização e a imprecisão na quantificação são decorrências de uma série de fatores. Um deles é a dispersão da matéria-prima – qualquer galho de árvore pode ser considerado biomassa, que é definida como matéria orgânica de origem vegetal ou animal passível de ser transformada em energia térmica ou elétrica. Outro fator é a pulverização do consumo, visto que ela é muito utilizada em unidades de pequeno porte, isoladas e distantes dos grandes centros. Finalmente, um terceiro fator é a associação deste energético ao desflorestamento e à desertificação – um fato que ocorreu no passado, mas que está bastante atenuado.

Algumas regiões obtêm grande parte da energia térmica e elétrica que consomem desta fonte, principalmente do subgrupo madeira – o mais tradicional – e dos resíduos agrícolas. A característica comum dessas regiões é a economia altamente dependente da agricultura. O estudo do WEC mostra que, em 2005, a Ásia foi o maior consumidor mundial, ao extrair da biomassa de madeira 8.393 PJ, dos quais 7.795 PJ foram provenientes da lenha, como apresentado na Tabela 1.1 (IEA, 2007).

Tabela 1 - Consumo de combustíveis a base de madeira em 2005 (PJ)

País	Lenha	Carvão vegetal	Licor negro	Total
África	5.633	688	33	6.354
América do Norte	852	40	1.284	2.176
Países da América Latina e Caribe	2.378	485	288	3.150
Ásia	7.795	135	463	8.393
Europa	1.173	14	644	1.831
Oceania	90	1	22	113
Total	17.921	1.361	2.734	22.017

Fonte: IEA.2007

Uma das principais vantagens da biomassa é que, embora de eficiência reduzida, seu aproveitamento pode ser feito diretamente, por intermédio da combustão em fornos e caldeiras. Para aumentar a eficiência do processo e reduzir impactos socioambientais, tem-se desenvolvido e aperfeiçoado tecnologias de conversão mais eficientes, como a gaseificação e a pirólise, também sendo comum a cogeração em sistemas que utilizam a biomassa como fonte energética.

A médio e longo prazo, a exaustão de fontes não-renováveis e as pressões ambientalistas poderão acarretar maior aproveitamento energético da biomassa. Atualmente, a biomassa vem sendo cada vez mais utilizada na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração e no suprimento de eletricidade para demandas isoladas da rede elétrica.

No Brasil, a imensa superfície do território nacional, quase toda localizada em regiões tropicais e chuvosas, oferece excelentes condições para a produção e o uso energético da biomassa em larga escala. Além da produção de álcool, queima em fornos, caldeiras e outros usos não-comerciais, a biomassa apresenta grande potencial no setor de geração de energia elétrica.

2 OBJETIVOS

O objetivo do presente trabalho foi de realizar a análise técnica de um ciclo COR para o aproveitamento energético de resíduos urbanos, neste caso, podas de árvores urbanas da cidade de Guaratinguetá, não se realizando a avaliação econômica à presente proposta.

Analisou-se o potencial de resíduos de poda de árvore para a cidade de Guaratinguetá. O volume da disponibilidade de poda de árvore foi calculado com base comparativa a área metropolitana de São Paulo.

Fez-se uma análise de quantas casas, em média, seria possível abastecer com a potência gerada pelo ciclo e analisou a viabilidade dos resultados.

3 CONCEITOS

3.1 A biomassa

De acordo com o atlas da Energia Elétrica do Brasil a definição de biomassa é todo tipo de matéria orgânica que pode ser transformada em um desses três tipos de energia: Mecânica, Elétrica ou Térmica. A biomassa também é uma forma indireta de aproveitamento da luz solar pois ocorre a fotossíntese (MMA,2013).

A biomassa para fins energéticos e também para geração de energia elétrica, está entre as fontes de maior variedade em relação a sua origem, natureza, tecnologia de conversão e produtos energéticos.

Existem diversas rotas para a biomassa energética, com muitas fontes - que vão desde os resíduos agrícolas, industriais e urbanos até as culturas plantadas exclusivamente para a obtenção de biomassa. Os processos de conversão são os mais diversos possíveis e incluem desde a simples combustão para a obtenção da energia térmica até processos físico-químicos e bioquímicos complexos para a obtenção de combustíveis líquidos e gasosos (MMA, 2013).

3.2 Fontes de biomassa

3.2.1. Papel, celulose e resíduos industriais

A maior fonte de energia a partir da madeira é o produto de resíduos da indústria de papel e celulose, chamado de licor negro. Operações de corte e processamento são capazes de gerar grandes quantidades de resíduos de biomassa. Processamento de madeira produz serragem e um conjunto de cascas, galhos e folhas. A fábrica de papel, que consome grande quantidade de energia elétrica, utiliza os resíduos de polpa para gerar energia para o seu próprio processo (CARDOSO, 2012).

3.2.2. Resíduos florestais

A colheita florestal é uma importante fonte de biomassa para energia. A colheita pode ocorrer como desbaste em povoamentos jovens, ou corte em povoamentos mais velhos de madeira ou celulose, que também produz topos e ramos utilizáveis para geração

de energia. Operações de colheita geralmente podem remover apenas 25 a 50 por cento do volume, deixando os resíduos disponíveis como biomassa para energia. Plantações danificadas por insetos, doença ou incêndios são outras fontes de biomassa (CARDOSO, 2012).

3.2.3. Resíduos urbanos de madeira

Tais resíduos consistem em gramados e árvores cortadas, troncos de árvores inteiras, palhetes de madeira e quaisquer outros resíduos de construção e demolição, feitos a partir de madeira serrada. O material lenhoso rejeitado pode ser colhido após um projeto de construção ou demolição e transformado em coberturas, adubo ou usado para abastecer usinas de geração de energia (CARDOSO, 2012).

3.2.4. Cultivos Energéticos

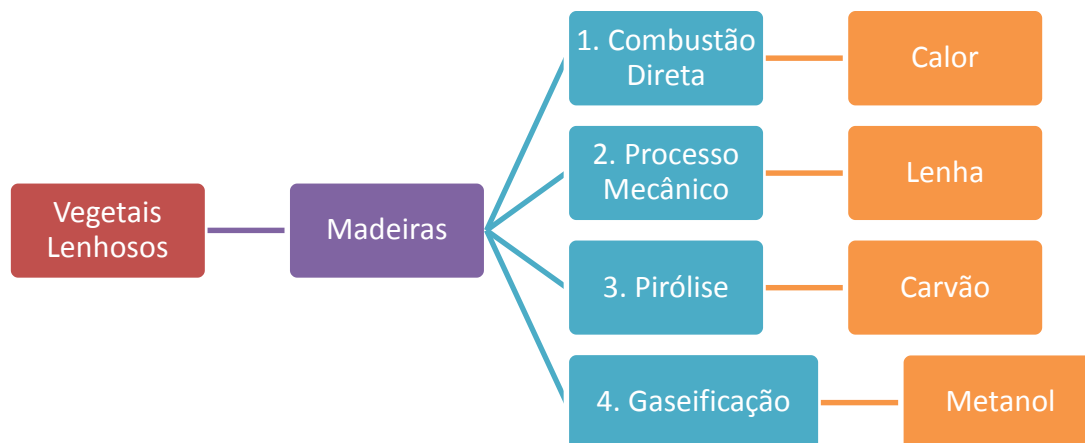
Os cultivos energéticos são outra fonte de biomassa lenhosa para energia. Estes cultivos são plantas de crescimento rápido, árvores ou outra biomassa herbácea que são colhidas especificamente para a produção de energia. Cultivos de rápido crescimento, cultivos local e específico do solo foram identificados fazendo uso de bioengenharia.

Cultivos energéticos de herbáceas são colhidos anualmente, depois de tomar dois a três anos para atingir a plena produtividade. Estes incluem pastos como gramas, capim elefante, bambu, sorgo doce, grama seca.

3.3. Processos de conversão energética da biomassa

O tratamento da biomassa residual é formado por uma série de operações conhecidas como operações unitárias, que removem as substâncias desejáveis, ou as transformam em outras substâncias mais aceitáveis. Dessa forma, os níveis de tratamento se classificam em tratamento preliminar, primário, secundário e terciário. O tratamento secundário utiliza-se de processos biológicos, ou seja, reações bioquímicas realizadas por microrganismos para remover a matéria orgânica presente na biomassa residual (FERNANDES et al., 2011). Na Figura 2, encontram-se alguns processos de conversão energética da biomassa vegetais lenhosos.

Figura 2 - Diagrama esquemático dos processos de conversão energética da biomassa vegetais lenhosos.



Fonte: BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL, 1982

3.3.1. Combustão Direta:

Combustão é a transformação de energia química dos combustíveis em calor, por meio das reações dos elementos constituintes com o oxigênio fornecido. Para fins energéticos, a combustão direta ocorre essencialmente em fogões (cocção de alimentos), fornos (metalurgia, por exemplo), e caldeiras (geração de vapor, por exemplo). Embora muito prático, e às vezes, conveniente, o processo de combustão direta é normalmente muito ineficiente. Outro problema da combustão direta é a alta umidade (20% ou mais no caso da lenha) e a baixa densidade energética do combustível (lenha, palha, resíduos etc), o que dificulta o seu armazenamento e transporte (INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY, 2006).

Há uma ampla variedade de tecnologias de combustão, a maior parte das quais encontra-se comercialmente disponível. A escolha da tecnologia segue uma ordem de critérios, tais como tamanho da instalação e características do combustível, por exemplo.

A seguir são apresentados três tipos de tecnologias diferentes de combustão direta:

“Woods Stoves”¹- São usados para aquecimento doméstico. Podem ser alimentados manualmente, usando principalmente briquetes de madeiras, ou alimentados automaticamente, usando péletes.

“Entrained combustion”²- A câmara de combustão é alimentada pneumáticamente. Parte do ar de transporte é utilizado como agente oxidante. Este princípio requer pequenas partículas de combustível (máx.d 5 x 5 x 5 mm). Devido ao grande excesso de ar, um elevado volume de gás de combustão será produzido causando uma eficiência relativamente baixa.

“Grate burners”³- Estão comercialmente disponíveis em diferentes modelos, tais como grelha fixa, grelhas vibrantes e grelhas móveis. “Grate burners” são adequados para uma ampla gama de combustíveis, e também, são usados para a combustão de resíduos domésticos.

3.3.2. Gaseificação:

Como o próprio termo indica, gaseificação é um processo de conversão de combustíveis sólidos em gasosos, por meio de reações termoquímicas, envolvendo vapor quente e ar, ou oxigênio, em quantidades inferiores à estequiometria (mínimo teórico para combustão). Há vários tipos de gaseificadores, com grandes diferenças de temperatura e/ou pressão. Os mais comuns são os reatores de leito fixo e de leito fluidizado. O gás resultante é uma mistura de monóxido de carbono, hidrogênio, metano, dióxido de carbono e nitrogênio, cujas proporções variam de acordo com as condições do processo, particularmente se é ar ou oxigênio que está sendo usado na oxidação.

3.3.3. Pirólise

A pirólise é um processo térmico que utiliza altas temperaturas para quebrar os resíduos, é o mais antigo e simples dos processos de conversão de um combustível sólido em outro de melhor qualidade e conteúdo energético (ATLAS, 2008). Este processo consiste no aquecimento do material original entre 300° C e 900° C, na “quase ausência” de ar, até a extração do material volátil. Obtém-se como resultado um gás combustível,

¹ Não foi possível encontrar tradução adequada.

² Não foi possível encontrar tradução adequada.

³ Não foi possível encontrar tradução adequada.

produtos líquidos (alcatrão e ácido piro-lenhoso) e uma substância carbonosa que pode ser convertido em carvão ativado (ABREU, 2010).

A pirólise pode ser dividida em pirólise lenta ou convencional e pirólise rápida. O processo tradicional de realizar-se a pirólise conhecido como pirólise lenta se caracteriza por realizar-se a baixas taxas de aquecimento ($^{\circ}\text{C}/\text{s}$) e elevados tempos de residência (dependente do próprio processo). Este processo visa maximizar o rendimento de carvão vegetal, à custa de minimizar as quantidades de bio-óleo e gás (ABREU, 2010).

3.4. Processos de Pré-Tratamento da Biomassa

A biomassa que será utilizada como combustível normalmente não pode ser utilizada da forma como se encontra disponível, necessita-se de algum tratamento termomecânico para seu uso eficaz. Os tratamentos mais utilizados e eficazes são: Secagem, torrefação, briquetes, péletes e trituração.

3.4.1. Secagem:

O processo de secagem remove a água contida na biomassa através da evaporação por troca de calor, removendo a umidade presente na biomassa.

É um processo dividido em três períodos causados pelas transferências simultâneas de calor e de massa decorrentes na biomassa.

3.4.2. Torrefação:

Pode ser definida como um processo de pré-carbonização, o qual se desenvolve justamente na fase endotérmica da pirólise, entre 250 e 300 $^{\circ}\text{C}$.

Resulta-se um material intermediário entre a biomassa e o carvão, tem como objetivo concentrar energia da biomassa em um produto formado em pouco tempo, baixas taxas de aquecimento e temperaturas moderadas, permitindo reter os voláteis de maior poder calorífico no próprio produto.

3.4.3. Briquetes:

Quando pequenas partículas de material sólido são prensadas para formar blocos de forma definidas e de maior tamanho, o processo é denominado de briquetagem.

Através deste processo, os finos de materiais diversos, subprodutos do beneficiamento industrial, são convertidos em produtos de maior valor comercial. A briquetagem é uma forma eficiente de concentrar energia disponível na biomassa, levando-se em consideração a densidade a granel e o poder calorífico obtido após o processo de briquetagem (MINISTÉRIO DE ENERGIA E MINAS, 2008).

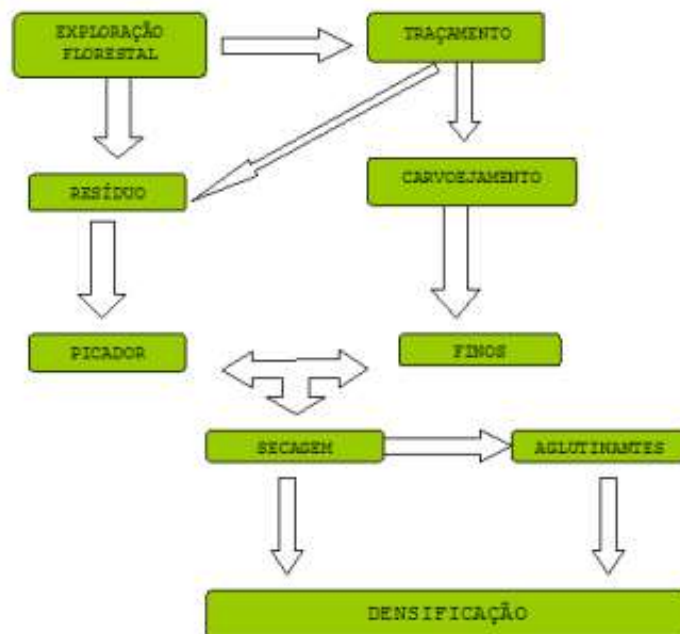
Vantagens:

- Podem ser usados diretamente em caldeiras, lareiras, padarias, pizzarias, cerâmicas, etc, sem que seja necessária nenhuma adaptação na fornalha;
- São produzidos em tamanhos padrões: no formato de cilindros ou bolachas;
- Fornecidos em embalagens padronizadas;
- Produto higiênico sem os inconvenientes da lenha;
- Espaço de armazenagem reduzido, possibilitando assim a manutenção de estoques reguladores e de emergência;
- Sua combustão propicia uma regularidade térmica na fornalha.

(MINISTÉRIO DE ENERGIA E MINAS, 2008)

Uma exemplificação das etapas do processo de briquetagem é apresentada na Figura 3, a seguir.

Figura 3 - Fluxograma: geração de resíduos x processo de briquetagem.



FONTE: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Florestas, 2006.

3.4.4. Péletes:

Os péletes são bastante similares aos briquetes, de mesmo formato se diferenciando apenas nas dimensões. Também são produzidos a partir de resíduos florestais e agroindustriais, com processo de fabricação semelhante ao dos briquetes. (MINISTÉRIO DE ENERGIA E MINAS, 2008)

3.4.5. Trituração:

A trituração é um pré-requisito para vários processos de reaproveitamento de produtos, dentre os quais se destaca a utilização da biomassa para fins energéticos. Este processo torna-se necessário quando se visa à redução de tamanho a dimensões pequenas, proporcionando uma melhor alimentação na fornalha com aumento significativo da área do combustível.

4 RESÍDUOS URBANOS

4.1. Definições

A Associação Brasileira de Normas Técnicas define resíduos sólidos como sendo resíduos nos estados sólido e semissólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível (ABNT, 2004).

A ABNT classifica estes resíduos em:

a) resíduos classe I – Perigosos: Apresentem periculosidade:

- risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices;
- riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

ou características como inflamabilidade ou patogenicidade.

b) resíduos classe II – Não perigosos: Resíduos não tóxicos tais como, resíduos de restaurantes (resto de alimento), sucata de metais ferrosos, sucata de metais não ferrosos (latão), resíduo de papel e papelão, resíduos de plástico polimerizado e resíduos de borracha.

c) resíduos classe II A – Não inertes: Aqueles que não se enquadram nas classificações de *resíduos classe I - Perigosos* ou de *resíduos classe II B- Inertes*, nos termos desta Norma.

Estes resíduos não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. (ABNT, NBR 10004 - Resíduos Sólidos, p. 5, 2004)

d) resíduos classe II B – Inertes: Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor. (ABNT, 2004)

Já a lei Nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, título III, capítulo I, classifica os resíduos sólidos:

I - quanto à origem:

- a) Resíduos domiciliares: os originários de atividades domésticas em residências urbanas;
- b) Resíduos de limpeza urbana: os originários da varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana;
- c) Resíduos sólidos urbanos: os englobados nas alíneas "a" e "b";
- d) Resíduos de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos nas alíneas "b", "e", "g", "h" e "j";
- e) Resíduos dos serviços públicos de saneamento básico: os gerados nessas atividades, excetuados os referidos na alínea "c";
- f) Resíduos industriais: os gerados nos processos produtivos e instalações industriais;
- g) Resíduos de serviços de saúde: os gerados nos serviços de saúde, conforme definido em regulamento ou em normas estabelecidas pelos órgãos do Sisnama e do SNVS;
- h) Resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis;

- i) Resíduos agrossilvopastoris: os gerados nas atividades agropecuárias e silviculturais, incluídos os relacionados a insumos utilizados nessas atividades;
- j) Resíduos de serviços de transportes: os originários de portos, aeroportos, terminais alfandegários, rodoviários e ferroviários e passagens de fronteira;
- k) Resíduos de mineração: os gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios;

II - quanto à periculosidade:

- a) Resíduos perigosos: aqueles que, em razão de suas características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade, carcinogenicidade, teratogenicidade e mutagenicidade, apresentam significativo risco à saúde pública ou à qualidade ambiental, de acordo com lei, regulamento ou norma técnica;
- b) Resíduos não perigosos: aqueles não enquadrados na alínea "a". Parágrafo único. Respeitado o disposto no art. 20, os resíduos referidos na alínea "d" do inciso I do caput, se caracterizados como não perigosos, podem, em razão de sua natureza, composição ou volume, ser equiparados aos resíduos domiciliares pelo poder público municipal.

Então se concluí que segundo a PNRS a poda de árvore se enquadra em resíduos sólidos urbanos não perigosos, e de acordo com as normas da ABNT para resíduos sólidos é classificada como resíduo de Classe II A, não inertes.

4.2. Podas de árvores e seus problemas

A arborização urbana é importante em vista das consequências para melhoria do microclima, estética das cidades, controle das poluições sonora, visual e atmosférica. De acordo com Mello Filho (1985), as principais funções da arborização urbana são: função química – absorção do gás carbônico e liberação do oxigênio, melhorando a qualidade do ar urbano; função física – oferta de sombra, absorção de ruídos e proteção térmica; função paisagística – quebra da monotonia da paisagem pelos diferentes aspectos e texturas;

função ecológica – abrigo e alimento aos animais e função psicológica – bem estar às pessoas proporcionado pelas áreas verdes (CORTEZ et al. 2008).

A falta de locais apropriados para a disposição dos resíduos provenientes da poda de árvores e também de resíduos sólidos em geral, e o custo elevado das técnicas para seu tratamento constituem-se em um dos maiores e principais problemas enfrentados atualmente (CORTEZ et al. 2008).

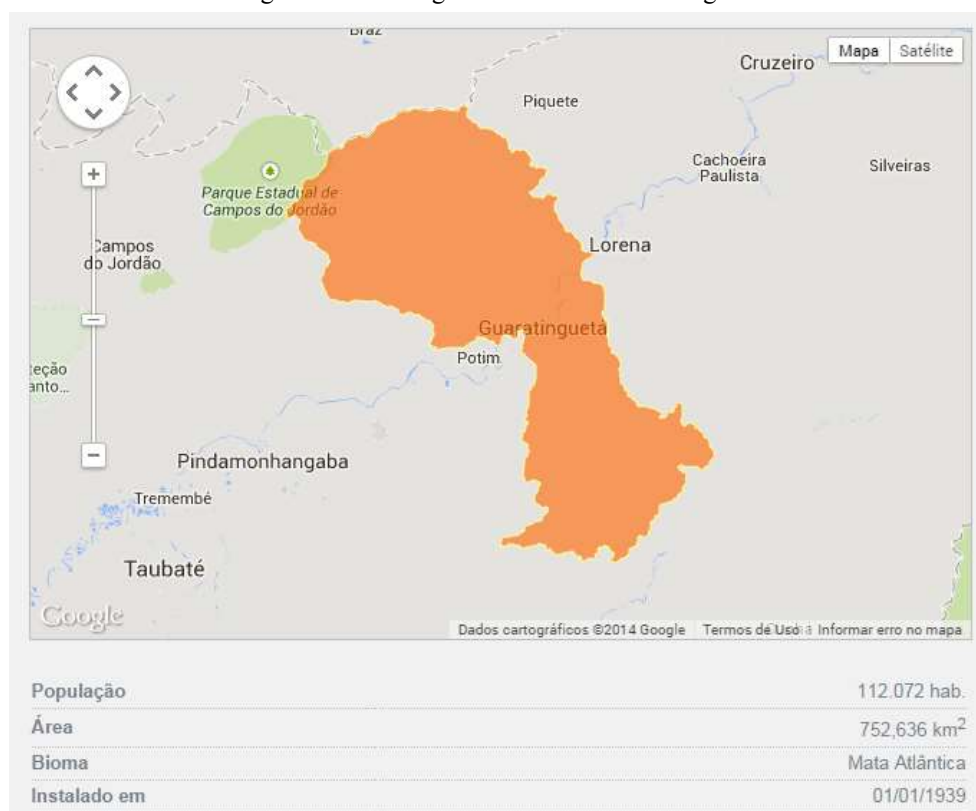
Em 2007, o projeto de Pesquisa e Desenvolvimento “Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda e remoção de árvores na área de concessão da AES Eletropaulo”, realizado pela AES em parceria com o Centro Nacional de Referência em Biomassa (Cenbio), estimou a quantidade de resíduos de poda urbana gerados na área de concessão da AES Eletropaulo, principal distribuidora de energia elétrica do estado de São Paulo (CORTEZ et al., 2008).

Como dito anteriormente, segundo a NBR 10.004/2004 os resíduos de poda podem ser classificados como resíduos sólidos classe II, que são resíduos não perigosos, não tóxicos. Mesmo assim, sabe-se que a disposição deste tipo de resíduos em locais abertos como lixões ou aterros podem provocar uma série de problemas, pois estes se misturam a outros resíduos preexistentes (como por exemplo substâncias perigosas e materiais biológicos biodegradáveis), que interagem química e biologicamente, como um reator, causando impactos sobre a qualidade do ar, do solo, e da água, segundo Cortez et al (2008).

5 PANORAMA LOCAL DE PODA DE ÁRVORES

A proposta deste trabalho, é calcular o quanto de energia seria possível produzir utilizando ciclo Rankine orgânico a partir do resíduo urbano de podas de árvore da cidade de Guaratinguetá. Segundo o IBGE (2010) a cidade tem como população 112.072 habitantes em uma área de 753 km² sendo 25,72 km² de área urbana (BASSANELLI, SD).

Figura 4 - Dados gerais cidade de Guaratinguetá



FONTE: IBGE (2010)

As podas de árvores urbanas visam basicamente conferir à árvore uma forma adequada durante o seu desenvolvimento (poda de formação); eliminar ramos mortos, danificados, doente ou praguejados (poda de limpeza); remover partes da árvore que colocam em risco a segurança das pessoas (poda de emergência); e extrair partes de árvores que interferem ou causam danos incontornáveis às edificações ou aos equipamentos urbanos (poda de adequação) (SVMA, 2005).

Os governos municipais são os responsáveis pela execução dos serviços de poda de árvores, bem como pela gestão e destinação dos resíduos gerados. Os municípios principalmente os localizados nos grandes centros urbanos, necessitam atingir o

equilíbrio entre a urbanização e a arborização, uma vez que esta é importante pelas ações de melhoria do microclima, de controle das poluições sonora, visual e atmosférica, de proteção térmica, de abrigo e alimento aos animais, de quebra da monotonia da paisagem pelos diferentes aspectos e texturas e pela estética das cidades (MELLO FILHO, 1985).

Entretanto, a convivência entre as redes de distribuição de energia elétrica e a arborização é um dos grandes desafios para as prefeituras e concessionárias de energia elétrica nos diversos estados brasileiros. Na maioria das vezes, este problema se agrava pelo fato de que a arborização e as implantações dos sistemas elétricos de distribuição são planejadas e realizadas de forma independente, o que resulta em uma disputa entre as árvores e as redes de distribuição pelo mesmo espaço físico (VELASCO, 2003). Assim há a necessidade de poda dessas árvores, para que seja permitida a coexistência da vegetação, sem causar prejuízos aos serviços de distribuição de energia elétrica (PALERMO JR, 1987).

Desta forma as concessionárias de energia elétrica realizam os serviços de poda das árvores que interferem na rede de distribuição elétrica, para que não haja interferência na qualidade do serviço oferecido à população (CORTEZ, 2011). De acordo com Cenbio (2007a), de uma amostra de dezesseis municípios atendidos pelas principais concessionárias de energia elétrica do país, aproximadamente, 70% descartava os resíduos de poda em lixões ou aterros sanitários.

Toma-se então como base para este trabalho o projeto de P&D AES Eletropaulo – CENBIO, 2007. Constatou-se no mesmo que na região metropolitana de São Paulo e a grande ABC geravam 41575 m³/ano de resíduos de poda de árvore (CENBIO, 2007). Estima-se que a região metropolitana da Grande São Paulo tenha 20.284.891 habitantes (Seade - *Fundação Sistema Estadual de Análise de Dados*, 2014) e uma área urbana de 2200 km² (IBGE, 2010). Fazendo uma análise comparativa, levando em conta o parâmetro área urbana, obtêm-se que para a cidade de Guaratinguetá estaria disponível cerca de 486 m³/ano de resíduos provenientes da poda de árvore urbana.

$$\text{Volume} = \frac{25,72 \text{ km}^2 \text{ de área úrbana}}{2200 \text{ km}^2 \text{ área úrbana}} \times 41575 \frac{\text{m}^3}{\text{ano}} = 486 \frac{\text{m}^3}{\text{ano}} \quad (1)$$

5.1. Poder Calorífico

O Poder Calorífico é a quantidade de energia por unidade de massa liberada na oxidação de um determinado combustível, é normalmente expresso em $\frac{kJ}{kg}$.

Segundo Sonntag, Borgnakke e van Wylen (2003) o termo poder calorífico leva um complemento, sendo ele superior ou inferior. O Poder Calorífico Superior é aquele em que a água presente nos produtos oriundos da combustão se apresenta no estado líquido. Por outro lado, a quantidade de calor transferida no processo de combustão em que a água presente nos produtos está no estado vapor é chamada de Poder Calorífico Inferior (VICENTINI, 2011).

O cálculo do poder calorífico é obtido a partir da diferença dos valores de entalpia dos produtos e dos reagentes da combustão dividido pela massa molar do combustível, como pode ser observado abaixo na equação (2) (VICENTINI, 2011).

$$PC = \frac{-(H_P - H_R)}{M} \quad (2)$$

O projeto de P&D AES ELETROPAULO (CENBIO, 2007) quantificou o poder calorífico e as propriedades físico-químicas de resíduos de poda de árvore a partir de análises amostrais. As amostras foram preparadas da seguinte maneira: as folhas (juntamente com seus galhos mais finos) foram retiradas dos galhos principais constituindo a amostra “Material 1”. Os galhos principais, isto é material lenhoso constituiu a amostra de “Material 2”. A amostra “Material 3” era formada da mistura de galhos e folhas (CORTEZ, 2011).

As análises do poder calorífico foram feitas pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT) e as propriedades físico-químicas pelos laboratórios especializados da Escola Superior de Agricultura Luiz Queiroz (ESALQ). Os resultados estão apresentados na Tabela 2 (CORTEZ, 2011).

Tabela 2 - Resultados das análises de poder calorífico em base seca.

Material Ensaiado	Poder Calorífico Inferior (kJ/kg) *
Material 1 (folhas)	17166
Material 2 (galhos)	18003
Material 3 (Mistura de galhos e folhas)	18003

* em base seca

FONTE: CENBIO (2008)

No cálculo do poder calorífico, é importante destacar a influência da umidade da Biomassa no potencial térmico. Segundo Lima, Abdala e Wenzel (2008) quando a biomassa é utilizada para geração de energia a umidade influencia negativamente na quantidade de calor liberado durante a queima, diminuindo a eficiência energética. Parte da energia é liberada durante a queima para evaporar a água que compete ao teor de umidade, diminuindo assim o poder calorífico (VICENTINI, 2011). A biomassa neste estudo foi considerada em base seca.

Para o presente estudo de caso da cidade de Guaratinguetá considera-se o “Material 3 – mistura de folhas e galhos” em base seca como biomassa. É necessário então obter o cálculo da massa seca da biomassa, tem-se que a disponibilidade de resíduos é de aproximadamente 486 m³/ano (úmida), sabe-se pela Tabela 3 que cerca de 48,95% da matéria orgânica é água, então será considerado um volume de 248 m³/ano de matéria orgânica seca, que corresponde os 51,05% restante.

Tabela 3 - Resultados das análises físico-químicas.

Determinações	Material 1 (folhas)		Material 2 (galhos)		Material 3 (mistura de galhos e folhas)	
	Umidade Natural	Base Seca (110 °C)	Umidade Natural	Base Seca (110 °C)	Umidade Natural	Base Seca (110 °C)
pH em CaCl ₂ 0,01 Molar	6,7	-	6,6	-	5,6	-
Densidade (g/cm ³)	0,18		0,26		0,15	
Umidade Perdida a 60-65°C (%)	56,19	-	27,56	-	45,82	-
Umidade Perdida entre 65 e 110 °C (%)	2,29	-	2,83	-	3,13	-
Umidade Total (%)	58,48	0	30,39	0	48,95	0

FONTE: CENBIO (2008)

5.2 Calor Disponível

Para calcular a taxa de calor disponível na caldeira do sistema é necessário estabelecer os cenários de queima, considerando o período de um ano com 365 dias. Com isso, estabeleceu-se dois cenários:

- 1) **Queima durante 8 horas/dia:** suprimento energético durante horário administrativo ou período de operação de equipamentos específicos;
- 2) **Queima durante 3 horas/dia:** geração energética com foco para redução de gastos com a tarifação horo-sazonal para horários de ponta.

É importante frisar a presença da tarifação horo-sazonal seca e úmida que abrange períodos com características pluviométricas de pouca e muita precipitação respectivamente. A aplicação do sistema em estudo pode ser uma alternativa para economia durante períodos em que a tarifação é maior, em caso de secas e falta de recursos hídricos para a geração de energia, como é a situação atual do estado, justificando o último cenário.

Definidos os cenários, o próximo passo é estabelecer o fluxo mássico baseado na disponibilidade anual de 248 m³/ano de matéria orgânica seca ano.

A vegetação urbana é composta de muitas espécies arbóreas. A fim de estimar a massa específica média aparente, e definir o número a ser utilizado para cálculos posteriores, foi tomado como base a Tabela 4, onde encontra-se a massa específica de diferentes tipos de

espécies, fez-se a média de todas apresentadas e definiu-se a densidade da biomassa como 878 (kg x m⁻³). Com o volume seco anterior calculado de 248 m³/ano de matéria orgânica seca, é possível calcular a massa disponível, da qual partirá as estimativas. Os cálculos serão feitos com base na variação dessa massa, compreendendo diferentes cenários como mostrado na Tabela 5.

$$massa = 248 \frac{m^3}{ano} \times 878 \frac{kg}{m^3} = 217744 \frac{kg}{ano} \quad (3)$$

Tabela 4 - Médias das massas específicas aparentes (ρ_{ap} kg m⁻³)

Nome vulgar	Nome científico	(ρ_{ap} kg m ⁻³)
Ipê	<i>Tabebuia serratifolia</i>	1.068,00
Eucalipto citriodora	<i>Corymbia citriodora</i>	999,00
Eucalipto punctata	<i>Eucalyptus punctata</i>	948,00
Tatajuba	<i>Bagassa guianensis</i>	940,00
Eucalipto maculata	<i>Corymbia maculata</i>	931,00
Eucalipto microcorys	<i>Eucalyptus microcorys</i>	929,00
Guaruaia	<i>Peltophorum vogelianum</i>	919,00
Garapa roraima	<i>Apuleia leiocarpa</i>	892,00
Canafistula	<i>Cassia ferrugina</i>	871,00
Mandioqueira	<i>Qualea spp</i>	856,00
Cupiúba	<i>Goupia glabra</i>	838,00
Guaiçara	<i>Luetzelburgia spp</i>	825,00
Eucalipto cloeziana	<i>Corymbia cloeziana</i>	822,00
Castelo	<i>Gossypiospermum praecox</i>	759,00
Oiticica amarela	<i>Clarisia racemosa</i>	756,00
Angelim pedra	<i>Dinizia excelsa</i>	694,00

Fonte: Cahil Junior et al. (2000)

* Presente estudo

Uma vez que alguns valores são estimados, estabeleceu-se diferentes cenários variando de 0 a 200 toneladas/ano, assim será possível analisar a variação dos parâmetros. A Tabela 5 apresenta o fluxo mássico para os cenários estabelecidos para cada valor total anual de biomassa.

Tabela 5 – Vazão mássica para os cenários estabelecidos.

Massa de resíduo de poda de árvore (kg /ano)	8 (h/dia)	3 (h/dia)
	kg/s	
100.000	0,010	0,03
150.000	0,014	0,04
200.000	0,019	0,05
217.744	0,021	0,06
250.000	0,024	0,06

Fonte: Aatoria própria

A tabela 2 apresentada no início deste capítulo, traz os três tipos de materiais “Material 1”, “Material 2” e “Material 3” e seus respectivos PCIs e PCSs. Será utilizado 18003 kJ/kg, o valor respectivo para o “Material 3” adotado para o presente estudo. A partir destes valores, a disponibilidade térmica do combustível é estabelecida pela equação (4). Os valores obtidos serão apresentados na Tabela 6.

$$Q = m \times \text{PCI} \quad (4)$$

Tabela 6 - Disponibilidade térmica calculada

Massa de resíduo de poda de árvore (kg /ano)	Q (kW)	Q (kW)
	8 h/dia	3 h/dia
100.000	171,26	456,70
150.000	256,89	685,05
200.000	342,52	913,39
217.744	372,91	994,43
250.000	428,15	1.141,74

Fonte: Aatoria própria

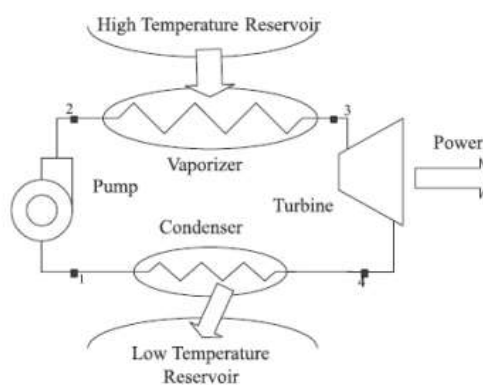
6 CICLO RANKINE ORGÂNICO

O ciclo de Rankine orgânico (CRO) (“Organic Rankine cycle” – ORC) é um processo promissor de conversão de energia térmica de baixa e média temperatura em eletricidade. O processo de funcionamento do CRO é semelhante ao ciclo fechado de Clausius-Rankine a vapor (Figura 5, envolvendo os mesmos componentes (evaporador, máquina de expansão, condensador e bomba), mas utiliza fluido orgânico ao invés de usar água como fluido de trabalho (CARLÃO, 2010). Parte do desafio está na escolha do fluido de trabalho orgânico mais apropriado e da configuração do próprio ciclo (SALEH et al, 2005).

Existem algumas formas de elevar a eficiência de ciclos a vapor:

- a) Reduzir a pressão no condensador;

Figura 5 - Ciclo CRO simples



FONTE: Hung, (2000)

Uma questão a considerar nos processos do CRO é a de se avaliar quando é que uma substância orgânica é realmente melhor que a água a funcionar como fluido de trabalho. Esta questão levanta-se, em particular, para fontes térmicas de temperatura média. Uma maior massa volumétrica do fluido de trabalho na saída das turbinas permite que estas tenham uma menor obstrução (QUOILIN, LEMORT, 2009), e assim permite a redução do tamanho do CRO consequentemente há uma significativa redução das

despesas de manutenção de forma a ter um menor custo de produção, permitindo ao processo ser economicamente viável (LARJOLA, 1994).

Um mesmo sistema CRO pode ser usado, com poucas modificações, em conjunto com diversas fontes de calor. Este sucesso é também reforçado pela maturidade tecnológica da maioria dos seus componentes, devido ao seu uso extensivo em aplicações ligadas à indústria de refrigeração. Além do mais, e ao contrário dos ciclos convencionais, esta tecnologia possibilita a produção de eletricidade ao nível local (CARLÃO, 2010).

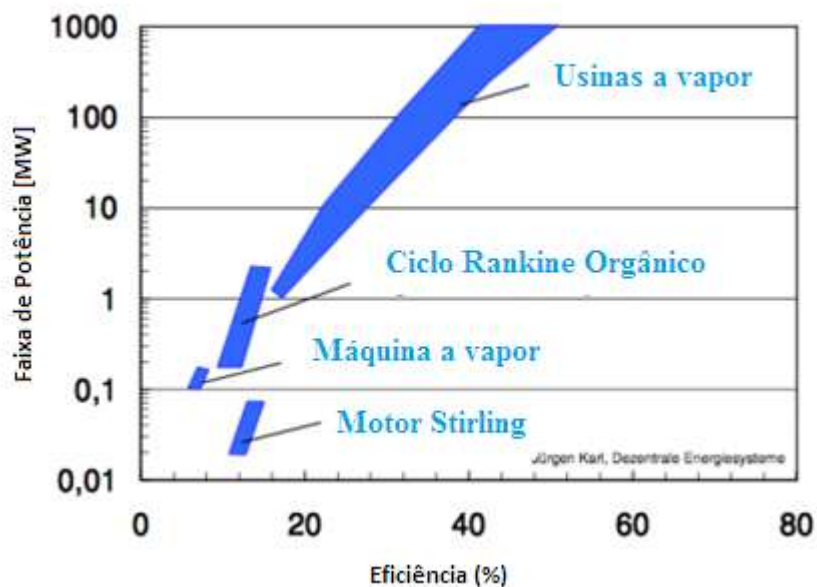
Atualmente, os ciclos de Rankine orgânicos estão comercialmente disponíveis para capacidades da ordem de MW. Contudo, poucas são as soluções atualmente aplicáveis à escala de kW, estando em fase de investigação e desenvolvimento (QUOILIN, LEMORT, 2009).

6.1 Comparação entre o ciclo de Rankine convencional e o CRO.

Quando a fonte térmica é de temperatura moderada, obtém-se um maior rendimento e produção de energia elétrica usando um fluido orgânico, em vez de água, como fluido de trabalho num ciclo de Rankine. Isto deve-se principalmente ao calor latente de vaporização dos fluidos orgânicos ser de valor muito inferior ao da água, permitindo a circulação de uma maior vazão de fluido no circuito que propicia um melhor aproveitamento da fonte térmica, além de que o risco de interrupção do funcionamento da instalação é menor. Também, a menor queda da entalpia específica nas turbinas, que resulta do uso dos fluidos orgânicos, diminui a obstrução da instalação (LARJOLA, 1994).

Na Figura 6 é possível observar o rendimento do ciclo Rankine orgânico em comparação com outras máquinas térmicas para diferentes níveis de potência.

Figura 6 - Comparação entre o rendimento do CRO e outras máquinas térmicas para diferentes gamas de potência



FONTE: Spliethoff e Shuster (2006).

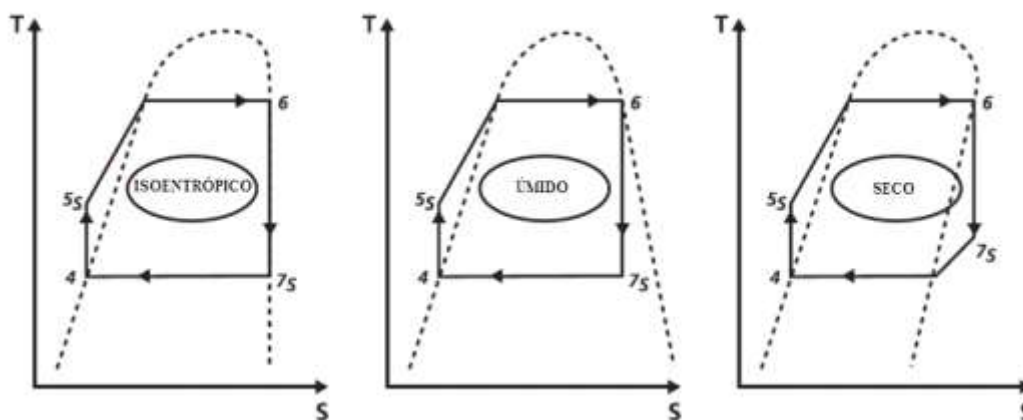
A adoção de um fluido orgânico em detrimento da água num ciclo termodinâmico permite atingir um ou mais objetivos listados abaixo (ANGELINO et al, 1984):

- Configurações do ciclo termodinâmico que são inacessíveis no diagrama de estado da água podem ser obtidas com fluidos com diferentes parâmetros críticos (por exemplo, ciclos supercríticos podem ser concebidos, mesmo a baixa temperatura);
- Mesmo com grandes diferenças de temperatura entre fonte quente e fonte fria, podem ser obtidos ciclos termodinâmicos com desenhos simples por não haver a necessidade de utilizar um regenerador e de sobreaquecer os fluidos orgânicos;
- São evitadas baixas velocidades periféricas geralmente requeridas para a turbina, assim como a condensação do fluido durante a expansão;
- A seleção de fluidos dando origem a fluxos de volume adequados permite tamanhos de turbina ideais para qualquer nível de potência;
- Podem, em certa medida, ser selecionados os níveis de pressão do fluido dentro dos vários componentes independentemente das temperaturas da fonte quente e da fonte fria (por exemplo, baixas temperaturas podem estar associadas a altas pressões e altas temperaturas associadas a baixas pressões).

6.2. Escolha do fluido de trabalho

A escolha do fluido de trabalho está relacionada com as suas propriedades termodinâmicas, que por sua vez afetam o rendimento do ciclo, e com o impacto no meio ambiente. Basicamente, o fluido de trabalho é classificado em três categorias. Fluidos secos, isentrópicos, e úmidos, dependendo se a derivada da curva do diagrama T-s (dT/dS) é positiva, infinita e negativa, respectivamente, como é ilustrado na Figura 7. Os fluidos de trabalho do tipo seco e isentrópico são mais apropriados para sistemas CRO, devendo-se ao fato de estes fluidos serem superaquecidos depois de expandidos, eliminando dessa forma possíveis problemas com as pás das turbinas aliados à presença de gotículas de líquidos. Além disso, não é necessário equipamento auxiliar para realizar o superaquecimento. Os fluidos úmidos têm baixa massa molecular, há a necessidade de um superaquecedor; exemplos são a água e a amônia (HUNG et al, 1996; LIU et al, 2002).

Figura 7 - Diagrama T-s dos tipos de fluidos orgânicos.



FONTE: P. Mago et al., (2010)

Algumas das características relevantes para a escolha do fluido são (QUOILIN, LEMORT, 2009):

1. Desempenho termodinâmico: o rendimento e/ou potência de saída deve ser a maior possível para as temperaturas dadas da fonte quente e fonte fria. Isto geralmente envolve baixo consumo da bomba e um elevado ponto crítico;

2. Alta densidade de vapor: este parâmetro é de fundamental importância, especialmente para os fluidos com uma pressão de condensação muito baixa (por exemplo, óleos de silicone). Baixa densidade conduz à necessidade de equipamentos de grandes dimensões ao nível da máquina de expansão e do condensador;
3. Pressões aceitáveis: tal como acontece com a água, altas pressões levam normalmente a aumentos do custo de investimento (QUOILIN, LEMORT, 2009). A pressão do vapor à temperatura de condensação deve ser acima da pressão atmosférica para prevenir a entrada de ar no sistema;
4. Estabilidade a altas temperaturas: ao contrário da água, os fluidos orgânicos geralmente sofrem degradação química e decomposição a altas temperaturas. A temperatura máxima da fonte de calor a ser usada é portanto limitada pela estabilidade química do fluido de trabalho;
5. O ponto de fusão deve ser inferior à temperatura ambiente.
6. Baixo impacto ambiental e alto nível de segurança: os principais parâmetros que deve-se ter em conta é o potencial de destruição da camada de ozônio, o potencial do efeito estufa, a toxicidade e a inflamabilidade;
7. Disponibilidade e baixo custo;
8. O fluido deve ser líquido nas condições de pressão e temperatura ambientes para ser fácil de manusear e armazenar.

Na Tabela 8 são mostradas as principais características para três fluidos de trabalho habitualmente usados em ciclos de Rankine orgânicos, segundo a literatura.

Tabela 7 – Propriedades dos fluidos orgânicos.

Fluido	Massa molecular (kg/kmol)	Temperatura crítica (°C)	Pressão crítica (MPa)	Potencial para a destruição da camada de ozono (ODP)
R123	152,93	183,79	3,66	0,02
R245fa (1,1,1,3,3 pentafluoropropano)	134,05	157,6	3,64	0
R601 (n-pentano)	72,15	196,36	3,36	0

FONTE: CARLÃO, (2010)

O R123 é um refrigerante que pode substituir o R11. Contudo, o R123 é um refrigerante transitório por ser um hidroclorofluorcarboneto (HCFC). As propriedades físicas e termodinâmicas desviam-se minimamente dos valores do R11. Devido ao seu valor de ODP (“Ozone depletion potencial”), o R123 deve ser rotulado como perigoso para a camada de ozônio.

O R123 tem um tempo de vida curto mas tem alta eficiência teórica e prática. O R245fa é um fluido de trabalho não-inflamável e não-tóxico. Tem ainda a vantagem de ser um fluido que não representa perigo para a camada de ozônio (zero ODP). Pode ser um substituto para o HCFC-123 e o CFC-11 em bombas de calor de alta temperatura e em ciclos de recuperação de calor como o ciclo de Rankine orgânico. O n-pentano (R601) é um refrigerante que não contém átomos de cloro e é considerado seguro para a camada de ozônio, mas é altamente inflamável (KOSMADAKIS et al, 2008). Ainda segundo estes autores, os três fluidos conseguem um aceitável rendimento térmico e são adequados para um ciclo de Rankine orgânico, onde o n-pentano se destaca por conseguir produzir um maior trabalho mecânico na turbina quando comparado com os outros fluidos (CARLÃO, 2010).

6.3 Máquina de expansão

O desempenho do sistema CRO está correlacionado com o desempenho da máquina de expansão. A escolha da máquina depende fortemente das dimensões e das condições de operação do sistema. Dois tipos fundamentais de máquinas de expansão podem ser distinguidos: tipo turbo e os tipos de deslocamento positivo. À semelhança de aplicações de refrigeração, máquinas do tipo de deslocamento são mais adequadas para as unidades CRO de pequena escala, porque estas são caracterizadas por apresentarem menores fluxos mássicos, índices mais elevados de pressão e velocidades de rotação muito mais baixas que as turbo-máquinas. Estas últimas são principalmente usadas em aplicações de maior escala e mostram ter um maior grau de maturidade técnica (QUOILIN, LEMORT, 2009).

As máquinas de expansão do tipo parafuso são máquinas de rotação de deslocamento positivo cujo desenvolvimento foi feito a partir da modificação dos típicos compressores de ar de forma a atuarem como máquinas de expansão em sistemas ORC no lugar das turbinas, geralmente para produção até 500 kW. Tais máquinas têm

eficiências adiabáticas próximas das turbinas convencionais para potências similares, mas com vantagens acrescidas, tais como a capacidade de aumentar o rendimento do ciclo ao admitir vapor úmido, acoplamento direto a um gerador trifásico típico, e a eliminação dos tradicionais sistemas de lubrificação (SMITH et al, 2007).

7 MÉTODO

Uma vez definido o potencial quantitativo e qualitativo da biomassa e também compreendido como é e funciona o Ciclo Rankine Orgânico e seus fluidos, será utilizado o programa EES - Engineering Equation Solver (licença acadêmica) para simulação do ciclo determinado e também suas condições de operação.

O EES é um programa geral de resolução de equação que pode resolver numericamente milhares de equações algébricas e diferenciais não-lineares acopladas. O programa também pode ser usado para resolver equações diferenciais e integrais, fazer otimização, fornece análises de incerteza, realizar a regressão linear e não-linear, converter unidades, verificar a consistência de unidade e gerar gráficos de qualidade para publicação. Uma característica importante do EES é o banco de dados de propriedades termodinâmicas e de transporte de alta precisão que é fornecido para centenas de substâncias de uma forma que permite que ele seja usado na resolução de equações.

O próximo passo então, será a análise de fluidos presentes no programa, que foram citados anteriormente como fluidos de trabalho habitualmente usados em ciclos de Rankine orgânico, segundo a literatura. Será feita análise dos seguintes fluidos: R123, R245fa, R601.

A seguir são apresentadas algumas características termodinâmica dos três fluidos analisados.

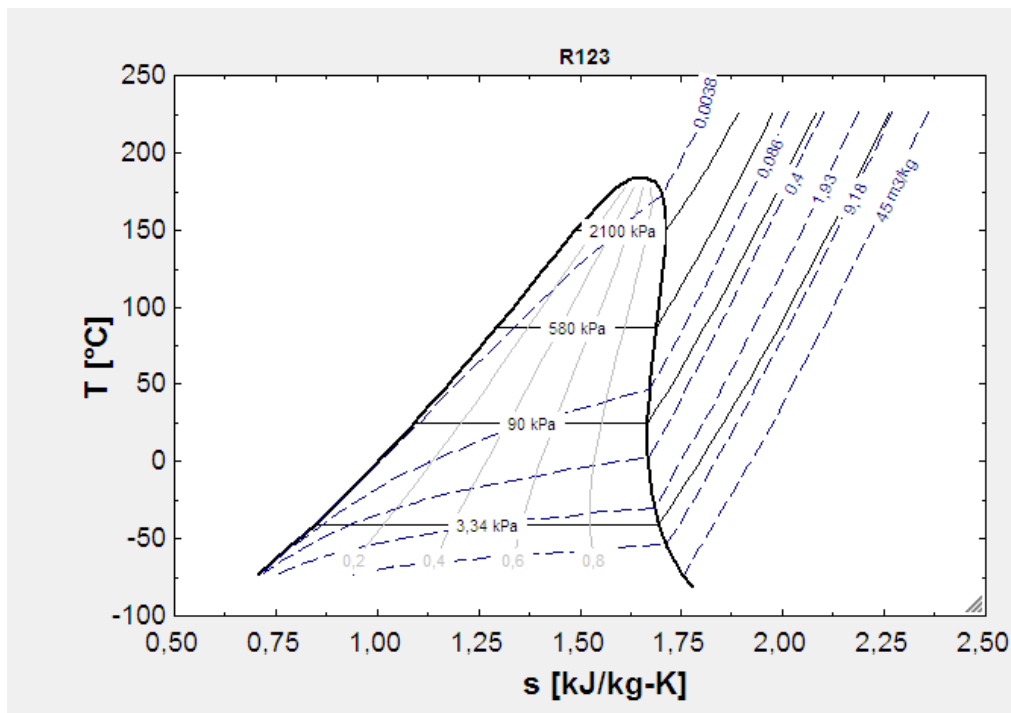
Tabela 8 - Dados termodinâmicos dos três fluidos de trabalhos abordados no trabalho.

	T_{crit} (°C)	T_{sat} (°C)	P_{crit} (kPa)	P_{sat} (kPa)
		(P = 101 kPa)	(T = 20 C)	
R123	183,7	27,7	3668	75,71
R245fa	154	15,11	3651	122,4
n-pentano	196,5	35,78	3364	57,08

FONTE: Software EES

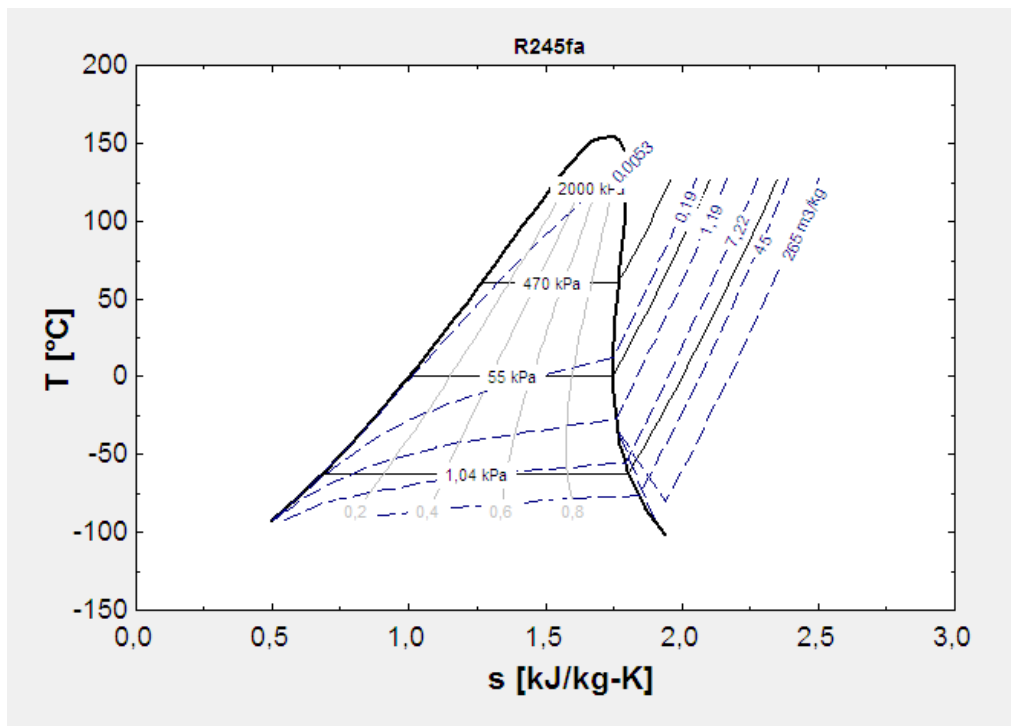
Nas Figuras 8, 9 e 10, respectivamente, é possível observar as características da saturação através dos diagramas T-s do R123, R245fa e R601 (n-Pentano).

Figura 8 - Diagrama T-s do fluido R123.



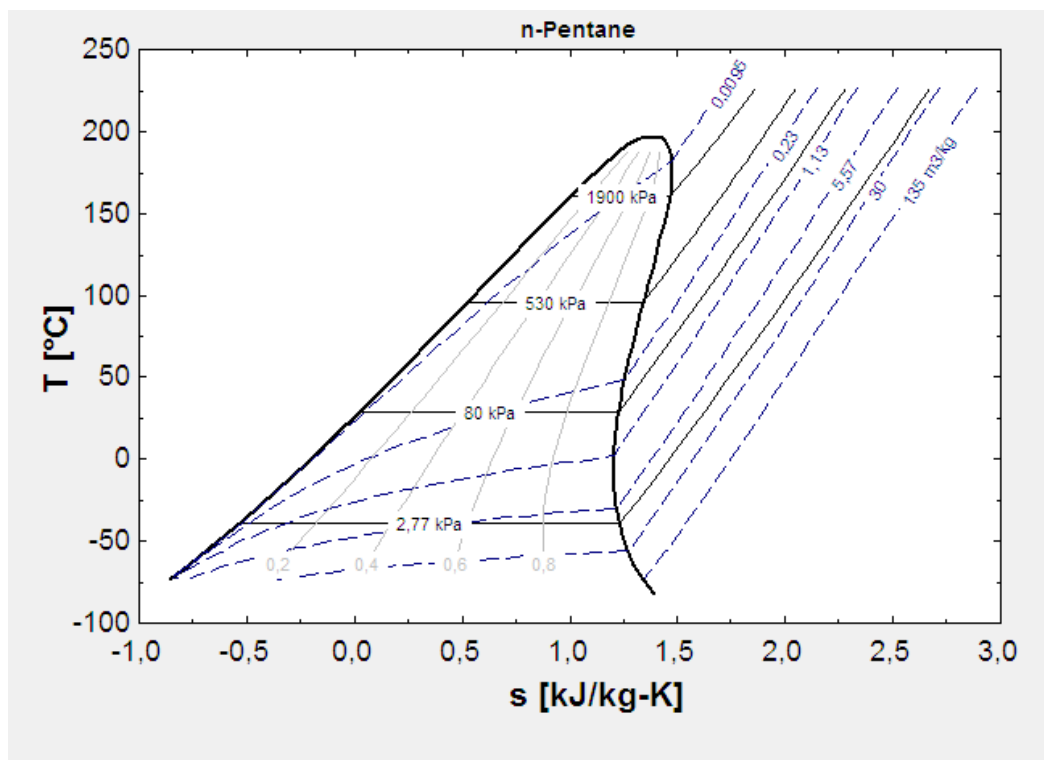
FONTE: Software EES

Figura 9 - Diagrama T-s do fluido R245fa



FONTE: Software EES

Figura 10 - Diagrama T-s do fluido n-Pentano



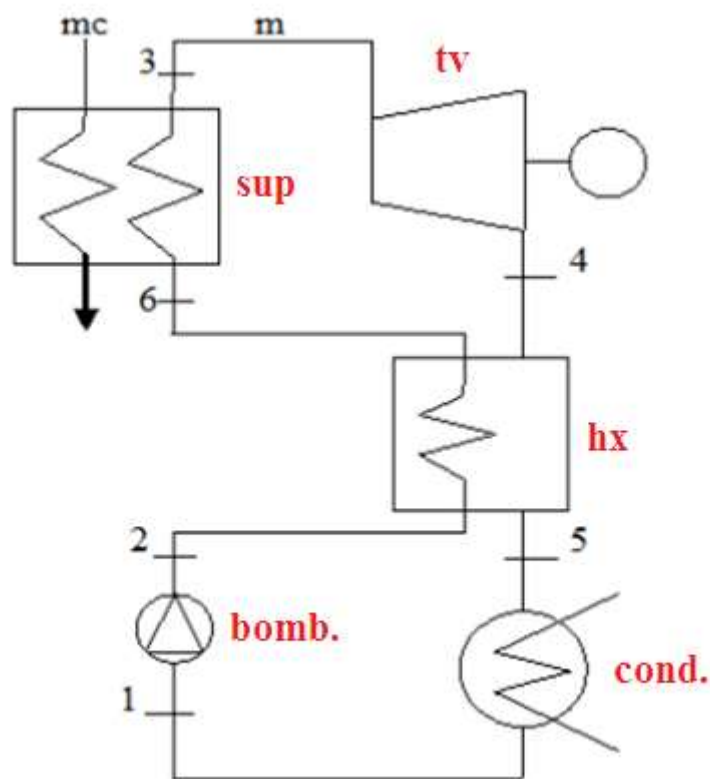
FONTE: Software EES

Primeiramente, é necessário definir os equipamentos utilizados como serão dispostos. Na Figura 11 pode-se observar como o ciclo foi estabelecido. Será composto por um superaquecedor (sup), uma turbina (tv), um trocador de calor (hx), um condensador (cond) e uma bomba de recirculação (bomb). Foi definido também os pontos de 1 a 6, tendo início na entrada da bomba, além disso foi adotada a vazão do fluido de trabalho (\dot{m}) bem como a vazão do combustível (\dot{m}_c).

Esta disposição foi escolhida por ser muito utilizada em ciclos dessa natureza, como por exemplo em Branz et al (2004) para sistemas de recuperação de calor.

O recuperador de calor existente permite reaproveitar parte da energia ainda presente no fluido após a expansão da turbina, atentando para o fato de se estabelecer as condições adequadas de entrada e saída do trocador garantindo assim que as condições da Segunda Lei da Termodinâmica sejam utilizadas a favor do processo (VICENTINI, 2011).

Figura 11 - Arranjo do ciclo



FONTE: Vicentini, (2011).

Uma vez definidos o poder calorífico do combustível e a vazão mássica da biomassa (4.2), os fluídos de trabalho a serem utilizados e também os equipamentos que serão utilizados e como serão dispostos, pode-se finalmente estabelecer as condições iniciais.

No ponto 1 (entrada da bomba), a temperatura de condensação é definida em 30°C por Haddad et al (2010). Optou-se por 40°C, uma vez que o trabalho utilizado como fonte se originou em uma localidade mais fria que o Brasil, nesse caso Toronto, Canadá. A condição do título também no ponto 1 é admitida como líquido saturado ($x=0$).

Para o ponto 2, segundo Gozdur e Novak (2005) admite-se que não há ganho nem perda de temperatura, portanto T_2 será igual a T_1 . A pressão no mesmo ponto será definida a partir da pressão de vapor vivo no ponto 3, considerando como perda apenas as quedas pressão somente no trocador de calor e no superaquecedor. Segundo

Carlão (2010) para o fluido de trabalho utilizado, R245fa, e para uma turbina de até 50 kW, a pressão de vapor vivo que maximiza o rendimento do ciclo é de 1574 kPa, que é a pressão quando o fluido de trabalho se encontra na fronteira do estado de vapor saturado. Já para o fluido de trabalho n-petano foi adotada a temperatura de 1300 kPa na entrada da turbina (COSTA, 2012). Considera-se perda de 15% em cada equipamento, tanto para o superaquecedor quanto para o trocador de calor (BEJAN: TSATSARONIS; MORAN, 1996). Portanto as pressões P6 e P2 para R245fa serão respectivamente, 1810 kPa e 2081,61 kPa e para n-petano, 1495 kPa e 1719 kPa. A temperatura T3, foi adotada de 110°C adotada também por Carlão (2010), em um ciclo CRO com o fluido R245fa para uma turbina de 50 kW. Para o fluido N-petano foi feita uma análise no diagrama T-s (Figura 9), e chegou-se a temperatura de 160°C, aproximadamente.

Com o ponto 3 definido, temperatura e pressão, é possível encontrar a entropia no mesmo ponto.

É estabelecido também que entre a temperatura de entrada do líquido saturado (lado frio) do trocador de calor T2 e a saída do vapor (lado quente) do trocador de calor T5, deve existir uma diferença de 5°C segundo Dai, Wang e Gao (2007), portanto define-se como T5 igual a 45°C para o ciclo com R245fa. Por uma questão de ajuste foi adotado para o ciclo operado com o n-pentano uma diferença de 10°C, então T5=50°.

Para T4, adota-se uma diferença de T5 da ordem de 5 a 10°C para os fluidos em questão, porém nas simulações realizadas no programa EES o valor que mais se adequou para o fluido R245fa foi da ordem de 10°C e para o n-pentano 70°C.

A condição de saída da turbina será definida admitindo as pressões P4, P5 e P1 como sendo iguais, considerando assim que as perdas são mínimas.

As entalpias e entropia de cada ponto, serão calculadas com os dados estabelecidos. Já a entalpia no ponto 6, será calculada a partir do volume de controle traçado no trocador de calor, e a vazão do fluido de trabalho será possível obter a partir do cálculo do volume de controle do superaquecedor.

A entalpia no ponto 6 é possível calcular a partir da equação:

$$h_6 - h_2 = (h_4 - h_5) \cdot n_{hx} \quad (5)$$

Já a vazão mássica do fluido de trabalho será calculada a partir da equação:

$$m_c \cdot PCI \cdot n_{sup} = m \cdot (h_3 - h_6) \quad (6)$$

Será adotado como rendimento do trocador de calor $n_{hx} = 0,70$ (REY, VELASCO, 2007) e do superaquecedor n_{sup} igual a 0,85 (VICENTINI, 2011).

Uma vez estabelecida todas as condições iniciais e calculadas as entalpias e a vazão mássica, é possível obter o trabalho realizado pela turbina, o trabalho consumido pela bomba e também os rendimentos da turbina a vapor e da bomba, além do rendimento isoentrópico da turbina.

Para encontrar o trabalho isoentrópico da turbina, será considerada uma entalpia $h[7]$, no ponto 4, adotando a mesma entropia do ponto 3, tendo assim uma turbina isoentrópica.

$$W_{TV} = m \cdot (h_3 - h_4) \quad (7)$$

$$W_B = m \cdot (h_2 - h_1) \quad (8)$$

$$n_T = \frac{W_{TV} - W_B}{m_c \cdot PCI} \quad (9)$$

$$n_{isoTV} = \frac{W_{TV}}{W_{isoTV}} \quad (10)$$

8 RESULTADOS

Na Figura 12 é possível observar os comandos utilizados para programar o cálculo das equações no programa EES para o fluido R245fa, a Figura 13 traz os valores das entalpias e pressões do ciclo. A Tabela 10 apresenta os valores já calculados de trabalho e rendimento para a vazão de combustível referente ao período de 8h/dia e 3h/dia respectivamente.

Figura 12 - Janela de programação EES - workfluid R245fa

```
"Organic Rankine Cycle - workfluid R245fa - Gyovana Vivian Ferreira da Silva"

"Thermodynamics Properties"
mc = 0,06 [kg/s] : PCI = 18003 [KJ/kg]
eta_hx = 0,85
x[1] = 0 : T[1] = 40 [°C]
P[3] = 1574 [kPa] : T[3] = 110 [°C]
P[6] = P[3]*1,15 : T[2] = T[1]
P[2] = P[6]*1,15

P[4] = P[5] : T[5] = T[2] + 5 [°C]
P[5] = Pressure(R245fa; T=T[1]; x=x[1]) : T[4] = T[5] + 30 [°C]

h[1] = Enthalpy(R245fa; T=T[1]; x=x[1]) : s[1] = Entropy(R245fa; T=T[1]; x=x[1])
h[2] = Enthalpy(R245fa; P=P[2]; T=T[2]) : s[3] = Entropy(R245fa; T=T[3]; P=P[3])
h[3] = Enthalpy(R245fa; T=T[3]; P=P[3]) : s[4] = Entropy(R245fa; T=T[4]; P=P[4])
h[4] = Enthalpy(R245fa; P=P[4]; s=s[4])
h[5] = Enthalpy(R245fa; T=T[5]; P=P[5])
h[7] = Enthalpy(R245fa; P=P[4]; s=s[3])

"Control Volume and Energy Balance"
(h[6]-h[2]) = (h[4]-h[5])*eta_hx {calculates h[6]}
mc*PCI*eta_hx = m*(h[3]-h[6]) {calculates m}
W_tviso = m*(h[3]-h[7])
W_tv = m*(h[3]-h[4])
W_b = m*(h[2]-h[1])
eta_t = (W_tv - W_b)/(mc*PCI)
n_tiso = W_tv/W_tviso
```

FONTE: Software EES

Figura 13 - Valores termodinâmicos calculados – Workfluid 245fa

Sort	1	2	3	4	5
	h_i	P_i [kPa]	s_i	T_i [°C]	x_i
[1]	252,6		1,179	40	0
[2]	253	2082		40	
[3]	479,6	1574	1,795	110	
[4]	448,8	249,6	1,805	55	
[5]	438,8	249,6		45	
[6]	261,5	1810			
[7]	445,8				

FONTE: EES

Figura 14 - Valores termodinâmicos calculados – Workfluid n-pentano

"Organic Rankine Cycle - workfluid n-pentane - Gyovana Vivian Ferreira da Silva"

"Thermodynamics Properties"

```

mc = 0,060 [kg/s] : PCI = 18003 [KJ/kg]
eta_hx = 0,85
x[1] = 0 : T[1] = 40 [°C]
P[3] = 1300 [kPa] : T[3] = 160 [°C]
P[6] = P[3]*1,15
P[2] = P[6]*1,15 : T[2] = T[1]

P[4] = P[5] : T[4] = T[5] + 70 [°C]
P[5] = Pressure(R245fa;T=T[1];x=x[1]) : T[5] = T[2] + 10 [°C]

```

```

h[1]=Enthalpy(n-pentane;T=T[1];x=x[1]) : s[1]=Entropy(n-pentane;T=T[1];x=x[1])
h[2]=Enthalpy(n-pentane;P=P[2];T=T[2]) : s[3]=Entropy(n-pentane;T=T[3];P=P[3])
h[3]=Enthalpy(n-pentane;T=T[3];P=P[3]) : s[4]=Entropy(n-pentane;T=T[4];P=P[4])
h[4]=Enthalpy(n-pentane;P=P[4];s=s[4])
h[5]=Enthalpy(n-pentane;P=P[5];T=T[5])
h[7]=Enthalpy(n-pentane;P=P[4];s=s[3])

```

"Control Volume and Energy Balance"

```

(h[6]-h[2])=(h[4]-h[5])*eta_hx {calculates h[6]}
mc*PCI*eta_hx=m*(h[3]-h[6]) {calculates m}
W_tviso=m*(h[3]-h[7])
W_tv=m*(h[3]-h[4])
W_b=m*(h[2]-h[1])
eta_t=(W_tv-W_b)/(mc*PCI)
n_tiso=W_tv/W_tviso

```

FONTE: EES

Figura 15 - Valores termodinâmicos calculados – Workfluid n-pentano

Sort	h_i	P_i [kPa]	s_i	T_i [°C]	x_i
[1]	33,2		0,1093	40	0
[2]	34,45	1719		40	
[3]	597,2	1300	1,558	160	
[4]	538,9	249,6	1,586	120	
[5]	57,43	249,6		50	
[6]	443,7	1495			
[7]	528,1				

FONTE: EES

Tabela 9 - Resultados finais (workfluid R245fa)

kg/ano	m (kg/s)	m _c (kg/s)	n _{tiso} (%)	W _b (kW)	W _{tv} (kW)	W _{tiso} (kW)
100000	2,11	0,030	91,1%	0,93	64,88	71,25
	0,70	0,010	91,1%	0,31	21,63	23,75
150000	2,81	0,040	91,1%	1,24	86,51	95,00
	0,98	0,014	91,1%	0,43	30,28	33,25
200000	3,51	0,050	91,1%	1,55	108,10	118,70
	1,33	0,019	91,1%	0,60	41,09	45,12
217744	4,21	0,060	91,1%	1,86	129,80	142,50
	1,47	0,021	91,1%	0,65	45,42	49,87
250000	4,21	0,060	91,1%	1,86	129,80	142,50
	1,68	0,024	91,1%	0,91	51,91	57,00

FONTE: Software EES

Tabela 10 - Resultados finais (workfluid N-Pentano)

kg/ano	m (kg/s)	m _c (kg/s)	n _{tiso} (%)	W _b (kW)	W _{tv} (kW)	W _{tiso} (kW)
100000	2,91	0,030	84,3%	3,75	174,30	206,80
	1,00	0,010	84,3%	1,25	58,10	68,93
150000	3,99	0,040	84,3%	5,00	232,40	275,70
	1,40	0,014	84,3%	1,75	81,35	96,50
200000	4,99	0,050	84,3%	6,25	290,50	344,70
	1,89	0,019	84,3%	2,37	110,40	131,00
217744	5,98	0,060	84,3%	7,49	346,60	413,60
	2,09	0,021	84,3%	2,62	122,00	144,80
250000	5,98	0,060	84,3%	7,49	346,60	413,60
	2,39	0,024	84,3%	3,00	139,50	165,40

FONTE: Software EES

Este procedimento também foi feito com o fluido R123, porém esse apresentou resultados fora das faixas termodinâmicas, a entropia cai do ponto 3 (entrada da turbina) para o ponto 4 (saída da turbina), o que contradiz as leis da termodinâmica.

É possível observar nas Tabelas 9 e 10 os resultados para os cenários na Tabela 5. Para o valor estimado no presente trabalho de 217744 kg/ano, obteve-se que para o fluido R245fa, a potência realizada pela turbina foi de 129,8 kW para 3 h/dia e 45,42 kW para 8 h/dia, e para o n-pentano, 346,60 kW e 122,00 kW respectivamente. A energia consumida pela bomba para o ciclo operado pelo fluido R245fa foi de, 1,86 kW e 0,65 kW, e para o n-pentano, 7,49 kW e 2,62 kW, para os cenários de 8 h/dia e 3 h/dia, respectivamente.

Como as pressões de vapor vivo e de entrada da bomba, assim como a temperatura de entrada da turbina também, foram baseadas em um estudo para uma bomba de 50 kW, Carlão (2011), para o fluido R245fa, para o ciclo operando 3 h/dia seria necessário utilizar três turbinas e três condensadores. Apesar de o trabalho líquido para 8 h/dia aproximar-se um pouco o valor de 50 kW exatamente a capacidade da turbinas, este ainda será “penalizado” por o gerador não ter rendimento de 100% na conversão da energia mecânica em energia elétrica.

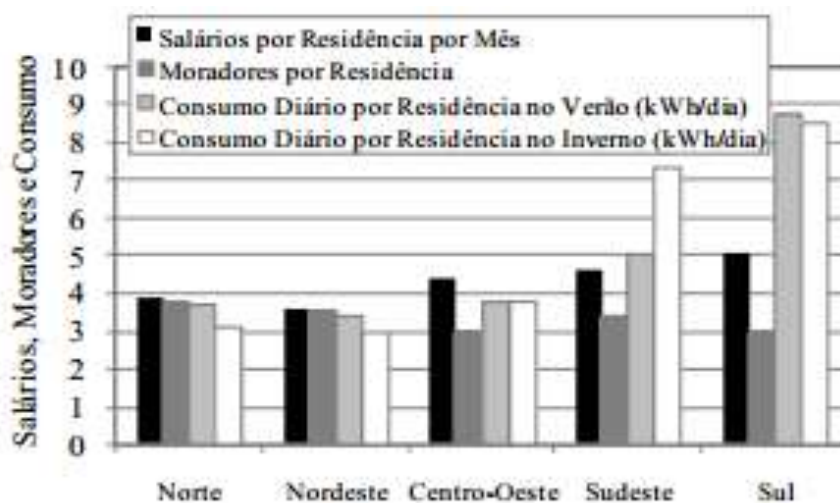
Comparativamente com os valores de Carlão (2010), os valores para o cenário 1 para o fluido de trabalho R245fa foram muito próximos ao da literatura, obteve-se um trabalho realizado pela turbina de 45,42 kW e trabalho consumido pela bomba de 0,67 kW e uma massa de combustível consumida de 1,47 kg/s, enquanto que na literatura esses mesmos valores foram respectivamente, 60,34 kW e 2,81 kW, 2,0 kg/s.

Como dito anteriormente no tópico 5.5.2, o n-pentano é o fluido que apresenta maior rendimento e trabalho na turbina. Os trabalhos na turbina para a massa estimada no presente trabalho de 217744 kg/ano foi de 346,60 kW e 122 kW e consumidos na bomba de 7,49 kW e 2,62 kW. Portanto, comprova-se maior eficiência para o fluido n-pentano em comparação ao R245fa.

Ao analisar a Figura 16 pode-se notar que a média diária de consumo de energia por residência na região sudeste ao longo do inverno e verão respectivamente é de 7kWh/dia e 5kWh/dia, portanto conclui-se que para o cenário 1, onde o ciclo opera durante 8 horas dia, têm-se para o fluido R245fa a geração de 44,77 kW, será possível gerar cercar de 358 kWh por dia, o que será suficiente para abastecer 51 casas no inverno e 72 casas no verão. Para n-pentano o resultado é quase três vezes maior, com a geração 955 kWh/dia, abastecendo assim 136 casas no inverno e 191 casas no verão.

Já para o cenário 2, onde o ciclo opera 3 horas por dia para o fluido R245fa gera-se aproximadamente 128 kW de trabalho líquido e 383 kWh/dia e de energia e para o n-pentano 339 kW e 1017 kWh/dia respectivamente, com isso o ciclo operando com o fluido R245fa abastece 55 casas no inverno e 77 no verão e com o n-pentano 145 e 203 casas.

Figura 16 - Média mensal de renda familiar, número de moradores por residência e consumo de energia por residência em cada região geográfica



FONTE: FEDRIGO, N. S, GHISI, E., LAMBERTS, R, (2009)

Tabela 11 - Resultado final de trabalho líquido, e quantidade de casas abastecidas com a energia produzida.

		trabalho líquido (kW)	kWh/dia	nº de casas abastecidas inverno	nº de casas abastecidas verão
R245fa	cenário 1	44,77	358,16	51	72
	cenário 2	127,94	383,82	55	77
n-pentano	cenário 1	119,38	955,02	136	191
	cenário 2	339,11	1017,33	145	203

FONTE: Autoria própria

9 CONCLUSÕES

Este estudo de caso analisou o potencial de resíduos de poda de árvore para a cidade de Guaratinguetá. O volume da disponibilidade de poda de árvore foi calculado com base comparativa a área metropolitana de São Paulo. Foi calculado a biomassa seca, tendo em consideração que cerca de 49% da biomassa é água, chegou-se então ao volume seco de 248 m³/ano. Uma vez estipulada a massa específica média que seria usada para calcular a massa total do combustível, obteve-se o número final de 217744 kg/ano. Foi também definido um PCI de acordo com a literatura de 18003 kJ/kg.

Parâmetros estipulados, apresentou-se o ciclo termodinâmico escolhido para análise, Ciclo Rankine Orgânico ou ORC, verificou-se também os fluidos mais utilizados segundo a literatura existiam na biblioteca de fluidos do software de simulação escolhido para análises, Engineer Equation Solver – EES. Foram efetuadas simulações com R245fa, R123 e n-pentano, porém apenas o fluido R245fa e n-pentano tiveram resultados satisfatórios. O fluido R123 apresentou problemas que violariam as leis da termodinâmica, uma vez que houve perda de entropia entre a entrada e saída da turbina.

Fez-se uma análise de quantas casas, em média, seria possível abastecer com essa potência gerada e concluiu-se que o maior número de casas possível de se abastecer seria utilizando um ciclo operado com o fluido n-pentano, este fluido se destaca por conseguir produzir um maior trabalho mecânico na turbina quando comparado com os outros fluidos porém é altamente inflamável. Já o R245fa gera uma potência menor porém não é inflamável, sendo uma boa alternativa como substituto.

Conclui-se que a quantidade de energia gerada no ciclo CRO é bastante significativa. Podendo auxiliar no suprimento energético durante o horário administrativo, e também na redução de gastos com a tarifação horo-sazonal para os horários de ponta.

Sugestão para trabalhos futuros:

- Avaliação do potencial econômico do projeto para o R245fa e n-pentano;
- Estudo de caso de um ciclo de cogeração a partir de resíduos de poda de árvores de outras cidades do Vale do Paraíba.

10 REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas e Técnicas). ABNT NBR 10004/2004 Resíduos Sólidos. 2004.

ANEEL, Biomassa. Acesso em 27 de setembro de 2014. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa\(2\).pdf](http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/atlas/pdf/05-Biomassa(2).pdf)>.

ANGELINO, G., GAIA, M., and MACCHI, E., 1984, “ORC-HP-Technology: Working fluids problems”, Review of Italian activity in the field of Organic Rankine Cycles.

BASSANELLI, H. R.; BATISTA, G. T., **Análise especial da evolução da mancha urbana no município de Guaratinguetá.** Disponível em: http://www.agro.unitau.br:8080/dspace/bitstream/2315/170/1/4-Artigo_urbanizacao.pdf. Acesso em: 10 de dezembro de 2014.

BRASZ, L. J.; BILBOW, W. M.; Ranking of Working fluids for organic rankine cycle applications, Purdue University, 2004, International Refrigeration and Air Conditioning Conference.

BEJAN, A. TSATSARONIS, G; MORAN, M. Thermal design and optimization. New York: Wiley Interscience, 1996. 540p.

CARDOSO, B. M., Uso da biomassa como alternativa energética, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2012.

CARLÃO, R. L. L., Projecto de um ciclo de Rankine orgânico para produção de 200 kWe, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2010.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA, Fontes de Biomassa. Acesso em 27 de setembro de 2014. Disponível em: <<http://cenbio.iee.usp.br/saibamais/fontes.htm>>

COELHO, S. T., Mecanismos para implementação da cogeração de eletricidade a partir de biomassa. Um modelo para o estado de São Paulo, 1999, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CORTEZ, L. C. Estudo do potencial de utilização da biomassa resultante da poda de árvores urbanas para a geração de energia: Estudo de Caso: AES Eletropaulo, Dissertação de Tese de Mestrado, Universidade de São Paulo – Programa de Pós Graduação em Energia, São Paulo, 2011.

CORTEZ, C. L., GRISOLI, R., GAVIOLI, F., COELHO, S. T., CARMELO, S., Alternativa Sustentável para utilização de resíduos de poda provenientes da manutenção das redes de distribuição de energia elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

CORTEZ, C. L., GRISOLI, R., GAVIOLI, F., COELHO, S. T., CARMELO, S., Compostagem de resíduos de poda urbana, 2008, Universidade de São Paulo, São Paulo.

COSTA, J. M.; Ciclo orgânico de rankine. Seminário de divulgação dos resultados do projeto COMFORTABLE, Coimbra, 2012.

DAI, Y.; WANG, J.; GAO, L. Parametric optimization study of organic Rankine cycle (ORC) for low grade waste heat recovery. Energy Conversion and Management, n50, 2009.

DE PAULA, J. C. M., Aproveitamento de resíduos de madeira para confecção de briquetes, 2006, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.

FEDRIGO, N. S, GHISI, E., LAMBERTS, R., Usos finais de energia elétrica no setor residencial brasileiro, X ENCONTRO NACIONAL e XI ENCONTRO LATINO AMERICANO de CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUIDO, Natal, 2009.

FERNANDES, D. M., SUZUKI, A. B. P., VIEIRA, A. C., ARAÚJO, I. R. C., CONSTANZI, R. N., FARIA, R. A. P., EDWIGES, T., Biomassa como fonte de energia. Acesso em 27 de setembro de 2014. Disponível em: http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1570&subject=Biomassa&title=Biomassa%20como%20fonte%20alternativa%20de%20energia

FOURNIER, A. C. P., PENTEADO, C. L. C., Energia elétrica no setor residencial à luz do consumo consciente: resultados do estudo de caso no município de Santo André (SP), V Encontro Nacional da Anppas, 2010.

GOMES, J. J.; TOLEDO FILHO, R. D.; NASCIMENTO, J. W. B.; SILVA, V. R.; NÓBREGA, M. V., Características tecnológicas da *Prosopis juliflora* (Sw.) DC. e alternativas para o uso racional, 2007, Revista brasileira engenharia agrícola ambiental, vol.11 no.5 Campina Grande.

HADDAD, S. N.; ARTEMENKO, S.; NIKITIN, D.; Sustainable working fluids selection for the low temperature organic rankine cycle. Disponível em: <http://www.jeaconf.org/UploadedFiles/Document/64f748b8-4902-4841-b1dc-f0497b6910e5.pdf>. Acesso em: 10 de dezembro de 2014.

IBGE, Cidade de Guaratinguetá. Acesso em 25 de outubro de 2014. Disponível em: <http://cidades.ibge.gov.br/painel/painel.php?codmun=351840>

LARJOLA, J., “Electricity from industrial waste heat using high-speed organic Rankine cycle (ORC)”, *Production Economics*, 41: 227-235, 1994.

LARKIN, S., RAMAGE, J., SCURLOCK, J., 2004, “Bioenergy”. In: BOYLE, G. (ed.), *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*, 2ª ed., capítulo 4, New York, USA, Oxford University Press.

LIU, B. T., CHIEN, K. H., WANG, C. C., “Effect of working fluids on organic Rankine cycle for waste heat recovery”, *Energy*, 29: 1207 – 1217, 2002.

MAGO, P, et al., Exhaust Waste Heat Recovery from Stationary Engines Using Organic Rankine Cycles, 2010.

MARTÍ, B. V., GONZALEZ, E. F., FERRE, A. J. C., CREMADES, J. E., Mechanized methods for harvesting residual biomass from Mediterranean fruit tree cultivations, 2012, Universidad Politécnica de Valencia, Espanha.

Política Nacional de Resíduos Sólidos, Lei Nº 12.305, de 2 de agosto 2010. Acesso em 21 de abril de 2014, disponível em <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/lei12305.pdf>

QUOILIN, S., LEMORT, V., 2009, “Technological and Economical Survey of Organic Rankine Cycle Systems”, 5th European Conference Economics and Management of Energy in Industry.

Região metropolitana de São Paulo. Acesso em 25 de outubro de 2014. Disponível em: http://pt.wikipedia.org/wiki/Regi%C3%A3o_Metropolitana_de_S%C3%A3o_Paulo

REY, F. J., VELASCO, E., Recuperación de Energía en Sistemas de Climatización, Madri, 1996.

SILVA, C. R. A., GARRAFA, M. T. L., NAVARENHO, P. L., GADO, R., YOSHIMA, S., A Biomassa como alternativa energética para o Brasil. 2005, Energia e Ambiente.

SMITH, I. K., STOSIC, N., KOVACEVIC, A., LANGSON, R., 2007, “Cost Effective Small Scale ORC Systems for Power Recovery from Low Enthalpy Geothermal Resources”.

STROBEL, C., Máquinas Térmicas I – Ciclos térmicos a vapor, Universidade Federal do Paraná, Departamento de Engenharia Mecânica, 2012.

VICENTINI, M. C.; Aplicação do ciclo rankine orgânico alimentado termicamente pela queima da casca do arroz e resíduo de madeira, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.

VIEIRA, Y., 2010, Energia, Economia, Rotas Tecnológicas, Textos Seleccionados. Acesso em 27 de setembro 2014, disponível em: < <http://www.eumed.net/libros-gratis/2010e/827/Combustao%20Direta.htm>>