



**UNIVERSIDADE DE UBERABA**

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA  
MESTRADO PROFISSIONAL**

**LÉLIO ALVES VIEIRA**

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DOS GASES DA  
CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA PELAS MICRO-ONDAS UTILIZANDO O  
CICLO DIESEL E O CICLO COMBINADO**

UBERABA-MG

2019





**LÉLIO ALVES VIEIRA**

**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DOS GASES DA  
CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA PELAS MICRO-ONDAS UTILIZANDO O  
CICLO DIESEL E O CICLO COMBINADO**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Orientador:

Prof. Dr. Edilberto Pereira Teixeira

Coorientador:

Prof. Dr. Antônio Manoel Batista da Silva

UBERABA-MG

2019

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

Vieira, Lélío Alves.

V673g Geração de energia elétrica por meio dos gases da carbonização da madeira pelas micro-ondas utilizando o ciclo diesel e o ciclo combinado / Lélío Alves Vieira. – Uberaba-MG, 2019.

62 f. il. : color.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Edilberto Pereira Teixeira.

Coorientador: Prof. Dr. Antônio Manoel Batista da Silva.

1. Fontes de energia sustentáveis. 2. Carvão - Gaseificação. 3. Investimento em energia limpa. I. Teixeira, Edilberto Pereira. II. Silva, Antônio Manoel Batista da. III. Universidade de Uberaba. Programa de Mestrado em Engenharia Química. IV. Título.

CDD: 333.79

LÉLIO ALVES VIEIRA

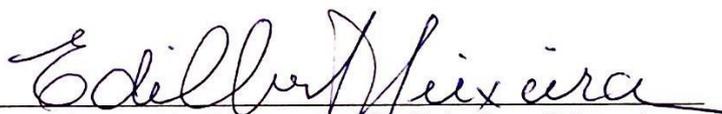
**GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA POR MEIO DOS GASES DA  
CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA PELAS MICRO-ONDAS UTILIZANDO O CICLO  
DIESEL E O CICLO COMBINADO**

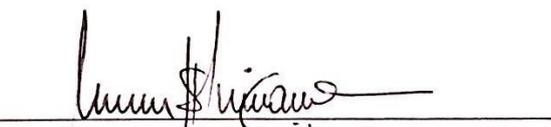
Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

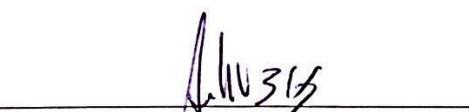
Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais

Aprovado em: 30/10/2019

BANCA EXAMINADORA:

  
Prof(a). Dr(a). Edilberto Pereira Teixeira - Orientador  
Universidade de Uberaba

  
Prof(a). Dr(a). Marcos Massao Shimano  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

  
Prof(a). Dr(a). Elizabeth Uber Bucek  
Universidade de Uberaba



*“Cada dia que amanhece assemelha-se a uma página em branco, na qual gravamos os nossos pensamentos, ações e atitudes. Na essência, cada dia é a preparação de nosso próprio amanhã.”*

Chico Xavier



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço, primeiramente, a Deus, que me deu saúde, energia e benefícios para concluir este trabalho e que guia meus passos todos os dias.

Aos meus pais e irmão, pelos ensinamentos, pela educação, conselhos, valores e princípios e que me incentivaram e contribuíram, sem medir esforços, para que eu pudesse conseguir tudo o que tenho hoje em minha vida.

À minha esposa e minha filha, pela ajuda incondicional, direta e indiretamente, que de forma especial e carinhosa, que me deram força e coragem e que tiveram paciência comigo em momentos de tensão e de empenho, auxiliando-me a conseguir meus objetivos de vida.

Aos professores e orientadores, Edilberto Pereira Teixeira, Antônio Manoel Batista da Silva e Elizabeth Uber Bucek por dispor do seu tempo para este trabalho e opinar com ótimas ideias e a todos que de forma direta ou indiretamente me ajudaram na conclusão deste trabalho.

A Empresa ONDATEC Tecnologia Industrial em Micro-ondas S.A. e ao Sr. Ricardo Naufel de Toledo, pela ajuda, informações relevantes, conselhos e ensinamentos dados de forma irrestrita, não só neste trabalho como em minha vida profissional e pessoal.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE) pela oportunidade.

À UNIUBE – Universidade de Uberaba, à Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais - FAPEMIG, à CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pelo suporte dado ao desenvolvimento dessa dissertação.



## RESUMO

Os efluentes da carbonização e carvoejamento da madeira possuem energia térmica agregada e nos fornos convencionais de carvoejamento, parte da madeira é queimada para dar ignição à queima nos fornos e os efluentes gerados são dispensados na atmosfera e no solo, que além do desperdício de energia causa poluição ambiental. Com os fornos com a tecnologia por micro-ondas da empresa ONDATEC® a madeira sofre a radiação não ionizante (micro-ondas) e não há perda de matéria prima para ignição, o ambiente de carbonização é controlado, quanto a entrada de oxigênio, e os efluentes gerados, como o gás condensável e o gás não condensável, são facilmente coletados. Este trabalho tem por objetivo, mostrar uma forma eficiente de geração de energia elétrica proveniente dos gases da carbonização da madeira em fornos com a tecnologia micro-ondas. A fim de perseguir estes objetivos, os gases gerados com essa tecnologia foram testados na alimentação de geradores estacionários e em um outro cenário foi demonstrado a geração de energia elétrica com o Ciclo Combinado, onde consegue-se um maior rendimento. O motogerador a diesel, alimentado com gás condensado, não obteve um resultado satisfatório, pois o gás condensado é viscoso e ácido, sendo impossível seu uso sem emulsificação com etanol. O motogerador a diesel convertido para biogás e alimentado com o gás não condensado, funcionou sem falhas, porém apresentou um rendimento menor que 28%, quanto ao esperado que era de 35%. Nos cenários com o uso do Ciclo Combinado, pôde-se perceber uma alternativa satisfatória para a geração de energia elétrica, por apresentar de rendimentos em torno de 50%, e sem os inconvenientes do uso no motogerador a diesel, como por exemplo, realizar a diminuição da viscosidade cinemática do bio-óleo para alimentar este motogerador. Portanto, a contribuição relevante a ser destacada neste trabalho é a geração de energia elétrica com os efluentes da carbonização, antes descartados e liberados para o meio ambiente sem nenhum cuidado ou preocupação para com a saúde do operador, por ser uma tecnologia limpa que não expõe os funcionários aos contaminantes.

**Palavras-chave:** bio-óleo, efluentes da carbonização, energia sustentável, energia térmica, radiação não ionizante.



## ABSTRACT

The carbonization and charcoal effluents from wood have aggregate thermal energy and in conventional charcoal ovens, part of the wood is burned to ignite the burning in the ovens and the generated effluents are discharged into the atmosphere and soil, which in addition to energy waste causes environment pollution. With microwave technology ovens from ONDATEC<sup>®</sup>, the wood undergoes non-ionizing radiation (microwaves) and there is no loss of ignition raw material, the carbonization environment is controlled, for oxygen inlet, and generated effluents, such as condensable gas and non-condensable gas, are easily collected. This paper aims to show, an efficient way of generating electricity from wood carbonization gases in microwave ovens. In order to pursue these objectives, the gases generated with this technology were tested in the power supply of stationary generators and in another scenario it was demonstrated the generation of electricity with the Combined Cycle, where a higher yield is achieved. The diesel generator, which is fed with condensed gas, did not obtain a satisfactory result, since the condensed gas is viscous and acidic, being impossible to use it without emulsification with ethanol. The diesel generator converted to biogas and fed with non-condensed gas, operated without fail, but presented a yield of less than 28%, as expected which was 35%. In scenarios with the use of the Combined Cycle, it was possible to perceive a satisfactory alternative for the generation of electric power, since it presents yields around 50%, and without the inconvenience of using the diesel generator, such as, reducing of kinematic viscosity of the bio-oil to feed this motor generator. Therefore, the relevant contribution to be highlighted in this paper is the generation of electricity from carbonization effluents, previously discarded and released to the environment without any care or concern for the operator's health, as it is a clean technology that does not expose employees to contaminants.

**Keywords:** bio-oil, carbonization effluents, sustainable energy, thermal energy, non-ionizing radiation.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Participação de renováveis na matriz elétrica.....	2
Figura 2 - Matriz elétrica brasileira e importada .....	2
Figura 3 - Emissões de CO <sub>2</sub> por MWh gerado (2015).....	3
Figura 4 - Produção brasileira de Ferro-Gusa (Toneladas) .....	5
Figura 5 - Gráficos Ciclo Otto: (I) Pressão (Pa) x Volume (m <sup>3</sup> );.....	9
Figura 6 – Gráficos Ciclo Diesel: (I) Pressão (Pa) x Volume (m <sup>3</sup> );.....	11
Figura 7 - Componentes do Ciclo Brayton aberto .....	13
Figura 8 - Componentes do Ciclo Brayton fechado .....	13
Figura 9 - Turbina a gás OPRA .....	14
Figura 10 – Gráfico da Pressão (Pa) x Volume (m <sup>3</sup> ) no Ciclo Brayton, onde Q = calor, Q <sub>q</sub> = ganho de calor e Q <sub>f</sub> = perda de calor .....	14
Figura 11 - Gráfico Temperatura (°K) x Entropia (J/K°) no Ciclo Brayton, onde Q = calor, Q <sub>q</sub> = ganho de calor e Q <sub>f</sub> = perda de calor .....	15
Figura 12 - Ciclo Rankine .....	16
Figura 13 - Gráfico Temperatura (°K) x Entropia (J/ °K) – Ciclo Rankine.....	16
Figura 14 - Aparatos utilizados na análise cromatográfica gasosa.....	18
Figura 15 - Componentes internos de um detector espectrometria de massa.....	19
Figura 16 - Componentes internos do Detector de Condutividade Térmica .....	20
Figura 17 - Bomba Calorimétrica.....	21
Figura 18 – Forno micro-ondas - Protótipo de Engenharia ONDATEC® .....	22
Figura 19 - Forno micro-ondas - UPEC-250 ONDATEC® .....	23
Figura 20 - Sistema de alimentação UPEC-250 ONDATEC® .....	23
Figura 21 – Vista lateral da cavidade de carbonização (I) e Vista frontal da descarga de carvão (II) da UPEC-250 ONDATEC® .....	24
Figura 22 - Motogerador utilizado com bio-óleo / Motor Scania / 500KVA® .....	26
Figura 23 – Balão BGS® 3 m <sup>3</sup> de armazenagem de GNC.....	26
Figura 24 - Motogerador a Diesel convertido para Biogás / Motor Scania / 500 KVa.....	27
Figura 25 - GC-DCT para análise do gás GNC.....	27
Figura 26 - CG-MS para análise do GC THERMO FISHER SCIENTIFIC® (TSQ 9000).....	28
Figura 27 - Bomba Calorimétrica para determinação do PCI do alcatrão marca Ika Works, modelo C2000.....	28
Figura 28 - Croqui do sistema de amostragem de GNC.....	30
Figura 29 - Bolsa de Tedlar® .....	31
Figura 30 - Ciclo combinado do cenário 1 com GNC e bio-óleo.....	47
Figura 31 - Ciclo combinado do cenário 2 com carvão, bio-óleo e GNC .....	52



## LISTA DE TABELAS E QUADROS

Tabela 1 - Rendimentos gravimétricos médios de carvão, alcatrão, ácido pirolenhoso e gases não condensáveis, em relação à madeira seca – Processo convencional - Carvoejamento.....	4
Tabela 2 - Sistemática de avaliação dos efluentes gerados na carbonização de madeira em fornos micro-ondas ONDATEC® .....	29
Tabela 3 - Massa de madeira enfiada e carvão produzido no Protótipo de Engenharia ONDATEC® .....	33
Tabela 4 - Massa de madeira enfiada e carvão produzido na UPEC-250 ONDATEC® .....	33
Tabela 5 - Cálculo Rendimento Gravimétrico do Carvão Vegetal do Protótipo de Engenharia e forno UPEC-250 ONDATEC® .....	33
Tabela 6 - Massa média dos GNC produzidos nos Fornos Micro-ondas ONDATEC.....	34
Tabela 7 - Poder calorífico inferior dos Compostos Químicos .....	34
Tabela 8 - Energia total armazenada no GNC do Protótipo de Engenharia ONDATEC® .....	35
Tabela 9 - Cálculo da energia total armazenada no GNC da unidade UPEC-250 de acordo com seus componentes principais.....	35
Tabela 10 - Energia total armazenada no GNC da UPEC-250 ONDATEC® .....	35
Tabela 11 - Cálculo do Potencial Energético térmico do GNC.....	36
Tabela 12 - Massa dos principais componentes dos gases condensáveis do Protótipo de Engenharia ONDATEC® e da unidade UPEC-250 ONDATEC® .....	37
Tabela 13 - Composição do gás condensável (Ácido Pirolenhoso + Alcatrão) .....	38
Tabela 14 - Cálculo do Potencial Energético do GC.....	38
Tabela 15 - Dados de geração do GNC .....	41
Tabela 16 - Potencial Energético térmico da Madeira, GNC e GC.....	43
Tabela 17 - Dados do sistema proposto.....	44
Tabela 18 - Geração elétrica com a turbina a gás fabricante OPRA .....	45
Tabela 19 - Geração elétrica com o turbo gerador no cenário 1.....	46
Tabela 20 - Geração Elétrica Ciclo Combinado - Cenário 1 .....	46
Tabela 21 - Geração elétrica com o turbo gerador no cenário 2.....	50
Tabela 22 - Geração elétrica total no cenário 2 .....	51
Quadro 1- Análise exérgica do Motor Scania 500kVA operando com GNC do Forno UPEC-250 ONDATEC®.....	40



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

Ar:	Argônio	
BC:	Básica Calculada	
BEN	Balanço Energético Nacional	
CAPEX	Capital Expenditure ou Investimento em Bens de Capital	
CH <sub>4</sub> :	Metano	
CO:	Monóxido de carbono	
CO <sub>2</sub> :	Dióxido de carbono	
DCT	Detector por Condutividade Térmica	
Ec:	Energia Cinética	[J]
Ep:	Energia Potencial	[J]
EPE:	Empresa de Pesquisa Energética	
ESALQ:	Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz	
GC:	Gás condensável	
GNC:	Gás não condensável	
H <sub>2</sub> :	Hidrogênio	
He:	Hélio	
LQCE:	Laboratórios Integrados de Química Celulose e Energia	
M:	Massa	[Kg]
N <sub>2</sub> :	Nitrogênio	
OCDE:	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico	
P:	Pressão	[Pa]
Pc:	Potencial Energético do Carvão	[Wh]
P <sub>GC</sub> :	Potencial Energético do Gás Condensável	[Wh]
P <sub>GNC</sub> :	Potencial Energético do Gás não Condensável	[Wh]
PCI:	Poder calorífico inferior	[MJ/Kg]
PCS:	Poder calorífico superior	[MJ/Kg]
PMI:	Ponto morto inferior	
PMS:	Ponto morto superior	
Q:	Calor	[J]
R <sub>c</sub> :	Razão de compressão	
R <sub>e</sub> :	Razão de expansão	



S:	Entropia / Entalpia	[J/°K] / [J]
SINDIFER:	Sindicato das Industrias do Ferro-Gusa	
T:	Temperatura	[°C]
UPEC:	Unidade de Processamento de Energia e Carvão	
USP:	Universidade de São Paulo	
V:	Volume	[m <sup>3</sup> ]
W:	Trabalho	[J]
W:	Trabalho específico	[J/Kg]



## LISTA DE SÍMBOLOS

cSt:	Centistokes	
K:	Calor específico	[J/kg*°K]
Kg:	Quilograma	
Kg/s:	Quilograma por segundo	
KJ/Kg:	Quilojoule por quilograma	
KVA:	Quilovolt-Amperes	
KW:	Quilowatt	
KWh:	Quilowatt-hora	
L/min.:	Litros por minuto	
MJ:	Megajoule	
MWh:	Megawatt-hora	
pH:	Potencial Hidrogeniônico de uma solução	
Th:	Térmico	
Ton/h:	Tonelada-hora	
Wh:	Watt-hora	
°C:	Graus Celsius	[Celsius]
°K:	Temperatura	[Kelvin]
%:	Porcentagem	
η:	Rendimento	[%]
ΔH:	Varição de Entalpia	



## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES SOBRE TERMODINÂMICA</b> .....	<b>7</b>
2.1.	Termodinâmica.....	7
2.1.1	Ciclos de Potência .....	7
2.2	Ciclos das máquinas de Combustão Interna – Ciclo a gás .....	8
2.2.1	Ciclo Otto .....	8
2.2.2	Ciclo Diesel .....	10
2.2.3	Ciclo Joule ou Brayton .....	12
2.2.3.1	Turbina a gás .....	12
2.3	Ciclo das Máquinas de Vapor – Ciclo a Vapor .....	15
2.3.1	Ciclo Rankine .....	15
2.4	Ciclo Combinado (Brayton + Rankine).....	16
2.5	Cromatógrafo Gasoso e Bomba Calorimétrica.....	17
2.5.1	Cromatógrafo Gasoso .....	17
2.5.1.1	Detector por Espectrometria de Massa (MS) .....	19
2.5.1.2	Detector por Condutividade Térmica (DCT) .....	19
2.5.2	Bomba Calorimétrica.....	20
<b>3.</b>	<b>FORNO MICRO-ONDAS ONDATEC® APLICADO À PRODUÇÃO DE CARVÃO</b> .....	<b>22</b>
3.1	Gerador a Gás Condensável (GC) .....	25
3.2	Gerador a Gás Não Condensável (GNC).....	26
3.3	Análises do GNC e GC.....	27
3.4	Separação, Coleta e Amostragem dos Gases da Carbonização .....	29
3.5	Cálculo do poder calorífico .....	31
<b>4.</b>	<b>USO DE GASES DA PRODUÇÃO DE CARVÃO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA</b> .....	<b>33</b>
4.1.	Cálculo de Energia Térmica e do Poder Calorífico Inferior do Gás não Condensável.....	34
4.2.	Cálculo de Energia Térmica e do Poder Calorífico Inferior do Gás Condensado ..	36
4.3.	Uso de geradores estacionários para o Gás Condensado e para o Gás Não Condensado.....	39
4.3.1	Motogerador a GNC .....	39
4.3.2	Motogerador a GC .....	41
4.4	Uso do ciclo combinado (Brayton + Rankine) .....	42
4.4.1	Uso do GC e GNC para Geração de Energia Elétrica .....	43
4.4.2	Uso do GC, GNC e Carvão Vegetal para Geração de Energia Elétrica .....	49
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>54</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>56</b>



## 1 - INTRODUÇÃO

Segundo Anvari e colaboradores (2016), a energia tem um papel fundamental no desenvolvimento econômico e social, e os ganhos de economia de energia têm cada vez mais mérito para explorar e aprofundar o rápido crescimento industrial, o que exige uma ampla produção de energia. O esgotamento do reservatório de combustível fóssil como o maior recurso de energia e crescente preocupação ambiental, levou o homem a apresentar novos métodos de utilização para o uso otimizado de energia. Devido à sua produção mais eficiente, as usinas de energia combinadas obtiveram mais recepção do que suas contrapartes convencionais em todo o mundo. O esforço em minimizar a poluição ambiental, garantir a sustentabilidade nos sistemas de produção e a crescente busca de novas fontes de energia, trás uma nova percepção sobre a produção de energia elétrica utilizando o biogás, no qual possui um grande potencial energético e ainda pobremente explorado no Brasil (BLEY JUNIOR, 2012).

O aumento populacional no Brasil e no mundo, assim como o desenvolvimento de alguns setores da indústria contribuem para o aumento da demanda de energia elétrica global, além de que no Brasil o custo da energia elétrica se destaca como uma das mais caras do mundo, que está relacionado ao valor dos tributos que incidem na produção e distribuição de energia, erros de projeto e planejamento e altos custos de geração e transmissão da energia elétrica no país. Estas informações fortalecem os estudos visando as gerações de energia alternativas através de fontes limpas e renováveis e que contribuem também para preservação do meio ambiente.

O Balanço Energético Nacional de 2018 (BEN), relata o consumo final de eletricidade no país em 2017, que registrou uma progressão de 0,9%. Os setores que mais contribuíram para este aumento foram o comercial (1,5%) e o industrial (1,1%). O setor residencial também teve um aumento de 0,8% no consumo de energia elétrica em relação a 2016. Ainda de acordo com Balanço Energético Nacional de 2018, a participação de energia renovável na Matriz elétrica brasileira manteve-se entre as mais elevadas do mundo (Figura 1). Porém, houve um recuo da participação de renováveis nesta matriz, que, apesar da queda da geração hidráulica, a energia eólica compensou o avanço da geração térmica a base de gás natural e derivados de petróleo (Figura 2).

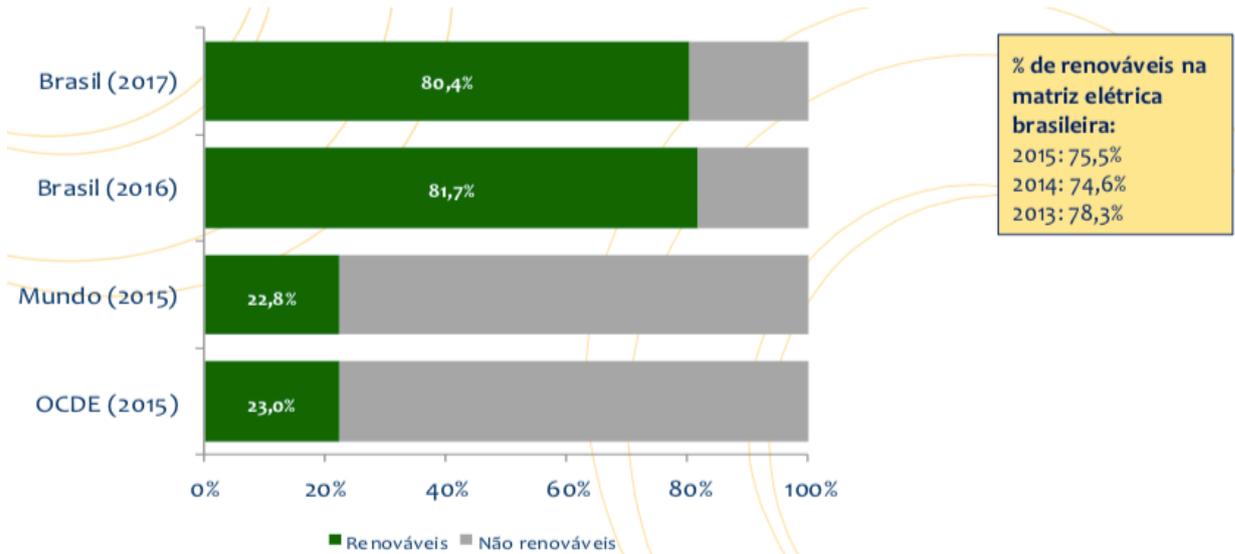


Figura 1 - Participação de renováveis na matriz elétrica  
 Fonte: (BEN, 2018)

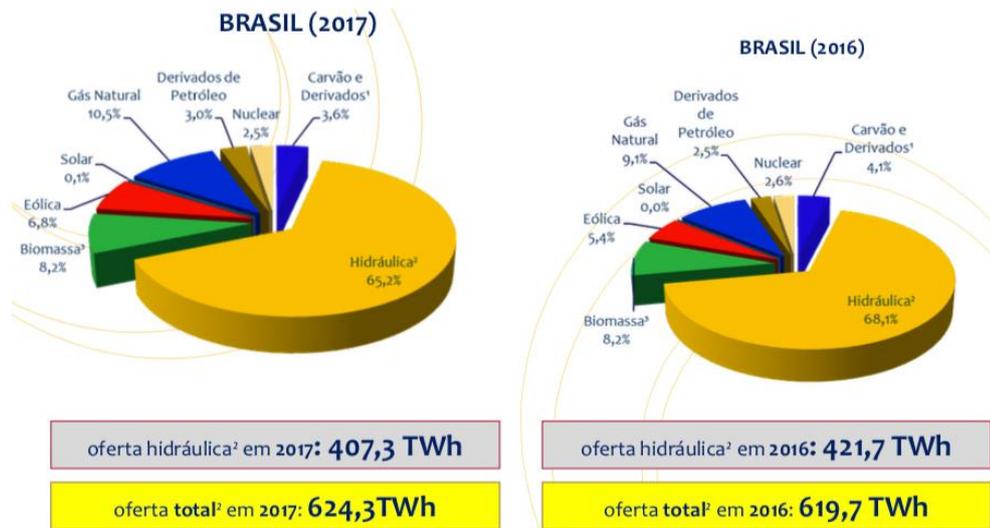
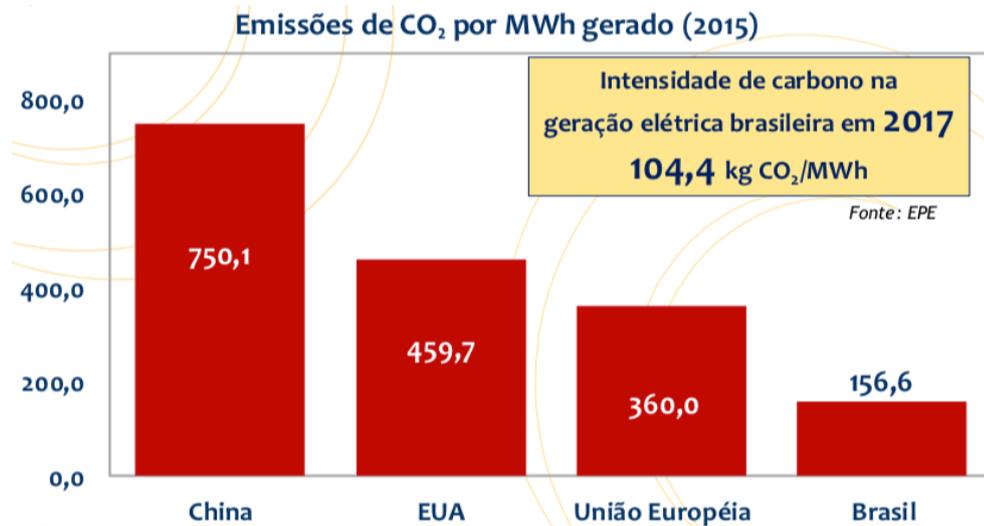


Figura 2 - Matriz elétrica brasileira e importada  
 Fonte: (BEN, 2018)

De acordo com a Figura 2, no ano de 2017, aproximadamente 80,4% da energia produzida foi proveniente de fontes renováveis, como: hidráulica, lenha e carvão vegetal, derivados de cana de açúcar, lixívia e outras fontes primárias. Apesar da geração elétrica no Brasil ser de grande parte de fontes renováveis, o país ainda é dependente da geração de energia termelétrica nos tempos de seca. Houve um aumento no uso de gás natural, carvão e derivados neste tipo de geração se comparado com o ano de 2016. Mesmo assim, o Brasil é o país que menos emite CO<sub>2</sub> por MWh gerado se comparado com China, EUA e a União Européia. Para gerar 1 MWh, o setor elétrico brasileiro emite 2,3 vezes menos CO<sub>2</sub> que o

européu, 2,9 vezes menos CO<sub>2</sub> do que o setor elétrico americano e 4,8 vezes menos CO<sub>2</sub> do que o chinês, veja Figura 3, em Kg de CO<sub>2</sub> por MWh gerados.



*Figura 3 - Emissões de CO<sub>2</sub> por MWh gerado (2015)*  
*Fonte: Agência Internacional de Energia - Elaboração: EPE*

No presente trabalho será apresentado o estudo de um sistema de geração de energia elétrica, através de motogeradores, aproveitando os gases não condensáveis (GNC) e os gases condensáveis (GC), também chamado de bio-óleo, provenientes da fabricação de carvão vegetal utilizando as ondas elétricas não ionizantes, ou seja, as micro-ondas. Também será apresentado um estudo para a geração de energia elétrica utilizando o chamado ciclo combinado que aumenta significativamente o rendimento da geração.

O Ciclo Combinado acopla o ciclo Brayton com o ciclo Rankine (XIANG; CHEN, 2007) e serão apresentados posteriormente.

Carvoejamento se dá ao processo de fabricação de carvão pelo processo convencional, onde parte da madeira é queimada para dar ignição ao processo e não há controle da entrada de oxigênio nestes fornos. Carbonização é o processo onde a energia utilizada para a queima da madeira vem de outra fonte, não da queima da própria madeira enforada, e a cavidade de produção de carvão é controlada quanto a entrada de oxigênio.

O processo de carbonização e carvoejamento produz basicamente: carvão, e por uma mistura gasosa composta de gases não condensáveis (GNC), de gases condensáveis (GC), onde a fração GC é também denominada de bio-óleo (alcatrão e ácidos pirolenhosos). A Tabela 1

apresenta a quantidade de produtos e subprodutos provenientes do carvoejamento de certa espécie de madeira, por meios convencionais, em diferentes faixas de temperatura. A tecnologia arcaica de produção do carvão industrial não favorece o aproveitamento dos efluentes gasosos. Assim, uma tonelada de madeira é convertida em 250 kg de carvão e 750 kg de gases, em média, de acordo com dados práticos da indústria do carvão.

Tabela 1 - Rendimentos gravimétricos médios de carvão, alcatrão, ácido pirolenhoso e gases não condensáveis, em relação à madeira seca – Processo convencional - Carvoejamento.

Tratamento	Carvão (%)	Alcatrão (%)	Ácido pirolenhoso (%)	Gases não condensáveis (%) *
300°C	44,49	2,92	20,06	32,53
375°C	36,42	3,55	18,27	41,77
450°C	32,79	3,81	13,77	49,63
525°C	30,05	3,49	14,85	51,61
600°C	28,63	4,39	14,97	52,01

\*Obtido por diferença.

Fonte: adaptado de VALENTE (1985).

De acordo com a indústria do setor do carvão vegetal, setenta e cinco por cento (75%) da floresta se transforma em gases por causa da tecnologia usada no carvoejamento. A troca de tecnologia, do convencional carvoejamento para a pirólise controlada pelas micro-ondas carbonização, permitirá aproveitar integralmente a energia da madeira, eliminando os poluentes GC e CNC descartados na natureza, gerando a partir deles energia elétrica com o aproveitamento dos gases gerados na indústria de carvão.

É sabido que há muito tempo as empresas mineiras buscam formas de aprimorar a produção de carvão vegetal e de aproveitamento dos efluentes, mas sem grandes evoluções na técnica e no aproveitamento energético dos resíduos. O projeto ONDATEC nasceu para suprir inicialmente a demanda de carvão para a fabricação do ferro gusa, pois a fabricação utilizando esta tecnologia é mais rápida, produz um carvão com controle de qualidade superior e não prejudica o meio ambiente com os gases produzidos.

O carvão fabricado no forno a micro-ondas pode ser utilizado na produção do ferro gusa ou no consumo em churrasqueiras, de acordo com a ONDATEC. Porém o objeto deste estudo é a geração de energia elétrica com os gases da carbonização da madeira oriundos da produção para o uso na indústria do ferro gusa, que difere do carvão de churrasco pelo elevado teor de carbono fixo.

Sabe-se que o ferro-gusa é a matéria prima do aço e sua fabricação demanda grandes quantidades de carbono que podem ser encontradas no carvão vegetal ou mineral. De acordo com a indústria do ferro gusa, em média, para a produção de 1 tonelada de ferro-gusa são consumidos 440 kg de carbono ou o equivalente a 630 kg de carvão vegetal (média de 70% de carbono fixo na massa de carvão). Segundo o Sindicato das Indústrias de Ferro-gusa do Estado de MG, o Brasil produziu em 2018, com as usinas integradas e independentes, 6,56 milhões de toneladas de ferro-gusa a carvão vegetal, veja Figura 4, e conseqüentemente consumiu aproximadamente 4,12 milhões de toneladas de carvão vegetal (Desconsiderando perdas de produção, transporte e no alto forno que somadas podem ser em torno de 20%). Essa produção de carvão geraria em torno de 5 milhões de toneladas de bio-óleo (fração líquida de gases da carbonização) e 3,36 milhões de tonelada de gás não condensável. Atualmente e utilizando como referência a geração elétrica com o Ciclo Combinado, o Brasil deixa de gerar o equivalente a 17,67 milhões de MWh de energia elétrica ao ano pelo fato de não aproveitar o potencial térmico dos efluentes do processo de carbonização ou carvoejamento.

ANO	USINAS INTEGRADAS								US INDEPENDENTES		TOTAL
	Coque	% a	% b	Carvão Vegetal	% c	% d	Total Integradas	% e	Carvão Vegetal	% f	
2007	23.962.642	92,4%	67,4%	1.980.150	7,6%	5,6%	25.942.792	73,0%	9.628.059	27,0%	35.570.851
2008	24.380.975	91,9%	69,9%	2.148.466	8,1%	6,2%	26.529.441	76,1%	8.341.967	23,9%	34.871.408
2009	18.995.360	91,0%	75,2%	1.867.000	9,0%	7,4%	20.862.360	82,6%	4.404.100	17,4%	25.266.460
2010	23.702.000	91,7%	76,8%	2.135.360	8,3%	6,9%	25.837.360	83,7%	5.027.388	16,3%	30.864.748
2011	25.334.200	91,8%	75,8%	2.256.500	8,2%	6,8%	27.590.700	82,6%	5.824.004	17,4%	33.414.704
2012	24.482.000	91,3%	75,7%	2.318.790	8,6%	7,2%	26.800.790	82,8%	5.548.051	17,2%	32.348.841
2013	23.923.456	91,3%	75,8%	2.283.244	8,7%	7,2%	26.206.700	83,0%	5.352.074	16,9%	31.558.774
2014	24.599.200	91,4%	77,0%	2.313.692	8,6%	7,2%	26.912.892	84,2%	5.035.952	15,8%	31.948.844
2015	25.592.800	92,0%	79,7%	2.210.600	8,0%	6,9%	27.803.400	86,6%	4.306.998	13,4%	32.110.398
2016	23.880.308	91,7%	80,7%	2.155.592	8,3%	7,3%	26.035.900	88,0%	3.551.290	12,0%	29.587.190
2017	25.891.186	91,4%	80,5%	2.440.214	8,6%	7,6%	28.331.400	88,1%	3.819.653	11,9%	32.151.053
2018	25.959.740	91,4%	79,8%	2.453.260	8,6%	7,5%	28.413.000	87,4%	4.109.480	12,6%	32.522.480

% a – Percentagem das integradas a coque sobre o total de produção das usinas integradas.

% b – Percentagem da produção das integradas a coque sobre o total da produção de ferro-gusa.

% c – Percentagem da produção das usinas integradas a carvão vegetal sobre a produção total das integradas.

% d – Percentagem da produção das usinas integradas a carvão vegetal sobre a produção total ferro-gusa.

% e – Percentagem da produção das usinas integradas sobre a produção total de ferro-gusa.

% f – Percentagem da produção das usinas independentes sobre a produção total ferro-gusa.

Figura 4 - Produção brasileira de Ferro-Gusa (Toneladas)

Fonte: Anuário Sindifer/MG (2019)

O teor de carbono fixo requerido do produto de saída é com base nos valores solicitados pela indústria do ferro gusa, ou seja, em torno de 33 a 40%. Manter o teor de carbono fixo mais próximo possível da linearidade pode garantir para a indústria de carvão um maior valor agregado ao seu produto, além de garantir um menor consumo de energia elétrica para a produção do carvão, já que, quanto maior o carbono fixo agregado ao carvão, maior deverá ser o tempo de residência da madeira dentro do forno, de acordo com os testes realizados pela ONDATEC. Este estudo se justifica sabendo-se que toda essa quantidade de energia é desperdiçada nos processos convencionais de carvoejamento com a consequente emissão de poluentes para atmosfera. Vale ressaltar que, como visto na figura 3 acima, esse projeto e estudo poderão ser utilizados não só no Brasil, mas em todo o mundo, contribuindo para o maior uso de fontes renováveis na geração de energia elétrica e consequente diminuição das emissões de CO<sub>2</sub> na atmosfera.

Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é o estudo da geração de energia elétrica a partir dos gases da combustão, gerados no processo de carbonização pelas tecnologias ONDATEC e oriunda da pirólise controlada da madeira, onde esses efluentes são provenientes de dois equipamentos denominados de Protótipo de Engenharia ONDATEC® e UPEC-250 ONDATEC®. A geração de energia elétrica a partir dos efluentes da carbonização da madeira é demonstrada em 2 cenários. No primeiro cenário, utiliza-se o motogerador a gás GNC (motogerador diesel convertido para biogás) e o motogerador a gás GC (motogerador diesel) e no segundo cenário, o uso do Ciclo Combinado, utilizando o Ciclo Brayton (Turbina a Gás) e o Ciclo Rankine (Turbina a Vapor), a fim de se obter um maior rendimento na geração elétrica se comparado com o uso de motogeradores para este mesmo fim.

## 2 - CONSIDERAÇÕES SOBRE TERMODINÂMICA

A princípio serão apresentados os ciclos termodinâmicos de trabalho, onde foi incluído o ciclo combinado, que é o objeto deste estudo, caldeira de recuperação, turbinas a vapor e a gás, fabricação de carvão na forma convencional, fabricação por micro-ondas, e a composição química do gás gerado na fabricação do carvão por micro-ondas onde este será utilizado para gerar energia no ciclo combinado.

### 2.1 - Termodinâmica

A termodinâmica é a ciência na qual são estudados o armazenamento, a conversão e a transferência de energia (POTTER, *et al.*, 2007). A energia pode ser armazenada por meio da associação à temperatura (energia interna), associação ao movimento (energia cinética), associação à altura (energia potencial) e associação à composição química (energia química) e suas formas podem ser transformadas umas nas outras. A seguir serão apresentados os ciclos de potência presentes na termodinâmica.

#### 2.1.1 - Ciclos de Potência

Como parte dos ciclos de potência ou ciclos termodinâmicos, estes podem ser do tipo fechado, onde o fluido de trabalho volta ao seu estado inicial ao final do ciclo e recircula, ou do tipo aberto, onde o fluido de trabalho é renovado ao fim do ciclo, como por exemplo nos motores automotivos. Por exemplo, nas centrais de potência a vapor d'água, o fluido de trabalho sofre uma série de processos e no final do ciclo retorna ao seu estado inicial. Em outras centrais de potência, como no motor de combustão interna e na turbina a gás, o fluido de trabalho não passa por um ciclo termodinâmico, mesmo que o equipamento funcione segundo um ciclo mecânico. Neste caso, o fluido de trabalho, ao final do processo, está em um estado termodinâmico diferente do inicial ou apresenta uma composição química diferente (BORGNAKE, *et al.*, 2013).

Os ciclos termodinâmicos podem ser classificados como ciclos de vapor e ciclos de gás, dependendo da fase que se encontra o fluido de trabalho. Nos ciclos a gás e durante todo esse ciclo, o fluido de trabalho permanece na fase gasosa, enquanto que, no ciclo a vapor, durante uma parte do ciclo o fluido de trabalho encontra-se na fase líquida e em outra parte deste mesmo ciclo, encontra-se na fase de vapor (ÇENGEL, *et al.*, 2006). Adiante iremos tratar de alguns ciclos termodinâmicos, comumente utilizados, e os tipos de motores que os representam.

## 2.2 - Ciclos das Máquinas de Combustão Interna

A seguir serão tratados alguns ciclos no qual o fluido de trabalho encontra-se na fase gasosa durante todo o funcionamento, ou seja, o ciclo a gás.

### 2.2.1 - Ciclo Otto

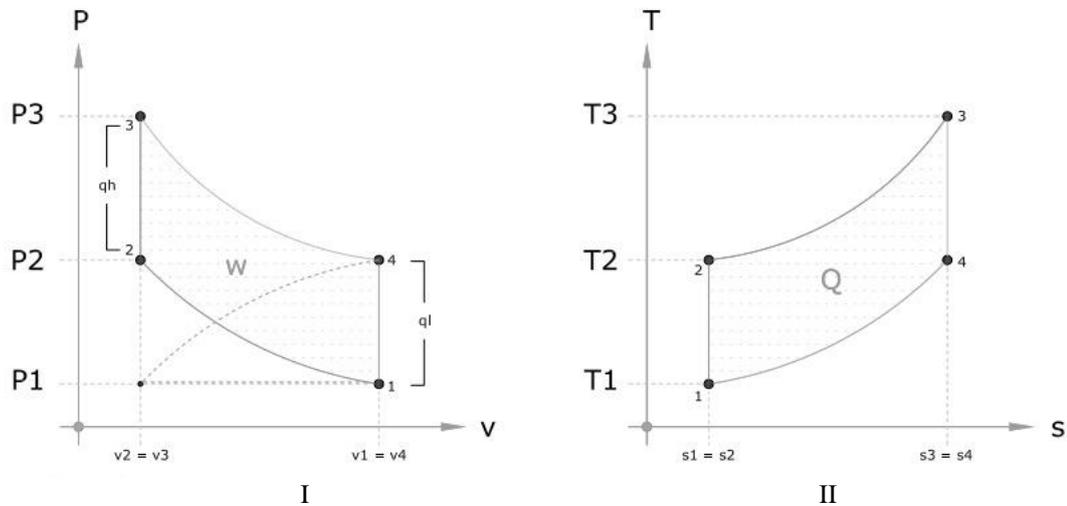
O Ciclo Otto é bastante conhecido de todos, movimenta grande parte dos automóveis presentes no mundo, podendo ser do tipo motor a quatro tempos ou motor a dois tempos. Trataremos apenas dos motores ciclo Otto a 4 tempos, por serem os mais utilizados nos dias de hoje. Recebe este nome graças a Nikolaus A. Otto, que em 1876, na Alemanha, construiu uma máquina de quatro tempos baseada no ciclo proposto pelo francês Beau de Rochas em 1862, sendo este ciclo ideal para máquinas de ignição, e são chamadas também de motores de combustão interna de quatro tempos (ÇENGEL, *et al.*, 2006).

O fluido de trabalho desta máquina é o ar, que apesar de se utilizar também o combustível, onde o volume do combustível é bem menor que o volume do ar, garantindo assim uma ótima relação ar x combustível (ÇENGEL, *et al.*, 2006). Podemos citar os motores a gasolina ou etanol no qual necessitam de uma centelha (vela de ignição) para garantir a combustão. Estes motores apresentam quatro processos (4 tempos), são eles:

1. O pistão começa do estado 1 (Ponto Morto Inferior);
2. Comprime a mistura ar/combustível até atingir o estado 2 (Ponto Morto Superior);
3. Ocorre a combustão instantânea, através da centelha (Vela de Ignição);
4. Um aumento súbito de pressão ocorre (Estado 3), promovendo trabalho, fazendo o pistão se deslocar para o ponto morto inferior, onde há a descarga dos gases da combustão, reiniciando o ciclo.

Esta sequência pode ser verificada na Figura 5 :

### CICLO OTTO - PADRÃO A AR



I  
 II  
 Figura 5 - Gráficos Ciclo Otto: (I) Pressão (Pa) x Volume ( $m^3$ );  
 (II) Temperatura ( $^{\circ}K$ ) x Entropia ( $J/^{\circ}K$ )  
 Fonte: (GUIMARÃES, 2012)

Legenda - Figura 5 (etapas do Ciclo Otto):

- Estado 1 para 2: Compressão Isentrópica (Entropia constante);
- Estado 2 para 3: Combustão e Explosão a volume constante;
- Estado 3 para 4: Expansão Isentrópica;
- Estado 4 para 1: Rejeição de calor para a atmosfera e admissão da mistura ar/combustível.

Onde:

W= Trabalho específico (J/Kg);

Q = Calor total (J);

$q_h$  = Alto calor (J);

$q_l$  = Baixo calor (J).

De acordo com (MARQUES, 1961) em seu Livro Termodinâmica, a eficiência térmica deste ciclo pode ser determinada como:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r_c^{k-1}} \quad \text{Equação (1)}$$

Onde:

$\eta$  = Eficiência térmica ou rendimento (%)

$r_c$  = Razão de compressão (adimensional)

$k$  = Calor específico do ar (J/Kg\*°K)

Em se tratando do rendimento dos motores a ciclo Otto, esse valor só depende da razão de compressão que o cilindro irá promover nos gases de combustão, porém, não se pode aumentar demasiadamente essa razão, pois se a pressão deste gás aumentar muito irá aumentar ainda mais sua temperatura e a mistura de combustível poderá entrar em pré-ignição antes do acionamento da centelha. De acordo com (MARQUES, 1961), nestes motores, a razão de compressão é limitada entre 4 a 12, sendo uma unidade adimensional que representa a proporção entre o volume da câmara de combustão quando o pistão está em ponto morto inferior e o volume da câmara de combustão quando o pistão está em ponto morto superior.

Continuando com os ciclos termodinâmicos, no próximo tópico será tratado do ciclo diesel, que ao contrário do Ciclo Otto, anteriormente estudado, não necessita de uma centelha para provocar a ignição da mistura combustível.

### **2.2.2 - Ciclo Diesel**

O Ciclo Diesel é o ciclo ideal dos motores alternativos de ignição por compressão, ou seja, quando a combustão ocorre por causa da alta temperatura do ar comprimido. O combustível diesel é injetado no cilindro, quando o pistão se aproxima de seu ponto morto superior (PMS), e a combustão ocorre por causa da temperatura alta do ar comprimido. Esse tipo de motor é denominado de motor por ignição por compressão e o ciclo ideal utilizado para modelar este motor é o Ciclo Diesel (POTTER, *et al.*, 2007).

Assim como o ciclo Otto e os demais ciclos termodinâmicos, o fluido de trabalho neste sistema é o ar, que apesar do uso do diesel, o volume deste combustível é bem menor que o volume do ar.

Estes motores com Ciclo Diesel, assim como o Ciclo Otto, apresentam 4 etapas, são eles:

1. O pistão começa do estado 1 (Ponto Morto Inferior);
2. Comprime o ar até atingir o Ponto Morto Superior (Estado 2). Então é injetado o combustível diesel;
3. Ocorre a combustão instantânea, através da alta temperatura em que o ar se encontra;
4. Um aumento súbito de pressão ocorre (Estado 3), promovendo trabalho, fazendo o pistão se deslocar para o Ponto Morto Inferior, onde há a descarga dos gases da combustão, reiniciando o ciclo.

O Ciclo a Diesel pode ser visualizado na Figura 6 .

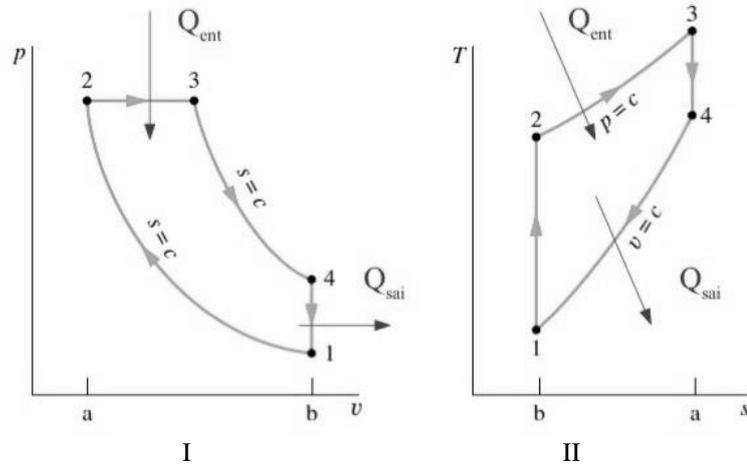


Figura 6 – Gráficos Ciclo Diesel: (I) Pressão (Pa) x Volume ( $m^3$ );  
(II) Temperatura ( $^{\circ}K$ ) x Entropia ( $J/^{\circ}K$ ).  
Fonte: (FRANKLIN, 2018)

Legenda - Figura 6 (etapas do Ciclo Diesel):

- Estado 1 para 2: Compressão Isentrópica (Entropia constante);
- Estado 2 para 3: Combustão e Explosão a pressão constante;
- Estado 3 para 4: Expansão Isentrópica;
- Estado 4 para 1: Rejeição de calor a volume constante e admissão de ar.

Onde:

- $Q_{ent}$  = Admissão de calor (J);
- $Q_{sai}$  = Rejeição de calor (J).

De acordo com (MARQUES, 1961) em seu Livro Termodinâmica, a eficiência térmica deste ciclo pode ser determinada como:

$$\eta = 1 - \left(\frac{1}{r_c^{k-1}}\right) * \frac{r_e^{k-1}}{k(r_e-1)} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

- $\eta$  = eficiência térmica ou rendimento (%)
- $r_c$  = razão de compressão (adimensional)
- $r_e$  = razão de expansão da combustão (razão entre o volume final e o volume inicial, na transformação isobárica) (adimensional)

$k = \text{calor específico do ar (J/Kg} \cdot \text{°K)}$

Nota-se que o rendimento deste ciclo seria igual ao do ciclo Otto, se não fosse pela segunda fração presente na fórmula.

Com base nos rendimentos do Ciclo Otto e do Ciclo Diesel e em igualdade de razão de compressão, o Ciclo Diesel apresenta menor rendimento que o Ciclo Otto. Porém nas máquinas reais, que movimentam os veículos, enquanto o motor a Ciclo Otto comprime a mistura ar x combustível, onde não se pode ter uma razão de compressão muito alta por causa da ignição espontânea da mistura combustível, o motor a Ciclo Diesel comprime apenas o ar. Com isso a razão de compressão do motor a Ciclo Diesel pode ser maior que a do Ciclo Otto. A razão de compressão nos motores a ciclo Diesel é da ordem de 11 a 20, maior que no ciclo Otto (MARQUES, 1961).

Continuando com o assunto sobre Ciclos a Gás, a seguir será mencionado o Ciclo de Potência Brayton (Ciclo Joule ou Brayton), que é o ciclo utilizado nas turbinas a gás e que, além do ciclo Diesel, é um dos ciclos propostos neste estudo.

### **2.2.3 - Ciclo Joule ou Brayton**

De acordo com (ÇENGEL, *et al.*, 2006), o Ciclo Joule, ou mais conhecido como Ciclo Brayton, é o ciclo ideal para os motores de turbina a gás. Motores de turbina a gás reais, ou seja, que funcionam na prática, operam em um ciclo aberto, onde o fluido de trabalho (ar) é renovado ao final do ciclo.

#### **2.2.3.1 - Turbina a Gás**

Nas turbinas a gás há uma câmara de combustão interna onde o gás é queimado juntamente com o comburente, o oxigênio, porém, antes de chegar até a câmara de combustão, o mesmo é comprimido por um compressor e ao chegar à câmara de combustão é misturado com o gás. Um ignitor faz o papel dar início à queima desta mistura, onde os gases da expansão giram as palhetas da turbina. Por fim estas palhetas estão acopladas a um eixo que é responsável por movimentar o rotor de um gerador de energia elétrica. No final do processo os gases da combustão podem ser liberados para a atmosfera, geralmente quando utilizadas em motores de veículos, operando no chamado ciclo aberto, Figura 7, ou quando utilizadas em usinas termelétricas operam em ciclo fechado, Figura 8, pois os gases de saída da turbina são

reaproveitados, por exemplo, em um trocador de calor para aproveitamento da energia térmica ainda presentes nestes gases (POTTER, *et al.*, 2007).

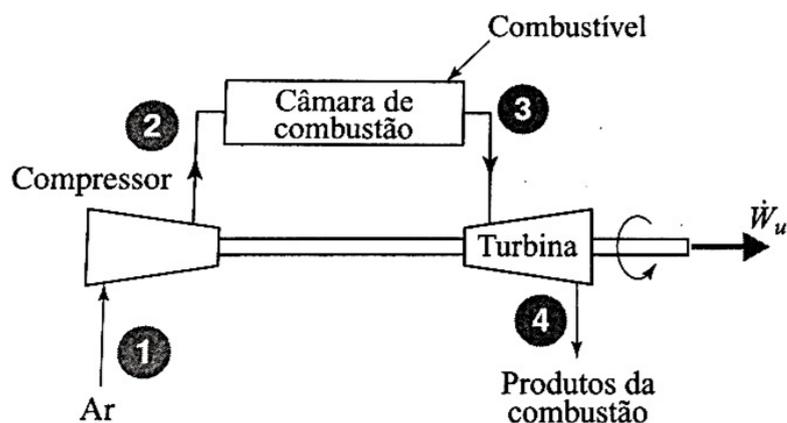


Figura 7 - Componentes do Ciclo Brayton aberto  
Fonte: (POTTER, *et al.*, 2007)

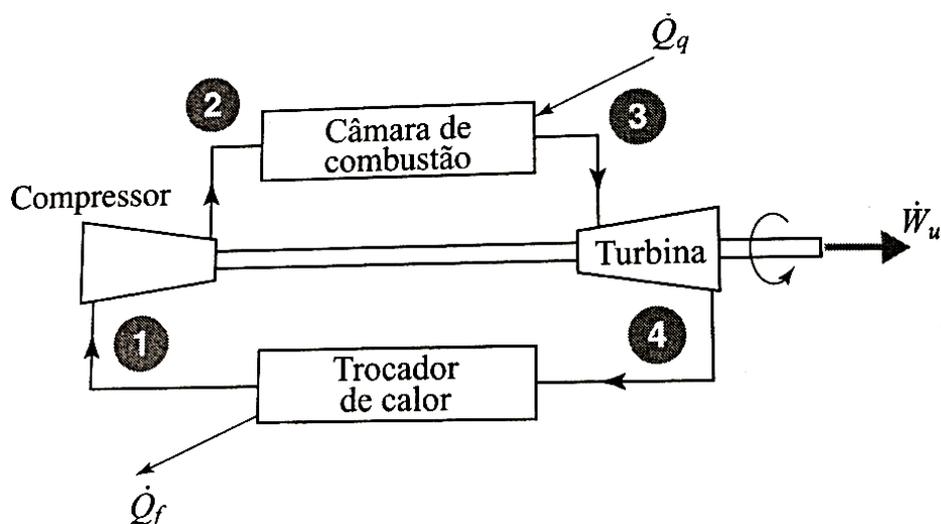


Figura 8 - Componentes do Ciclo Brayton fechado  
Fonte: (POTTER, *et al.*, 2007)

Há um inconveniente neste sistema pois nem todo o trabalho realizado na queima da mistura combustível x comburente é utilizada para movimentar o rotor do gerador. Boa parte do trabalho mecânico realizado pela turbina é drenada para o funcionamento do compressor presente, limitando o rendimento deste ciclo (POTTER, *et al.*, 2007).

Os componentes que fazem parte deste ciclo, podem ser visualizados nas Figuras 7 e 8 acima e na Figura 9 a seguir, onde é representada uma turbina a gás da fabricante holandesa OPRA.

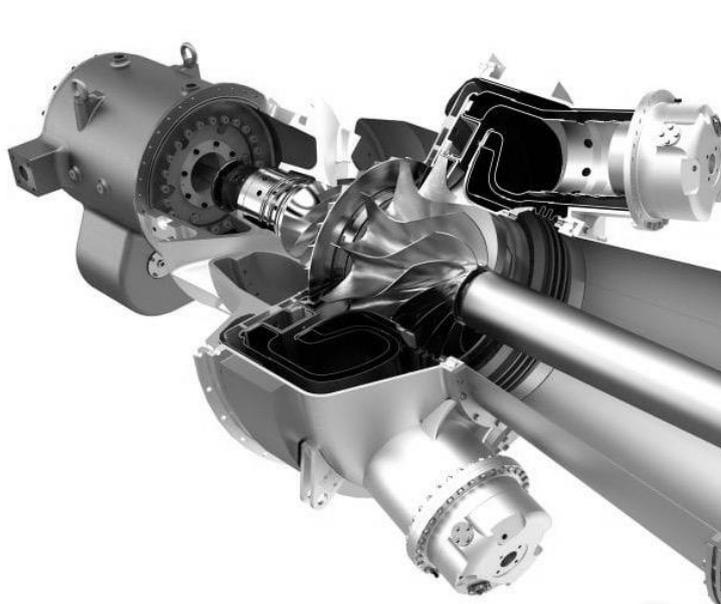


Figura 9 - Turbina a gás OPRA  
Fonte: [www.opraturbines.com](http://www.opraturbines.com)

Os ciclos termodinâmicos deste sistema OPRA, onde a pressão x volume e temperatura x entalpia, podem ser visualizados nas Figura 10 e 11:

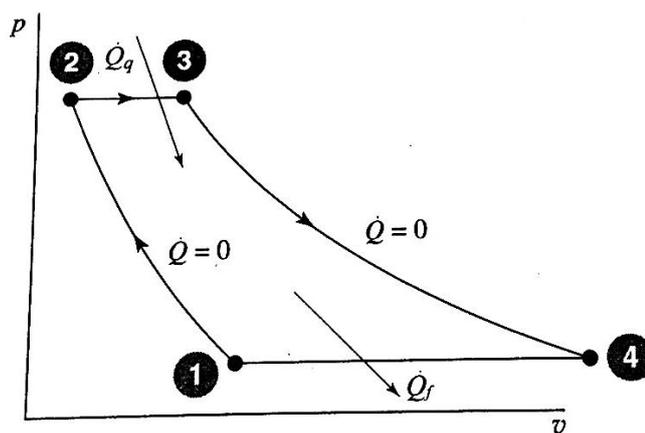


Figura 10 - Gráfico da Pressão (Pa) x Volume ( $m^3$ ) no Ciclo Brayton, onde  $Q$  = calor,  $Qq$  = ganho de calor e  $Qf$  = perda de calor  
Fonte: (POTTER, et al., 2007)

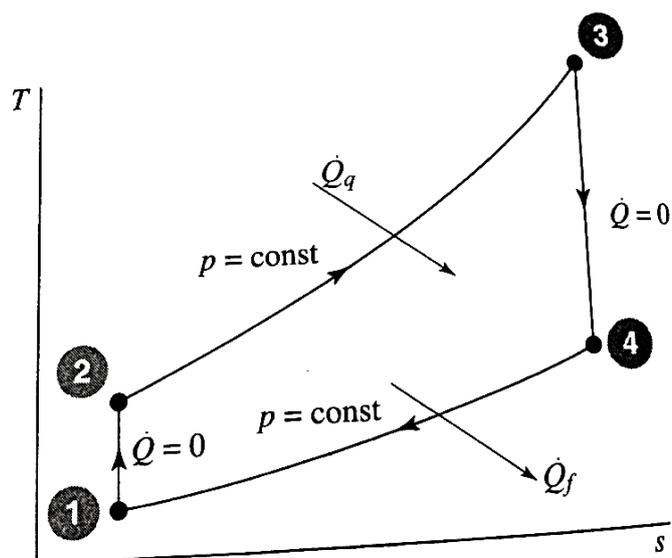


Figura 11 - Gráfico Temperatura ( $^{\circ}\text{K}$ ) x Entropia ( $\text{J}/\text{K}^{\circ}$ ) no Ciclo Brayton, onde  $Q$  = calor,  $Q_q$  = ganho de calor e  $Q_f$  = perda de calor  
 Fonte: (POTTER, *et al.*, 2007)

Este ciclo a Gás utiliza compressão e expansão isentrópica, ou seja, é aquela em que a entropia do sistema permanece constante. Existem outros ciclos termodinâmicos a gás, porém o objetivo deste estudo é demonstrar apenas os principais ciclos que compõem o processo a gás.

Os ciclos de potência a vapor são apresentados na seção 2.3, a seguir. Este assunto é também abordado no final deste trabalho.

### 2.3 - Ciclos das Máquinas de Vapor – Ciclo a Vapor

O vapor d'água é utilizado mais comumente como fluido de trabalho neste ciclo, devido as muitas características atrativas, como baixo custo, disponibilidade e alta entalpia de vaporização. (Çengel, *et al.*, 2007). O Ciclo Rankine é o ciclo utilizado neste estudo e pode ser visualizado a seguir.

#### 2.3.1 - Ciclo Rankine

O Ciclo Rankine é o ciclo utilizado para representar os processos de geração de energia elétrica a partir do vapor d'água (Çengel, *et al.*, 2007). Assim como os demais ciclos, ele se baseia em quatro processos termodinâmicos, são eles:

1. Bombeamento sem trocas de calor (adiabático) e a baixa pressão;

2. Transformação da água em vapor na caldeira a pressão constante;
3. Na turbina há expansão adiabática;
4. No condensador há condensação do vapor a pressão constante.

O Ciclo Rankine é representado esquematicamente na Figura 12. O gráfico Temperatura x Entropia pode ser visualizado na Figura 13.

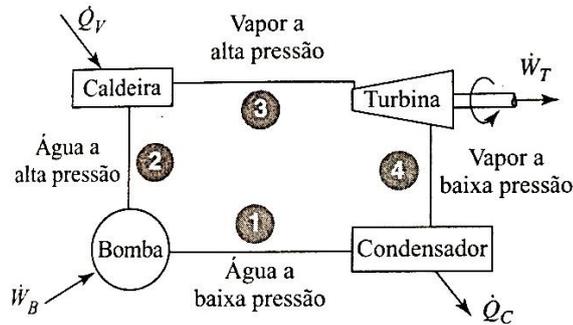
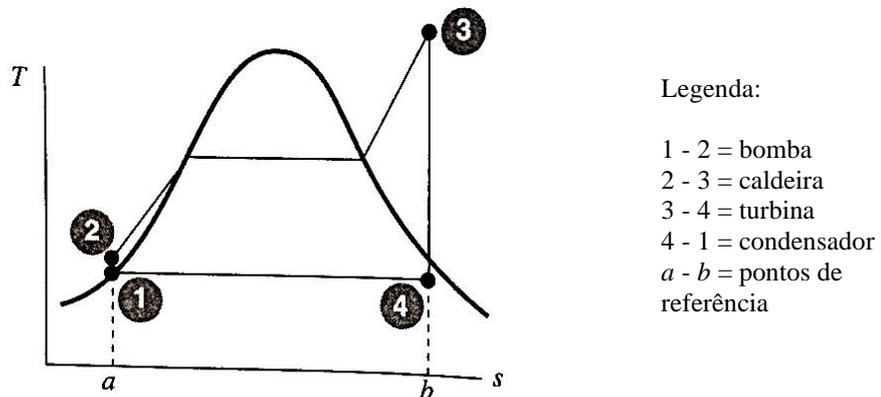


Figura 12 - Ciclo Rankine  
Fonte: (POTTER, et al., 2007)



Legenda:  
 1 - 2 = bomba  
 2 - 3 = caldeira  
 3 - 4 = turbina  
 4 - 1 = condensador  
 a - b = pontos de referência

Figura 13 - Gráfico Temperatura ( $^{\circ}K$ ) x Entropia ( $J/ ^{\circ}K$ ) - Ciclo Rankine  
Fonte: (POTTER, et al., 2007)

Uma possível desvantagem deste Ciclo Rankine é o fato de ocorrer possíveis formações de gotículas de água no vapor que podem danificar seriamente as pás da turbina. Para evitar que as gotículas cheguem até a turbina, o vapor saturado gerado na caldeira é realimentado na câmara de combustão da mesma, para a geração de vapor superaquecido, retirando qualquer possibilidade de partículas de água e posteriormente esse vapor alimentará a turbina.

### 2.4 - Ciclo Combinado (Brayton + Rankine)

A ideia básica do sistema combinado, consiste em utilizar a energia contida nos gases de escape da câmara de combustão em um processo de vapor conectado por meio de uma

caldeira de recuperação a jusante da turbina a gás (PATIÑO; ROSERO, 2017). Ainda de acordo com Patiño e Rosero, (2017), o resultado da eficiência energética de uma planta operando no ciclo combinado, depois de aplicar a primeira e a segunda lei da termodinâmica, é de 53%. Empresas como General Electric® (GE) e Siemens® possuem sistemas de ciclo combinado onde o rendimento superam os 50%, como mencionado.

A seguir será abordado os instrumentos utilizados na caracterização dos componentes do gás condensado e do gás não condensado provenientes dos efluentes da carbonização da madeira pelas micro-ondas tecnologia ONDATEC.

## **2.5 - Cromatógrafo Gasoso e Bomba Calorimétrica**

Cromatógrafo Gasoso e Bomba Calorimétrica são instrumentos utilizados neste estudo para análise dos efluentes da carbonização da madeira pelas micro-ondas tecnologia ONDATEC. Estes instrumentos serão melhor descritos abaixo.

### **2.5.1 - Cromatógrafo Gasoso**

O Cromatógrafo gasoso é um instrumento que permite analisar quantitativamente os componentes presentes em uma determinada amostra, baseado em um banco de dados pré-estabelecido, e em padrões internos e/ou externos. A análise utilizando este equipamento é denominada cromatografia, à partir de cromatograma gerado (PERES, 2002).

A Cromatografia gasosa é definida como um método físico de separação da amostra em seus componentes individuais ou grupos químicos. Os componentes presentes na amostra são distribuídos entre duas fases no interior do aparelho (LANÇAS, 1983): fase fixa ou estacionária (coluna de separação), e fase móvel (gás de arraste inerte). Esta separação é resultante das diferenças de velocidade e afinidade dos componentes individuais da amostra, arrastados pela fase móvel devido às diferentes interações destes mesmos componentes com a fase estacionária, e apresenta alto poder de resolução (análise de muitos componentes de uma única amostra) (PERES, 2002).

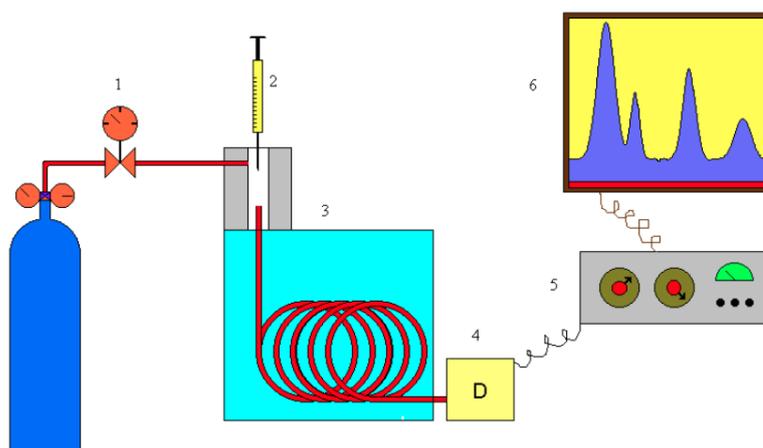
A fase estacionária na Cromatografia Gasosa é um material que pode ser do tipo líquido (Cromatografia Gás-Líquido) ou pode ser um sólido (Cromatografia Gás-Sólido), que possibilita a separação da mistura por meio de processos químicos e físicos. A fase móvel é um

gás de arraste, que tem a função de transportar a amostra pela coluna de separação até o detector dos componentes da amostra. Utilizam-se comumente os gases hélio (He), hidrogênio (H<sub>2</sub>), nitrogênio (N<sub>2</sub>), ou argônio (Ar). A escolha do gás de arraste a ser utilizado dependerá do tipo de material a ser analisado, onde ele deverá se apresentar inerte (PERES, 2002).

O detector irá analisar de forma contínua todo o material que sai da coluna de separação e gerar um sinal para cada substância em relação ao tempo de retenção do componente na coluna. Os detectores utilizados neste estudo são: espectômetro de massa e condutividade térmica. Estes dois detectores foram utilizados separadamente um para cada tipo de material a ser analisado.

Na Figura 14 está esquematizado os aparatos envolvidos na análise cromatográfica, sendo:

1. Válvula de injeção do gás de arraste;
2. Sistema de injeção da amostra;
3. Coluna cromatográfica
4. Detector
5. Processador de sinais
6. Registro dos picos dos componentes (cromatograma)



*Figura 14 - Aparatos utilizados na análise cromatográfica gasosa.*  
Fonte: (PONT, 2018)

### 2.5.1.1 - Detector Espectrometria de Massa (MS)

Este detector detecta o componente através da fragmentação da estrutura química dos compostos presentes na amostra (LANÇAS, 1983). A Figura 15 demonstra as partes de um detector por espectrometria de massa.

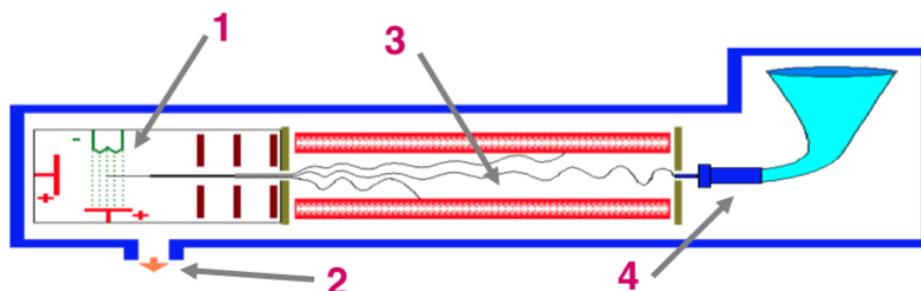


Figura 15 - Componentes internos de um detector espectrometria de massa  
Fonte: (UFMS, 2011)

1. Câmara de Ionização: Elétrons gerados por um filamento aquecido bombardeiam a amostra que sai da coluna de separação. Os fragmentos ionizados são repelidos pelo eletrodo positivo e conduzidos ao separador magnético;
2. Saída de Vácuo: Todo o interior do espectrômetro de massa deve estar sob alto vácuo;
3. Separador Magnético: A ação do campo magnético deixa apenas íons com determinada razão massa/carga atravessar esta área do equipamento;
4. Detector: Uma válvula fotomultiplicadora ou um fotodiodo gera um sinal elétrico proporcional ao número de íons que incide sobre o elemento.

### 2.5.1.2 - Detector por Condutividade Térmica (DCT)

Este detector é considerado universal, ou seja, gera um sinal para qualquer substância separada e mede a diferença de condutividade térmica entre o gás de arraste e o gás de arraste mais a amostra (LANÇAS, 1983).

Geralmente, este tipo de detector, é utilizado para compostos inorgânicos, orgânicos, derivados de petróleo. Ele possui dois ou quatro filamentos de tungstênio (W), níquel (Ni), platina (Pt) ou Pt – W que são aquecidos por uma corrente elétrica. De acordo com a passagem

do gás por estes filamentos ocorre transferência de calor e a condutividade térmica juntamente com o tempo de passagem do gás são registrados a partir dos picos dos componentes. Esta análise se faz comparando-se o gás de arraste com a amostra, que passa por um conjunto de filamentos, com o gás de arraste puro, que passa por outro conjunto de filamentos (PERES, 2002). A Figura 16 apresenta o fluxograma das partes de um detector DCT.

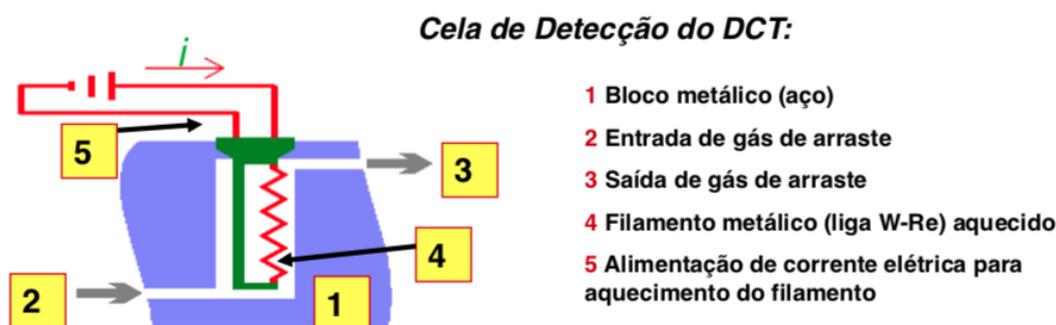
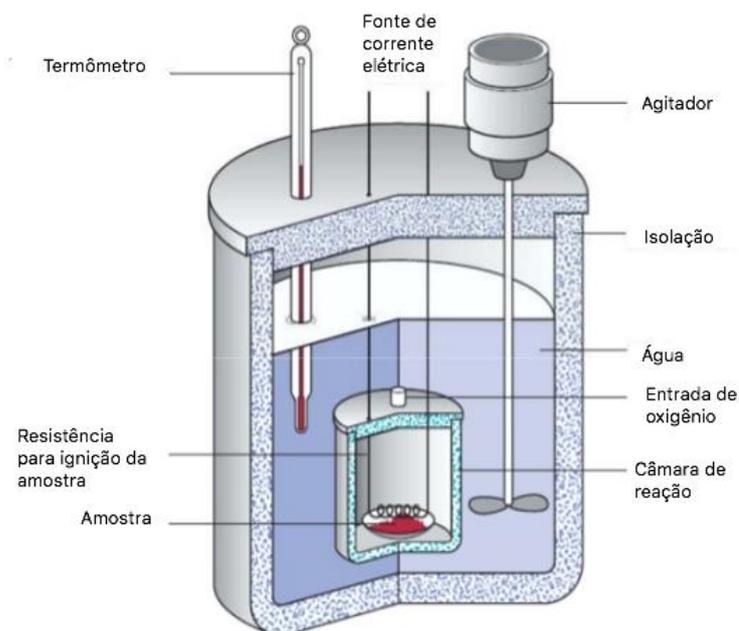


Figura 16 - Componentes internos do Detector de Condutividade Térmica  
 Fonte: (UFMS, 2011)

### 2.5.2 - Bomba Calorimétrica

A bomba calorimétrica é um equipamento bastante utilizado para a medição de energia térmica (medição de calor) em um composto (SOTO; NUÑEZ, 2008). A determinação do poder calorífico superior em combustíveis é realizada através do uso de calorímetros, sendo um destes a bomba calorimétrica. Ainda de acordo com Soto e Nuñez (2008) este ensaio experimental consiste em queimar uma determinada quantidade do material a ser analisado para que a energia em forma de calor liberada, seja absorvida por um fluído conhecido, como a água.

A bomba calorimétrica é um recipiente com tampa roscada fabricada com aço inoxidável, no qual se coloca a amostra a ser analisada. Existem duas barras metálicas que está unida com um arame de cobre, e um filamento de algodão que une a amostra e o arame (SUAREZ; CASTRO, 1999). As barras metálicas estão conectadas a um circuito elétrico que produz uma variação de tensão entre os terminais, elevando a temperatura do arame e conseqüentemente queimando o filamento de algodão e a amostra (MARIDUEÑA, 1997). Na Figura 17 pode-se verificar as partes constituintes de uma bomba calorimétrica.



*Figura 17 - Bomba Calorimétrica*  
*Fonte: (JUNIOR, 2011) adaptada*

Nos experimentos realizados neste trabalho, ela foi utilizada para medir o poder calorífico do alcatrão, obtido através da carbonização da madeira pelas micro-ondas. No capítulo 3 serão abordados os materiais e métodos utilizados neste estudo.

### 3 - FORNO MICRO-ONDAS ONDATEC® APLICADO À PRODUÇÃO DE CARVÃO

Os fornos industriais utilizados neste estudo, foram: um forno piloto ou protótipo de engenharia e um forno industrial denominado UPEC250, ambos construídos pela empresa ONDATEC – Tecnologia Industrial em Micro-ondas S.A., e a madeira carbonizada foi da espécie *Eucalyptus citriodora*.

O forno protótipo de engenharia ONDATEC® é alimentado com cavacos de madeira e possui primeiramente em sua configuração, em sequência, uma esteira de alimentação, uma balança para pesagem do material de entrada, uma cavidade de secagem pelas micro-ondas com esteira transportadora, uma cavidade de carbonização pelas micro-ondas, também com uma esteira transportadora, e um silo de armazenagem sem oxigênio do carvão produzido. A Figura 18 demonstra o forno descrito.



*Figura 18 – Forno micro-ondas - Protótipo de Engenharia ONDATEC®  
Fonte: ONDATEC – Tecnologia Industrial em Micro-ondas S.A.*

O forno UPEC-250 ONDATEC® a seguir (Figura 19), possui 42m de comprimento, sendo destes, 36 metros utilizados para a carbonização da madeira e os 6 metros restantes utilizados para o pré-resfriamento do carvão. O forno possui em sua configuração um total de 320 módulos emissores de radiações não-ionizantes (micro-ondas), com uma produção média de 250 kg de carvão vegetal por hora, dependendo do tipo e característica da matéria prima de entrada no forno. O tempo médio de permanência da madeira no interior do forno é de 3 a 4 horas e sua temperatura interna de trabalho se encontra em torno de 400°C a 500°C. O resfriamento do carvão se dá com o uso de “containers”, de capacidade para até 1m<sup>3</sup> de carvão, projetados para esta finalidade, que não permite a entrada do ar após fechamento. Estes “containers” são acoplados no sistema de descarga do forno e trocados quando cheios.



*Figura 19 - Forno micro-ondas - UPEC-250 ONDATEC®  
Fonte: ONDATEC – Tecnologia Industrial em Micro-ondas S.A.*

O forno descrito, na Figura 19 e por questões de projeto mecânico, é alimentado com toletes de 20 cm de altura. Possui tecnologia limpa, precisa, rápida e contínua e excelente nível de automação capaz de, em pleno funcionamento, alterar a qualidade de carvão que se deseja obter, e que realiza a carbonização contínua da madeira, busca o reaproveitamento dos efluentes da carbonização para a geração de energia elétrica e permite gerenciar o perfil térmico do forno, alterar a velocidade da esteira e potência elétrica do forno. A alimentação da UPEC-250 ONDATEC® é realizada inicialmente de forma manual e após o operador posicionar os toletes e apertam duas botoeiras, o sistema descarrega os toletes na esteira transportadora de forma automática. Este sistema poderá ser visualizado na Figura 20 a seguir.



*Figura 20 - Sistema de alimentação UPEC-250 ONDATEC®  
Fonte: ONDATEC – Tecnologia Industrial em Micro-ondas S.A.*

Após alimentação, os toletes são transportados ao longo da cavidade de carbonização e recebem a radiação de micro-ondas, inicialmente secando e posteriormente carbonizando-os. No final da esteira, há o setor de descarga, onde o carvão será armazenado em “containers”. Vale ressaltar que o operador não possui contato direto com a produção do carvão e o ambiente é livre de sólidos em suspensão, totalmente diferente dos processos convencionais de fabricação de carvão. A cavidade de carbonização (I) e o setor de descarga de carvão (II) podem ser visualizados na Figura 21.



*Figura 21 – Vista lateral da cavidade de carbonização (I) e Vista frontal da descarga de carvão (II) da UPEC-250 ONDATEC®*

*Fonte: ONDATEC – Tecnologia Industrial em Micro-ondas S.A.*

Todo esse processo é realizado em atmosfera controlada, onde não há queima da madeira, como ocorre nos processos convencionais de carvoejamento, e isso é ideal para produzir um gás combustível com elevado poder calorífico. Os gases produzidos podem ser utilizados de diversas formas, tais como: reaproveitamento na secagem da madeira a ser enfiada, para produção de energia elétrica.

A massa total de madeira enfiada no protótipo de engenharia ONDATEC® foi de 3043 kg com um teor de umidade em torno de 5,4%, o que representa uma massa de 2878 kg de madeira seca. A massa total de madeira enfiada na UPEC-250 ONDATEC® foi de 4172 kg com um teor de umidade também em torno de 5,4%, o que representa uma massa de 3947 kg de madeira seca.

As amostragens dos efluentes gerados pela carbonização, nos dois equipamentos, foram realizadas após o sistema estar em regime, ou seja, após o aquecimento inicial do forno e estabilização das temperaturas internas do mesmo.

Ainda em relação aos dois equipamentos, a temperatura interna na cavidade de carbonização é separada por zonas, sendo a primeira zona, de secagem, setada para as temperaturas entre 100°C a 150°C, a segunda zona, extração de voláteis, opera entre as temperaturas de 150°C a 250°C e a terceira zona, zona de pirólise, opera entre as temperaturas de 250°C a 350°C. As temperaturas mencionadas são as temperaturas ambientes dentro da cavidade de carbonização, sendo as temperaturas do material aproximadamente 1,5 vezes maiores que a temperatura ambiente dentro da cavidade de carbonização. Não há medição direta da temperatura do material por limitação dos sensores empregados, pois os mesmos não podem estar em contato direto com o material pois se deformam com o impacto mecânico.

### **3.1 - Gerador a Gás Condensável (GC)**

O motogerador utilizado na geração de energia elétrica por meio do gás condensável, também denominado de bio-óleo, inicialmente é alimentado com combustível diesel e para os testes realizados neste trabalho não sofreu nenhuma modificação. O motogerador possui uma potência de geração elétrica de 500 KVA, apresenta juntamente com o motor a combustão interna, um gerador acoplado. O conjunto foi montado pela empresa STEMAC, como pode ser visualizado na Figura 22.

O teste de funcionamento do gerador a bio-óleo foi feito utilizando diversas emulsões com Etanol, iniciando com uma mistura a 4% de etanol e aumentando a porcentagem até obter a viscosidade necessária para o bom funcionamento. Durante os testes, o motor foi ligado com o óleo diesel e aos poucos era substituído pelo bio-óleo. Para o bio-óleo com maior teor de água, notou-se que o motor não estabilizava a rotação, falhando com frequência. À medida que se reduzia o teor de água, aumentava a viscosidade e a dificuldade de bombear o óleo. A viscosidade ideal foi obtida com emulsões com 40% de Etanol. A presença de água na biomassa possibilita a variação do teor de água no bio-óleo, o que é inconveniente, pois reduz o poder calorífico do mesmo (BRIDGWATER; PEACOCKE, 2000). A Figura 22 mostra o motogerador utilizado na pesquisa.



*Figura 22 - Motogerador utilizado com bio-óleo / Motor Scania / 500KVA®  
Fonte: ONDATEC – Tecnologia Industrial em Micro-ondas S.A.*

### **3.2 – Gerador a Gás Não Condensável (GNC)**

Para a geração de energia elétrica através dos gases não condensáveis, também utilizou-se um motogerador com potência de 500 KVA, idêntico ao utilizado para a geração de energia com o bio-óleo e informado no tópico 3.1 (*Gerador a Gás Condensável (GC)*), porém este gerador a diesel foi adaptado para o GNC (Figura 24), pela empresa Biogás Motores.

Com o gerador adaptado, foi possível verificar a viabilidade do aproveitamento do GNC para o sistema ONDATEC® de pirólise da madeira em carvão. O rendimento energético esperado era de 35%, valor teórico do gerador, mas o observado foi de 26%. Para uso no gerador, o GNC foi armazenado em balão com capacidade de 3 m<sup>3</sup> (Figura 23), o mesmo usado para capturar o metano em biodigestores.



*Figura 23 – Balão BGS® 3 m³ de armazenagem de GNC.  
Fonte: ONDATEC – Tecnologia Industrial em Micro-ondas S.A.*



*Figura 24 - Motogerador a Diesel convertido para Biogás / Motor Scania / 500 KVa  
 Detalhe: I - Central de controle do motogerador / II - Vista geral do motogerador  
 Fonte: ONDATEC - Tecnologia Industrial em Micro-ondas S.A.*

O gerador a GNC não apresentou nenhum problema em comparação com o gerador a GC. Como o gás é isento de partículas sólidas e de enxofre, o motor funcionou sem falhas, sendo indicado para uso com o GNC com a vantagem de apresentar baixo investimento para a geração de energia. Entretanto, o maior potencial gerador está no bio-óleo, como poderá ser verificado a diante.

No próximo tópico serão abordados os equipamentos utilizados nas análises do gás condensado (alcatrão e ácidos pirolenhosos) e do gás não condensado.

### **3.3 - Análises do GNC e GC**

A análise do gás não condensado, foi realizada no Cromatógrafo Gasoso acoplado ao Detector por Condutividade Térmica (DCT), marca THERMO FISHER SCIENTIFIC®, modelo Trace GC Ultra. Esta análise foi realizada pela ESALQ (Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - Universidade de São Paulo) nas dependências da ONDATEC.(Figura 25).



*Figura 25 - GC-DCT para análise do gás GNC  
 Fonte: E. U. BUCEK (2009)*

Na análise dos componentes do ácido pirolenhoso presente no GC, foi utilizado o cromatógrafo gasoso acoplado ao Espectrofotômetro de Massa da marca THERMO FISHER SCIENTIFIC®, modelo TSQ 9000, e para determinação do poder calorífico inferior (PCI) do alcatrão, foi utilizada a bomba calorimétrica. Estas análises foram realizadas pela ESALQ (Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”- Universidade de São Paulo) nas dependências da própria escola e a Figura 26 demonstra o Cromatógrafo Gasoso acoplado ao Espectrofotômetro de Massa e na Figura 27 é mostrado a bomba calorimétrica marca Ika Works (modelo C2000) para verificação do PCI do alcatrão.



*Figura 26 - CG-MS para análise do GC THERMO FISHER SCIENTIFIC® (TSQ 9000)*  
Fonte: (LQCE/ESALQ/USP, 2010)



*Figura 27 - Bomba Calorimétrica para determinação do PCI do alcatrão marca Ika Works, modelo C2000*  
Fonte: (LQCE/ESALQ/USP, 2010)

### 3.4 - Separação, Coleta e Amostragem dos Gases da Carbonização

A separação dos efluentes gerados em ambos os projetos (com fornos UPEC-250 ONDATEC® e Protótipo de Engenharia ONDATEC®), foi realizada através de um lavador de gases, também presente na planta ONDATEC. Os gases da combustão foram retirados do interior da cavidade de carbonização através de exaustores e posteriormente adentravam pela parte média no lavador de gases. No topo do lavador de gases, o bio-óleo já resfriado foi aspergido e em contra fluxo com os gases da combustão, que estavam no sentido ascendente, onde ocorria troca de calor entre eles, e a separação dos gases condensáveis (GC) e dos gases não condensáveis (GNC). A fração de menor volatilidade, o condensável (GC), saiu pela parte inferior do lavador e a fração de maior volatilidade (GNC), saiu pela parte superior do equipamento.

Os dispositivos necessários para a execução das análises do GC e GNC foram instalados de modo “online” ao processo, junto à chaminé. As coletas e análises de gases ocorreram em intervalos de 4 horas. A sistemática utilizada é representada na Tabela 2 :

Tabela 2 - Sistemática de avaliação dos efluentes gerados na carbonização de madeira em fornos micro-ondas ONDATEC®.

	Componente				
	Madeira	Carvão	GNC	GC	Alcatrão
<b>Calorimetria</b>	3 amostras	3 amostras	**	***	AC4
<b>Espectrometria de massa</b>	---	---	---	AC4	---
<b>Cromatografia gasosa</b>	---	---	AC4	---	---
<b>Pesagem</b>	3 amostras	3 amostras	#	AC4	AC4

\*\* Determinação por meio de balanço de massa e poderes caloríficos.

\*\*\* Cálculo por meio de balanço de massa e energia.

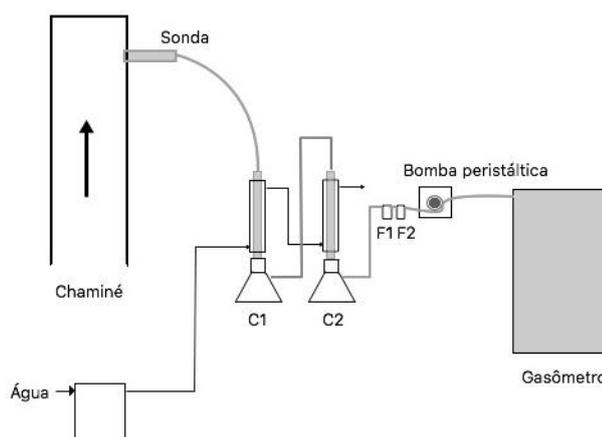
# Determinação de massa por meio de cromatografia gasosa.

AC4 Amostra composta a cada 4 h.

Fonte: Dados da empresa ONDATEC e citados pelo autor Leal (2015)

Para manter as análises de forma padrão, as coletas das amostras foram realizadas posterior estabilidade do processo, ou seja, a partir da 3ª hora após o início de operação do sistema de carbonização, e mantido desse modo o procedimento padrão de operação do sistema de carbonização durante a coleta dos gases. Feito isso diminui-se consideravelmente possíveis chances de erros nas amostragens.

Para a amostragem dos gases, uma sonda, juntamente com os demais equipamentos que podem ser visualizados na Figura 28, foram instalados na chaminé. Neste sistema, parte da fumaça gerada na carbonização é coletada, onde a fração condensável (Ácido Pirolenhoso) presente na fumaça é coletado nos Erlenmeyers C1 e C2 e a fração não condensável é armazenada no gasômetro. Os gases residuais gerados no processo de carbonização foram periodicamente coletados, de maneira que o GNC foi analisado no local, por meio de cromatografia gasosa acoplado com detectores de condutividade térmica (DCT). Assim, pôde-se determinar no local, a quantidade de cada componente e a composição da fração não-condensável, enquanto a parcela condensável (Ácido Pirolenhoso) foi colhida e armazenada para posterior análise da sua composição química, através de cromatografia gasosa acoplada a espectrômetro de massa. O alcatrão foi coletado através de registros instalados no fundo da cavidade de carbonização para posterior análise do PCI através da bomba calorimétrica.



*Figura 28 - Croqui do sistema de amostragem de GNC  
Fonte: do autor, 2019*

O sistema de coleta de gases da Figura 28, foi programado e calibrado para uma coleta precisa de gases realizando 5 sessões de amostragem, onde cada sessão de amostragem possuía uma duração de 10 minutos por hora e uma taxa de 1,5 L/minuto. O gás coletado a cada período de 4 horas foi armazenado em um gasômetro com 60 litros de capacidade. A coleta e análise dos gases foram realizadas em períodos de 4 horas, em um total amostrado de 5 períodos.

A cada período de 4 horas, uma amostra do gás contido no gasômetro foi coletada através de bolsas de Tedlar (Figura 29). Ainda neste intervalo, foi realizada também a limpeza e a substituição dos filtros do sistema de amostragem e substituição da vidraria.



*Figura 29 - Bolsa de Tedlar®*

*Fonte: ONDATEC - Tecnologia Industrial em Micro-ondas S.A.*

Com base nos resultados da cromatografia foi possível realizar o balanço de massa e estimar o balanço energético dos gases (GC e GNC) gerados na carbonização da madeira nos fornos micro-ondas Tecnologia ONDATEC. Além disso foi possível avaliar a produção de energia elétrica com base nos rendimentos do Ciclo Diesel e do Ciclo Combinado.

Para executar os métodos de amostragem e balanço de massa foi utilizada a norma adaptada UNFCCC AM0041 versão 1 (Mitigation of Methane Emissions in the Wood Carbonization Activity for Charcoal Production). Esta norma é aprovada e registrada para projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) da Convenção do Clima.

### **3.5 - Cálculo do Poder Calorífico**

O poder calorífico pode ser definido como a quantidade de energia liberada pela combustão na forma de calor de uma unidade de massa da madeira (JARA, 1989). O poder calorífico pode ser descrito como poder calorífico inferior (PCI) e poder calorífico superior (PCS). Briane e Doat *apud* Quirino e colaboradores (2005), expõe que, o PCI é a energia disponível por unidade de massa de combustível após inferir as perdas com a evaporação da água, e que o PCS, é quando a combustão acontece a volume constante, e a água formada durante essa combustão é condensada, posteriormente o calor derivado desta condensação é restaurado.

Para encontrar o poder calorífico do gás não condensável proveniente da carbonização da madeira, foram levados em consideração os principais componentes que constituem este gás,

ou seja, o hidrogênio (H<sub>2</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>) e o monóxido de carbono (CO). A Equação (3) demonstra o cálculo efetuado.

$$PCIg = \sum PCIc \times Cc \quad \text{Equação (3)}$$

Onde:

PCIg = Poder calorífico inferior do gás (MJ/Kg);

PCIc = Poder calorífico inferior do componente (MJ/Kg);

Cc = Concentração do componente no gás não condensável (Kg).

O potencial energético do gás, em Watt-hora (Wh), pôde ser determinado através da conversão direta com o poder calorífico inferior, em MJ, onde, 1MJ é igual a 277,77 Wh de acordo com a tabela de Fatores de Conversão da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica).

No capítulo 4 serão apresentados os resultados do uso de gases da produção de carvão para geração de energia elétrica, obtidos neste estudo.

#### 4 - USO DOS GASES DA PRODUÇÃO DE CARVÃO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Após a carbonização de cinco ensaios, pôde-se realizar o balanço de massa médio do processo. A Tabela 3 demonstra a massa média da madeira e do carvão produzido no protótipo de engenharia. Na Tabela 4, pode-se visualizar a massa média de madeira enforada e a produção média de carvão na unidade UPEC-250 ONDATEC®. Esses dados foram gerados na empresa ONDATEC – Tecnologia Industrial em Micro-ondas S.A., e citados pelo autor Leal (2015).

*Tabela 3 - Massa de madeira enforada e carvão produzido no Protótipo de Engenharia ONDATEC®.*

Madeira enforada		Produtos sólidos gerados	
<b>Massa</b> <sub>madeira alimentada</sub>	3043 kg	<b>Massa</b> <sub>carvão úmido</sub>	1072 kg
<b>Massa</b> <sub>madeira seca</sub>	2878 kg	<b>Massa</b> <sub>carvão seco</sub>	1061 kg
<b>Umidade BC</b>	5,42%	<b>Umidade BC</b>	1,00%
		<b>Massa</b> <sub>tiço</sub>	62 kg

Fonte: Dados gerados na Empresa ONDATEC e citados pelo autor Leal (2015).

*Tabela 4 - Massa de madeira enforada e carvão produzido na UPEC-250 ONDATEC®.*

Madeira enforada		Produtos sólidos gerados	
<b>Massa</b> <sub>madeira alimentada</sub>	4172 kg	<b>Massa</b> <sub>carvão úmido</sub>	1778 kg
<b>Massa</b> <sub>madeira seca</sub>	3947 kg	<b>Massa</b> <sub>carvão seco</sub>	1761 kg
<b>Umidade BC</b>	5,40%	<b>Umidade BC</b>	1,00%
		<b>Massa</b> <sub>tiço</sub>	103 kg

Fonte: Dados gerados na Empresa ONDATEC e citados pelo autor Leal (2015).

A seguir são descritos os cálculos de rendimento gravimétrico do carvão vegetal ( $\eta_{cv}$ ) dos dois sistemas de fornos usados, onde foram calculados com base na quantidade de madeira alimentada e a quantidade de carvão vegetal produzida. Foram utilizados nos cálculos os valores de massa de carvão úmida pois o carvão é um material hidrocópico, ou seja, absorve um pouco de condensado durante a fase final do processo. Para o protótipo de engenharia e o forno industrial UPEC-250 temos os dados obtidos na Tabela 5.

*Tabela 5 - Cálculo Rendimento Gravimétrico do Carvão Vegetal do Protótipo de Engenharia e forno UPEC-250 ONDATEC®.*

	Massa de carvão úmida (Kg)	Massa de madeira seca alimentada (Kg)	Rendimento (%)
Protótipo Engenharia	1072	3043	35,23
UPEC-250	1778	4172	42,62

Fonte: do autor (2019)

Pode-se notar um aumento considerável no rendimento gravimétrico do carvão vegetal produzido pela unidade UPEC-250 ONDATEC® e que pode ser facilmente explicado devido a existência do controle de entrada de ar no interior de sua cavidade de carbonização, no qual, no Forno Protótipo de Engenharia ONDATEC® não tem.

#### 4.1 - Cálculo de Energia Térmica e do Poder Calorífico Inferior do Gás não Condensável

Na Tabela 6 , através de análise por cromatografia gasosa, são apresentados os resultados da composição química dos gases não condensáveis (GNC). Os valores apresentados são valores médios com base no Protótipo de Engenharia ONDATEC® e na unidade UPEC-250 ONDATEC® de acordo com a madeira enfiada de cada forno.

Tabela 6 - Massa média dos GNC produzidos nos Fornos Micro-ondas ONDATEC.

Composto Químico	Massa GNC (Kg)	
	Protótipo de Engenharia ONDATEC®	UPEC-250 ONDATEC®
<b>O<sub>2</sub></b>	225,00 (9,5%)	37,80 (4,1%)
<b>CO<sub>2</sub></b>	704,00 (29,8%)	117,32 (12,8%)
<b>H<sub>2</sub></b>	1,00 (0,04%)	1,70 (0,18%)
<b>N<sub>2</sub></b>	1085,00 (46,0%)	189,87 (20,7%)
<b>CH<sub>4</sub></b>	60,00 (2,5%)	98,85 (10,8%)
<b>CO</b>	283,00 (12,0%)	470,29 (51,3%)
<b>TOTAL</b>	2358,00 (100%)	915,83 (100%)

Fonte: Dados gerados na empresa ONDATEC e citados pelo autor Leal (2015).

Os principais componentes encontrados nesta análise, e que possuem poder calorífico, foram o hidrogênio (H<sub>2</sub>), o metano (CH<sub>4</sub>) e o monóxido carbono (CO). Com base nestes compostos e de acordo com Ribeiro (2006) foram feitos os cálculos de poder calorífico inferior do GNC. Para Ribeiro (2006), os gases informados possuem o seguinte poder calorífico inferior, veja Tabela 7.

Tabela 7 - Poder calorífico inferior dos Compostos Químicos

Composto Químico	Poder Calorífico Inferior (MJ/Kg)
<b>CH<sub>4</sub></b>	50,00
<b>CO</b>	9,13
<b>H<sub>2</sub></b>	120,00

Fonte: RIBEIRO (2006) adaptado

De acordo com a massa média informada dos componentes do GNC na Tabela 6 e de acordo com a Tabela 7 com relação ao poder calorífico dos componentes, pode-se calcular o PCI do GNC de cada sistema. Cálculo da energia total armazenada no GNC do Protótipo de Engenharia ONDATEC® de acordo com seus componentes principais.

Tabela 8 - Energia total armazenada no GNC do Protótipo de Engenharia ONDATEC®.

Composto Químico	Energia armazenada (MJ)
<b>CH<sub>4</sub></b>	3000
<b>CO</b>	2585
<b>H<sub>2</sub></b>	120
<b>TOTAL</b>	5705

Fonte: Dados gerados na empresa ONDATEC e citados pelo autor Leal (2015).

Calculando o PCI do GNC gerado no Protótipo de Engenharia (Equação (4)) e levando em consideração a massa total deste gás, temos:

$$PCI_{GNC} = \frac{5705}{2358} = 2,42 \text{ MJ / Kg} \quad \text{Equação (4)}$$

Onde:

$PCI_{GNC}$  = Poder Calorífico Inferior do Gás não Condensável

Cálculo da energia total armazenada no GNC da unidade UPEC-250 de acordo com seus componentes principais (Tabela 9).

Tabela 10 - Energia total armazenada no GNC da UPEC-250 ONDATEC®

Composto Químico	Energia armazenada (MJ)
<b>CH<sub>4</sub></b>	4942,5
<b>CO</b>	4294,0
<b>H<sub>2</sub></b>	204,0
<b>TOTAL</b>	9440,5

Fonte: Dados gerados na empresa ONDATEC e citados pelo autor Leal (2015).

Calculando o PCI do GNC da unidade UPEC-250, de acordo com a Equação (4), e levando em consideração a massa total deste gás, temos:

$$PCI_{GNC} = \frac{9440,5}{915,83} = 10,3 \text{ MJ / Kg}$$

Um valor muito baixo do PCI do Protótipo de Engenharia foi encontrado se comparado com o PCI da unidade UPEC-250. Este fato pode ser explicado pela maior quantidade de compostos como O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, dado principalmente pela maior entrada de ar e a não retirada dos vapores de água do protótipo, se comparado com a UPEC-250 ONDATEC®. A entrada de ar no processo causa a oxidação do carbono (combustão), que gera, dentre outros, o CO<sub>2</sub>.

Com os dados calculados acima e pela equivalência entre MJ e Wh informada na literatura, o potencial energético do gás não condensável (GNC) do protótipo de engenharia e da UPEC-250 podem ser encontrados na Tabela 11 :

Tabela 11 - Cálculo do Potencial Energético térmico do GNC

	1MJ/Kg = 0,277 KWh/Kg	
Protótipo Engenharia	Poder Calorífico Inferior GNC (MJ/kg)	Potencial Energético térmico (KWh/Kg)
	2,42	0,67
UPEC-250	10,3	2,86

Fonte: do autor

Com base nos cálculos anteriores, uma disponibilidade energética de 0,67 KWh está presente nos gases não condensáveis provenientes da carbonização da madeira do Protótipo de Engenharia e uma disponibilidade energética de 2,86 KWh está presente nos gases não condensáveis da unidade UPEC-250.

Finalizando os cálculos do poder calorífico inferior e o potencial energético, ambos, dos gases não condensáveis, podemos analisar e calcular estes mesmos dados para os gases condensáveis provenientes também da carbonização da madeira pela tecnologia de micro-ondas.

#### 4.2 - Cálculo de Energia Térmica e do Poder Calorífico Inferior do Gás Condensado

A Tabela 12, apresenta os principais componentes analisados nos gases condensáveis, tanto no Protótipo de Engenharia ONDATEC®, quanto na unidade UPEC-250 ONDATEC®. Estes dados foram obtidos a partir da cromatografia gasosa acoplada ao espectrômetro de massa, sendo as análises realizadas no laboratório da ESALQ (Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz) em Piracicaba/SP.

Vale ressaltar que os valores calculados são com base no poder calorífico inferior do gás condensado, pois o bio-óleo possui água em sua composição, sendo esse fluido intrinsecamente presente no GC.

Tabela 12 - Massa dos principais componentes dos gases condensáveis do Protótipo de Engenharia ONDATEC® e da unidade UPEC-250 ONDATEC®.

Item	Componente	Massa dos GC- Protótipo de engenharia (kg)	Massa dos GC- UPEC-250 kg
1	Metanol	30,7	50,97
2	Acetona	3,8	6,32
3	Acetato de metila	18,1	30,06
4	2,3-Butanenodiona	7,5	12,46
5	2-Butanona	2,1	3,50
6	Ácido acético	106,7	177,13
7	Acetol	17,6	29,23
8	Butanenodiol	3,3	5,49
9	Furaldeído	37,2	61,76
10	2-Furanmetanol	8,5	14,12
11	2-Propanona, 1-hidróxi-acetato	3,5	5,82
12	Dimetoxitetrahydrofurano	4,8	7,98
13	2-Metil, 2-ciclopentenona	4,4	7,31
14	Etanona, 1-(2-furanyl)-	1,8	3,01
15	1-2-Ciclopentanediona	5,9	9,80
16	2-Furancarboxialdeído, 5-metil	14,4	23,91
17	Corilon	13,9	23,07
18	p-Cresol	9,8	16,29
19	2-Metoxi fenol	20,5	34,09
20	4-Metoxi-3-metilfenol	1,7	2,83
21	P-Cresol. 2-metoxi	24,7	41,00
22	3-Metoxi-1,2-benzenediol	21,7	36,02
23	4-Etil 2-metoxi fenol	6,9	11,48
24	4-Metil-1,2-benzenediol	2,5	4,16
25	2,6-Dimetoxifenol	37,3	61,93
26	1,2,4-Trimetoxibenzeno	25	41,51
27	1,2,3-Trimetoxi-5-metil-benzeno	29,5	48,97
28	Alcatrão	139,5	238,57
29	Água	337,5	227,34
30	Outros	83,2	139,16
	<b>Massa total (kg)</b>	<b>1024</b>	<b>1375,29</b>

Fonte: Dados gerados na empresa ONDATEC e citados pelo autor Leal (2015).

Para cálculo do poder calorífico inferior do Ácido Pirolenhoso de ambos os sistemas, protótipo de engenharia e UPEC-250 ONDATEC®, foram tomados como base o balanço de massa e energia da carbonização de cada processo. E para cálculo do poder calorífico inferior do alcatrão, também de ambos os sistemas, foi utilizada a bomba calorimétrica mostrada na Figura 27. Estes valores podem ser visualizados na Tabela 13.

Tabela 13 - Composição do gás condensável (Ácido Pirolenhoso + Alcatrão)

Gases	Massa Protótipo de engenharia (kg)	Massa UPEC-250 (kg)	Energia Protótipo de engenharia (MJ)	Energia UPEC-250 (MJ)
Alcatrão	139,5	238,57	3126	5185
Ác. Pirolenhoso	463,8	770,22	13017	21615
Água	337,5	227,34	N/A	N/A
N/D*	83,2	139,16	N/A	N/A
Total	1024,0	1375,29	16143	26800
PCI Relato MJ/kg			15,76	19,49

Fonte: Dados gerados na empresa ONDATEC e citados pelo autor Leal (2015).

N/D = Substâncias não detectadas

N/A = Não analisado

Como pode ser visualizado na Tabela 13, a massa de Alcatrão e Ácido Pirolenhoso foram maiores no forno UPEC-250 se comparado ao Protótipo de Engenharia ONDATEC®. Isso se deu ao fato da maior quantidade de material enforado na UPEC-250 ONDATEC®. Pode-se notar também que no forno UPEC-250, tanto o Alcatrão quanto o Ácido Pirolenhoso possuem um potencial energético maior com relação ao Protótipo, o que pode estar associado a menor entrada de oxigênio na cavidade de carbonização do forno UPEC-250.

Com base no balanço de massa e energia citados na Tabela 13 e pela equivalência entre MJ e Wh informada pela literatura, o potencial energético do gás condensável (GC) do protótipo de engenharia e da UPEC-250 ONDATEC® podem ser encontrados. Veja Tabela 14:

Tabela 14 - Cálculo do Potencial Energético do GC

Protótipo Engenharia	1MJ/Kg = 0,277 KWh/Kg	
	Poder Calorífico Inferior GNC (MJ/kg)	Potencial Energético térmico (KWh/Kg)
	15,76	4,38
UPEC-250	19,49	5,41

Fonte: do autor (2019).

Pelos cálculos apresentados acima, os gases condensáveis do protótipo de engenharia apresentam um potencial energético de 4,38 MWh e os gases da unidade industrial UPEC-250 apresentam um potencial energético de 5,41 MWh, por tonelada de carvão produzido. Esta diferença foi graças ao maior potencial energético do GC no forno UPEC-250.

A seguir são mostrados os resultados de 2 sistemas de geração de energia, de acordo com o potencial energético encontrados anteriormente, dos gases provenientes da carbonização da madeira na unidade UPEC-250 ONDATEC®. O primeiro sistema analisado, uso de motogeradores, foi implementado e testado na prática, porém, o outro sistema, ciclo Brayton/Rankine, não foi implementado pois demanda um investimento financeiro maior e, até o final deste estudo não foi possível sua montagem. São eles descritos a seguir.

### **4.3 - Uso de geradores estacionários para o Gás Condensado e para o Gás não Condensado**

#### ***Testes práticos realizados***

No primeiro sistema de geração de energia elétrica através dos efluentes da carbonização da madeira por micro-ondas da planta industrial UPEC-250 ONDATEC®, foram utilizados dois motogeradores estacionários a diesel de 500KVA cada. Um deles foi alterado para biogás afim de ser alimentado com o gás GNC. O outro motogerador não sofreu alterações e foi alimentado com o GC emulsificado com etanol.

#### **4.3.1 - Motogerador a GNC:**

O motogerador a gás GNC funcionou sem detecção de problemas e apresentou rendimento de 26%. O Quadro 1 ilustra os rendimentos calculados para variação da vazão de ar e foram calculados a partir do resultado da análise do GNC da UPEC-250 ONDATEC® e comprovado no motogerador de 500kVA com o rendimento supracitado.

Quadro 1- Análise exergética do Motor Scania 500kVA operando com GNC do Forno UPEC-250 ONDATEC®

Parâmetros	Razão de equivalência				
	0.8	0.85	0.90	0.95	1.0
Potência do motor [kW]	445,00	445,00	445,00	445,00	445,00
Vazão de Gás de pirólise [kg/s]	0,1001	0,1001	0,1001	0,1001	0,1001
Exergia específica do gás de pirólise[kJ/kg]	10897,54	10897,54	10897,54	10897,54	10897,54
Vazão de ar [kg/s]	0,3750	0,3529	0,3333	0,3158	0,3000
Exergia específica do ar[kJ/kg]	1698,92	1698,92	1698,92	1698,92	1698,92
Vazão dos gases de exaustão[kg/s]	0,4751	0,4530	0,4334	0,4159	0,4001
Exergia específica dos gases de exaustão [kJ/kg]	291,29	302,45	321,64	353,64	405,20
Eficiência exergética	25,76%	26,33%	26,86%	27,35%	27,81%

Fonte: ONDATEC – Tecnologia Industrial em Micro-ondas S.A. (2016)

Embora o rendimento teórico do grupo gerador fosse de 35%, as análises e os testes mostraram que não é possível obter com o GNC valores superiores a 28%. Como o custo do processo de liquefação do gás é elevado, ele deverá ser consumido na própria planta industrial e é possível de se fazer isso de duas formas básicas:

- Usá-lo em queimadores para secar a madeira, contribuindo para melhorar a qualidade do bio-óleo através da redução da umidade final. A vantagem desta forma está no fato de não haver investimento em motogeradores, mas em um sistema simples de secagem.
- Uso do grupo gerador a gás para garantir uma autosuficiência de energia elétrica para a planta industrial de até 60%, considerando as seguintes premissas da Tabela 15.

Os dados da Tabela 15, a seguir, foram determinados com base no rendimento gravimétrico médio, produção de carvão, GC e GNC, encontrado nos testes dos fornos ONDATEC®. O rendimento considerado do motogerador foi o menor valor encontrado nos testes, ou seja, 26%, pois os parâmetros da madeira podem alterar em função do seu tipo, região de plantio, tempo de corte, etc.

Tabela 15 - Dados de geração do GNC

Rendimento gravimétrico do carvão (%)	Rendimento Motogerador (%)	Produção Carvão (ton/h)	Produção Bio-óleo GC (ton/h)	Produção GNC (ton/h)	Consumo Energia UPEC-250 (MWh)	Geração de Energia GNC (MWh)
33	26	0,33	0,4	0,27	0,33	0,2

Fonte: ONDATEC – Tecnologia Industrial em Micro-ondas S.A.

De acordo com a tabela acima, a produção de GNC é de 270 kg/h com PCI de 10,3 MJ/kg, o que equivale a 2781 MJ/h de GNC. Como já mencionado anteriormente, 1 MJ equivale a 277,7 Wh, então, 2781 MJ/h é igual a aproximadamente 0,772 MW/h. Considerando o rendimento do motogerador em 26%, tem-se a geração de energia elétrica com o motogerador de 0,2 MW/h por hora de madeira processada.

#### 4.3.2 - Motogerador a GC:

Embora o gás condensado tenha bom potencial energético se comparado ao gás não condensado (GC = 5,41 KWh/kg e GNC = 2,86 KWh/kg), como já explanado anteriormente, e as medições em laboratório comprovaram, o bio-óleo (GC) apresenta elevada viscosidade (174,8 cSt) e, devido a presença de ácidos, baixo pH (2,2). O fato é que durante os testes pôde-se notar dois problemas que inviabilizam o uso do bio-óleo diretamente em motores a diesel:

- A corrosão acelerada dos bicos injetores devido à acidez do óleo;
- A elevada viscosidade do bio-óleo que dificulta o bombeamento e a mistura com o ar, contribuindo para uma queima incompleta e acúmulo de material carbonoso no motor.

O motor foi aberto duas vezes para inspeção e verificou-se que os bicos injetores estavam corroídos e havia a formação de uma massa carbonosa dentro do motor. O primeiro problema pode ser contornado com a troca do bico injetor por um conjunto feito em aço inoxidável (MOHAN, *et al.*, 2006).

O valor de viscosidade para bio-óleos é variável e apresentam valores de 25cSt a 1000 cSt, medidos a 40°C. A viscosidade do óleo está relacionada com diferentes fatores que são características da própria matéria-prima e do processo de fabricação utilizado, além do conteúdo de água presente no óleo e da quantidade de produtos leves formados. Somado a estes fatores, sabe-se que o envelhecimento do bio-óleo está intimamente relacionado ao aumento de viscosidade (MOHAN, *et al.*, 2006).

Quanto ao acúmulo carbonoso encontrado no motor, a quantidade de grupos carbonila, carboxila e hidroxila na parte pesada do bio-óleo (fração insolúvel na água e mono e oligossacarídeos) está intimamente relacionada à tendência destes óleos em formar estes resíduos (WESTERHOF, *et al.*, 2011).

Para sanar a elevada viscosidade do bio-óleo, foi necessário reduzir a viscosidade cinemática de 174,8 cSt para 2 cSt, a mesma do diesel. A solução encontrada foi através da emulsificação com etanol. Considerando-se a simplicidade e os efeitos benéficos nas propriedades do bio-óleo, a adição de álcool tem sido sugerida por ser a mais prática para o aumento das qualidades do líquido (OASMAA; CZERNIK, 1999). As soluções para as características indesejáveis do bio-óleo, como a alta viscosidade, é a adição de co-solventes, como o etanol (MOHAN, *et al.*, 2006). Várias relações Etanol/bio-óleo foram testadas. E a melhor encontrada para esse fim foi de 40% Etanol / 60% bio-óleo. Essa relação foi encontrada por tentativa e erro e, embora permita o uso do bio-óleo em motores a diesel, tornou-se inviável economicamente o uso deste líquido nesses motores por causa do custo do etanol e das alterações que são necessárias no motor.

Entre os testes e no final do processo foi necessária a limpeza do motor utilizado com o GC. Essa limpeza foi feita inicialmente com diesel, mas também foi possível observar que o bio-óleo não é solúvel com este combustível, e o processo não foi eficiente para retirar as borras de “piche” encontradas no motor. Elas só foram removidas com uso do etanol.

Com os problemas apresentados, ficou claro que não é viável a utilização do motor diesel com o bio-óleo. Em busca da melhor solução para o aproveitamento energético dos efluentes, foram consideradas outras tecnologias como o uso de turbinas a gás e turbinas a vapor, também chamado de Ciclo Combinado ou Ciclo Brayton/Rankine.

#### **4.4 - Uso do Ciclo Combinado (Brayton + Rankine)**

Abaixo é descrito os outros dois cenários hipotéticos ilustrando as possibilidades do uso deste ciclo.

Para os cenários que serão apresentados a seguir, foram consideradas o uso de quatro fornos industriais UPEC-250, ou seja, 4.000 kg de madeira enfiada por hora, a fim de se gerar uma maior quantidade de efluentes. Para este número de plantas industriais foram levados em consideração o custo, CAPEX (Capital Expenditure ou Investimento em Bens de Capital),

de aquisição da turbina a gás e o custo da turbina a vapor. Para se ter uma ideia, e de acordo com seus fabricantes, o custo de aquisição destas turbinas é menor quando ela possui uma maior capacidade de produção elétrica. Para uma turbina com capacidade de geração elétrica de 1 MWh seu custo é em torno de 1,5 milhões de dólares e uma turbina com capacidade de geração de 2 MWh elétrico, seu investimento é da ordem de 2 milhões de dólares, ou seja, para turbinas acima de 2 MWh elétrico o custo por MW é de 1 milhão de dólares enquanto que nas turbinas abaixo desta potência, o custo é de 1,5 milhão de dólares. Tanto as turbinas a gás, quanto as turbinas a vapor possuem essa base de custo. Pensando nisso, foi proposto um estudo com 4 fornos industriais UPEC-250.

#### 4.4.1 – Uso do GC e GNC para Geração de Energia Elétrica

Neste primeiro cenário o carvão gerado na carbonização é vendido para a indústria do ferro gusa e os efluentes gasosos são aproveitados na geração de energia no ciclo combinado. Os cálculos deste sistema podem ser visualizados a seguir, assim como a ilustração deste processo na Figura 30.

Considerando as unidades de produção de carvão UPEC-250 ONDATEC® e considerando o rendimento médio deste sistema de 33% de carvão, 40% de gás condensado e 27% de gás não condensado por tonelada de madeira enforada, e conhecendo o potencial energético do gás condensado (GC) e do gás não condensado (GNC), podemos prever qual seria a geração de energia elétrica com os efluentes da carbonização deste sistema.

Na literatura é descrito o potencial energético da madeira anidra, ou seja, 5,23 MWh térmico por tonelada. Na Tabela 16 é descrito os potenciais energéticos térmicos da madeira e do gás GC e GNC de acordo com a produção na unidade UPEC-250 ONDATEC®.

Tabela 16 - Potencial Energético térmico da Madeira, GNC e GC.

Potencial Energético	MWh térmico/ton
Madeira Anidra	5,23
GNC	2,86
GC	5,41

Fonte: do autor (2019)

A Tabela 17 detalha o consumo de madeira, produção de carvão e produção de efluentes nas 4 UPECs-250, além do consumo elétrico do sistema.

Tabela 17 - Dados do sistema proposto

Descrição	Dados	
Quantidade de UPECs-250	4	
Consumo elétrico de cada UPEC-250	0,333 MWh por ton. de madeira	
Consumo elétrico das 4 UPECs-250	1,33 MWh por ton. de madeira	
Quantidade de madeira alimentada por UPEC-250	1 Ton/h	
Quantidade total de madeira a ser alimentada	4 Ton/h	
Quantidade de carvão a ser produzido	33%	1,32 Ton/h
Quantidade de GC a ser produzido	40%	1,6 Ton/h
Quantidade de GNC a ser produzido	27%	1,08 Ton/h

Fonte: do autor (2019)

Com os dados da Tabela 16 e Tabela 17, pode-se prever qual será a geração de energia elétrica com os efluentes da carbonização. A Equação (5) é utilizada para calcular a produção de gás total (GC, GNC ou Carvão Vegetal) de acordo com o total de madeira enfiada pelo rendimento do produto (GC, GNC ou Carvão Vegetal), já a Equação (6) é utilizada para o cálculo do potencial energético total do GC, GNC ou Carvão Vegetal.

$$\text{Produção}_{xxx} = \text{Madeira enfiada} * \text{Rendimento (GC, GNC ou Carvão Vegetal)}$$

Equação (5)

Onde:

$\text{Produção}_{xxx}$  é a produção total do gás em questão (GC ou GNC) ou do carvão vegetal

O cálculo do potencial energético do GC, do gás GNC ou do Carvão Vegetal pode ser realizado de acordo com a Equação (6):

$$P_{xxx} = \text{Produção}_{xxx} * \text{Potencial Energético Térmico}$$

Equação (6)

Onde:

$P_{xxx}$  é o potencial energético do gás em questão (GC ou GNC) ou do Carvão Vegetal

Com isso a produção e o potencial energético do GC será de:

$$\text{Produção}_{GC} = 4 \text{ Ton/h} * 0,4 = 1,6 \text{ ton/h}$$

$$P_{GC} = 1,6 * 5,41 = 8,66 \text{ MWh térmico}$$

Para o gás não condensado, a produção e o potencial energético será de:

$$\text{Produção}_{OGNC} = 4 \text{ Ton/h} * 0,27 = 1,08 \text{ Ton/h}$$

$$P_{GNC} = 1,08 * 2,86 = 3,08 \text{ MWh térmico}$$

De acordo com o rendimento informado pelo fabricante da turbina, 26%, pode-se calcular o potencial de geração elétrica da mesma. Relembrando que a turbina a gás da fabricante OPRA pode ser alimentada com os dois efluentes ao mesmo tempo. Veja Tabela 18.

Tabela 18 - Geração elétrica com a turbina a gás fabricante OPRA

Descrição	Dados
Rendimento da Turbina com GC + GNC (%)	26
Potencial energético GC + GNC (MWh térmico)	11,74
Geração elétrica (MWh elétrico)	3,05

Fonte: do autor (2019)

Conforme a Tabela 18, a geração de energia elétrica com a turbina a gás OPRA, com rendimento de 26%, será de 3,05 MWh elétrico.

Como o ciclo proposto é o ciclo Combinado, uso da turbina a gás cascadeando com a turbina a vapor, a energia térmica contida nos gases de exaustão da turbina a gás, ou seja, os 8,68 MWh térmico (11,74 MWh – 3,05 MWh), são injetados em uma caldeira de recuperação acoplada a uma turbina a vapor com gerador elétrico. Com base nos dados práticos deste sistema, o rendimento deste turbogerador (caldeira de recuperação e turbina a vapor) é da ordem de 30%. Com isso, pode-se gerar mais 2,6 MWh de energia elétrica neste processo com os 8,68 MWh térmico provenientes da saída da turbina a gás OPRA.

De acordo com os fabricantes de turbo geradores, pode-se calcular o potencial elétrico do ciclo Rankine. Veja Tabela 19.

Tabela 19 - Geração elétrica com o turbo gerador no cenário 1

Descrição	Dados
Rendimento do turbogerador (%)	30,00
Potencial energético (MWh térmico)	8,68
Geração elétrica (MWh elétrico)	2,60

Fonte: do autor (2019)

Somando-se as gerações elétricas, este ciclo combinado irá gerar por 4 toneladas de madeira enfiada (Tabela 20).

Tabela 20 - Geração Elétrica Ciclo Combinado - Cenário 1

Descrição	MWh elétrico
Geração elétrica na turbina a gás	3,05
Geração elétrica na turbina a vapor	2,60
Geração elétrica total do sistema	5,65

Fonte: do autor (2019)

Pela Tabela 20 a energia total gerada pelo ciclo combinado proposto será de 5,65 MWh elétrico, somando-se a energia elétrica gerada pela turbina a gás OPRA e a energia elétrica gerada pela turbina a vapor.

A energia térmica na saída do turbogerador ainda contém potencial energético e poderá ser utilizado para secagem da madeira antes de sua alimentação no forno industrial de micro-ondas, o que aumenta a eficiência do forno de carbonização. Com base nestes dados podemos calcular o rendimento bruto deste sistema através da Equação (7).

$$\eta = \frac{\text{Energia elétrica gerada}}{\text{Energia térmica total}} \quad \text{Equação (7)}$$

$$\eta = \frac{5,65 \text{ MWh elétrico}}{11,74 \text{ MWh térmico}}$$

$$\eta = 48 \%$$

O rendimento encontrado de 48%, se aproxima com o que a literatura e as empresas SIEMENS® e General Electric® (GE) mencionam em suas plantas industriais utilizando o ciclo combinado e que foi descrito neste trabalho em 2.4 (“Ciclo Combinado (Brayton + Rankine)”).

Vale ressaltar ainda, que há o carvão vegetal produzido, no qual será vendido e seu retorno poderá arcar com as despesas de energia elétrica ou manutenção para o funcionamento dos fornos. Na Figura 30, pode-se ter uma ideia do ciclo combinado proposto.

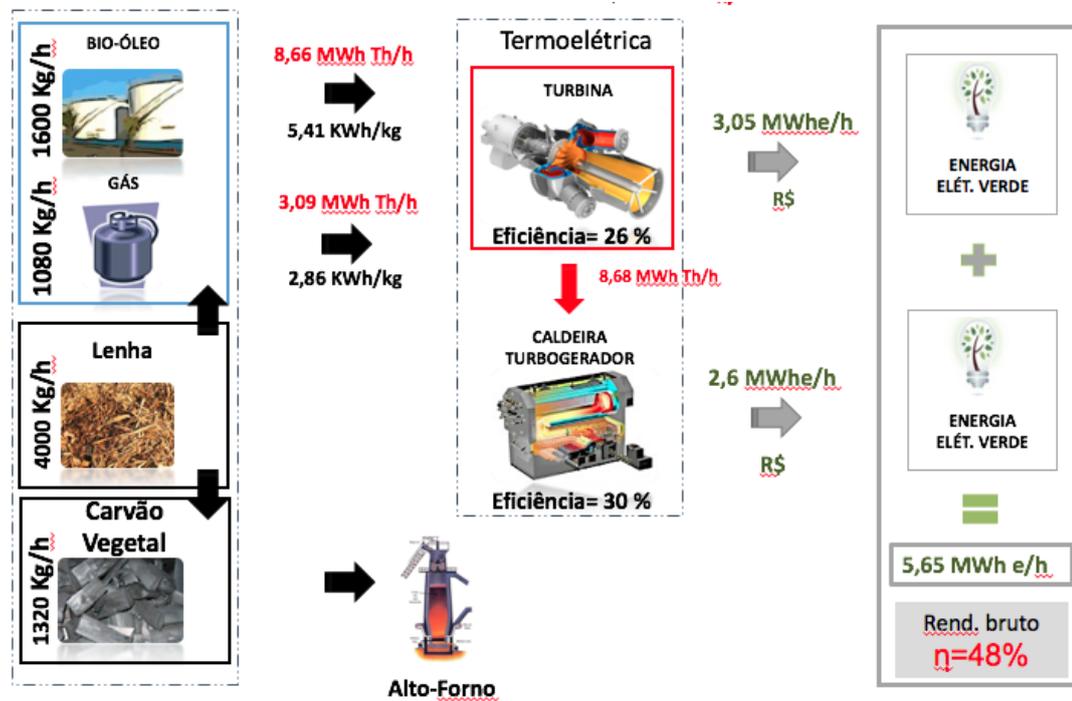


Figura 30 - Ciclo combinado do cenário 1 com GNC e bio-óleo  
Fonte: Adaptada ONDATEC – Tecnologia Industrial em Micro-ondas S.A.

De acordo com a Equação (8) demonstrada por (FELDER; ROUSSEAU, 2005) em seu livro Princípios Elementares dos Processos Químicos, pode-se facilmente confirmar o balanço de energia na turbina para este cenário.

- **Aplicando balanço de energia na turbina a gás OPRA:**

$$Q - W = m * [DH + Ec + Ep] \quad \text{Equação (8)}$$

Onde:

Q = Calor (J)

W = Trabalho (J)

m = Massa do vapor (Kg)

$\Delta H$  = Variação da entalpia (J)

Ec = Energia cinética (J)

Ep = Energia potencial (J)

Obs.1: Considerando o processo na turbina como adiabático, ou seja, não ocorre troca de calor da turbina para a vizinhança, a equação pode ser simplificada desprezando o termo correspondente ao calor (Q). Sendo assim:

$$Q = 0 \quad \text{Equação (9)}$$

Onde:

$$Q = \text{Calor (J)}$$

Obs.2: Na turbina também são desprezadas a energia cinética e a potencial, pois estes valores são muito inferiores aos valores entálpicos. Logo, a equação pode ser ainda mais simplificada:

$$-W = m * [DH] \quad \text{Equação (10)}$$

Onde:

$$W = \text{Trabalho (J)}$$

$$m = \text{Massa (Kg)}$$

$$\Delta H = \text{Variação da entalpia (J)}$$

Obs.3: A entalpia (H) inicial pode ser determinada pelo valor da energia térmica dos gases de entrada e a entalpia de saída poderá ser determinada com base na energia elétrica gerada na turbina, Equação (11) e Equação (12) respectivamente:

$$H_{\text{entrada}} = \Sigma (\text{Energia Térmica dos produtos de entrada}) \quad \text{Equação (11)}$$

Assim:

$$H_{\text{entrada}} = \text{Energia Térmica do GC} + \text{Energia Térmica do GNC}$$

$$H_{\text{entrada}} = 8,66 \text{ MWh Th / h} + 3,08 \text{ MWh Th / h}$$

$$H_{\text{entrada}} = 11,74 \text{ MWh th / h}$$

Pela Equação (11), determina-se a entalpia de saída da turbina a gás da fabricante OPRA.

$$H_{\text{saída}} = \text{Energia Térmica de entrada} - \text{Energia elétrica gerada} \quad \text{Equação (12)}$$

Com isso:

$$H_{saída} = 11,74 \text{ MWh Th / h} - 3,05 \text{ MWh elétrico / h}$$

$$H_{saída} = 8,68 \text{ MWh Th / h}$$

Confirmando:

$$-W = 2680 * \left( \frac{8,68}{2680} - \frac{11,74}{2680} \right)$$

$$W = 3,05 \text{ MWh elétrico}$$

Onde:

2680 = massa total de GC e GNC na entrada da turbina a gás (kg).

#### 4.4.2 – Uso do GC, GNC e Carvão Vegetal para Geração de Energia Elétrica

Neste segundo cenário o carvão vegetal gerado na carbonização pelo forno UPEC-250 é alimentado na caldeira de recuperação juntamente com o gás de saída da turbina a gás. Neste sistema pode-se afirmar que o rendimento do turbogerador é da ordem de 35%, sendo maior que no cenário do subitem 4.4.1 (“*Uso do GC e GNC para Geração de Energia Elétrica*”), pois o carvão é alimentado a uma temperatura em torno de 300°C (temperatura média de saída do carvão da UPEC-250), não havendo necessidade de aquecimento do mesmo, ou seja, o carvão produzido na UPEC-250 sai de sua cavidade e entra direto na câmara de combustão da caldeira de recuperação e a caldeira não perde energia térmica para reaquecer o carvão de alimentação, caso o mesmo fosse alimentado após resfriamento. Os cálculos deste sistema podem ser visualizados abaixo, assim como a ilustração deste processo na Figura 31.

Considerando os mesmos rendimentos e potencial energético do gás condensado e do gás não condensado do sistema anterior e calculando o potencial energético do carvão, temos: potencial energético térmico do GC e GNC calculados no cenário do subitem 4.4.1 (“*Uso do GC e GNC para Geração de Energia Elétrica*”): 8,87 MWh térmico. Usando a Equação (5) a quantidade de carvão produzido em 4 toneladas de madeira enforada, considerando o rendimento gravimétrico do forno de 33%, é de 1,32 ton/h, como segue:

$$4 \text{ t/h} * 0,33 = 1,32 \text{ t/h}$$

O potencial energético do carvão, levando-se em consideração o PCI de 8,14 KWh/kg, será de (Equação (6)):

$$P_C = 1320 * 8,14 = 10,74 \text{ MWh térmico}$$

Como no cenário do subitem 4.4.1 (“*Uso do GC e GNC para Geração de Energia Elétrica*”), a geração de energia elétrica na turbina a gás, com rendimento de 26%, será de 3,05 MWh elétrico.

A energia térmica na saída da turbina a gás, ou seja, os 8,68 MWh térmico são injetados na caldeira de recuperação acoplada a uma turbina a vapor e gerador elétrico, juntamente com a injeção do carvão obtido na carbonização, que produz 10,74 MWh de energia térmica, será de 19,42 MWh térmico.

O rendimento deste turbogerador com a alimentação do carvão aumenta para 35%, como mencionado anteriormente, e o potencial de geração elétrica pode ser visualizado na Tabela 21.

Tabela 21 - Geração elétrica com o turbo gerador no cenário 2

Descrição	Dados
Rendimento do turbogerador (%)	35
Potencial energético (MWh térmico)	19,42
Geração elétrica (MWh elétrico)	6,8

Fonte: do autor (2019)

De acordo com a Tabela 21, com o uso do GC, GNC e do carvão vegetal alimentando o turbo gerador para produzir vapor d’água para rodar a turbina a vapor, a geração de energia elétrica é de 6,8 MWh elétrico.

Somando-se as gerações elétricas da turbina a gás e do turbo gerador com turbina a vapor, este ciclo combinado irá gerar por 4 toneladas de madeira enfiada (Tabela 22):

Tabela 22 - Geração elétrica total no cenário 2

Descrição	MWh elétrico
Geração elétrica na turbina a gás	3,05
Geração elétrica na turbina a vapor	6,8
Geração elétrica total do sistema	9,85

Fonte: do autor (2019)

Neste cenário, este ciclo combinado é capaz de gerar 9,85 MWh elétrico por tonelada de madeira enfiada.

Assim como no cenário do subitem 4.4.1 (“*Uso do GC e GNC para Geração de Energia Elétrica*”), a energia térmica na saída do turbo gerador ainda contém potencial energético e poderá ser utilizado para secagem da madeira antes de sua alimentação no forno industrial de micro-ondas. Com base nestes dados podemos calcular o rendimento bruto deste sistema de acordo com a Equação (7) mostrada anteriormente:

$$\eta = \frac{9,85 \text{ MWh elétrico}}{22,48 \text{ MWh térmico}}$$

$$\eta = 43,8 \%$$

Também pode-se calcular, através da Equação (13) abaixo, o rendimento líquido do sistema levando em consideração o uso de parte da energia elétrica gerada para suprir a demanda elétrica dos 4 fornos UPEC-250 que é em torno de 0,33 MWh, cada, por tonelada de madeira enfiada, ou seja:

$$\eta = \frac{\text{Energia elétrica gerada} - \text{Energia elétrica gasta}}{\text{Energia térmica total}} \quad \text{Equação (13)}$$

$$\eta = \frac{9,85 - 1,33}{22,48}$$

$$\eta = 38 \%$$

Onde:

$$\eta = \text{Rendimento (\%)}$$

Havendo neste sistema um excedente de 8,52 MWh de energia elétrica, na qual poderá ser vendida ou utilizada em outros processos. A Figura 31 , demonstra o ciclo combinado proposto.

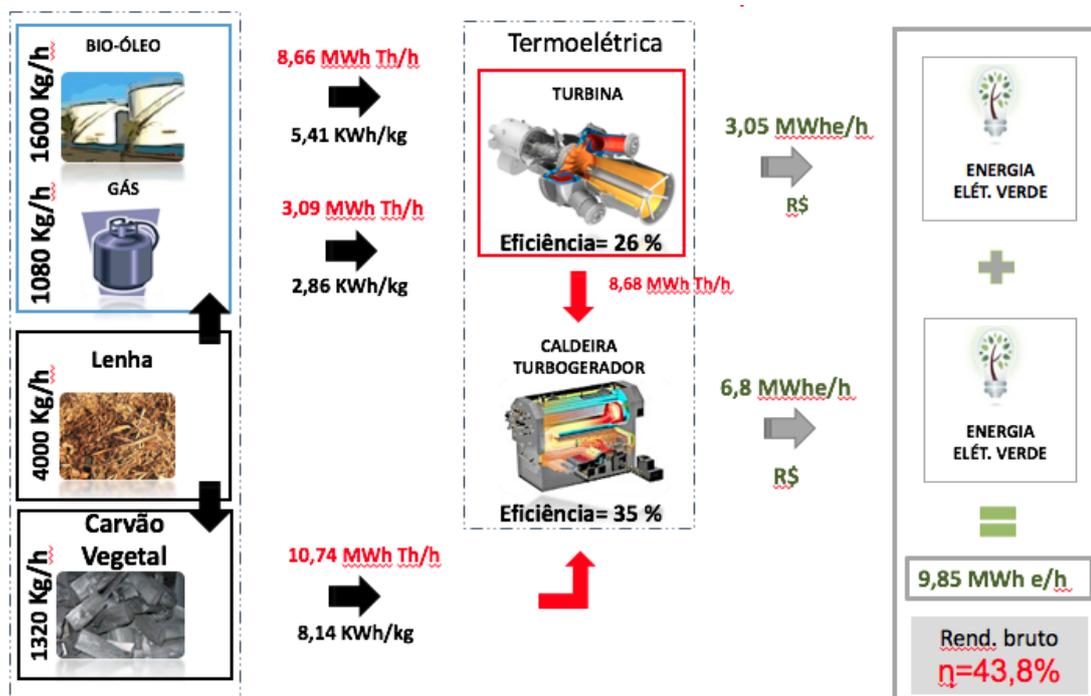


Figura 31 - Ciclo combinado do cenário 2 com carvão, bio-óleo e GNC  
Fonte: ONDATEC – Tecnologia Industrial em Micro-ondas S.A, adaptado.

De acordo com as Equações (8), (9), (10), (11) e (12) demonstrada no subitem 4.4.1 (“Uso do GC e GNC para Geração de Energia Elétrica”), pode-se facilmente confirmar o balanço de energia no turbogerador para este cenário. O balanço de energia da turbina a gás é o mesmo apresentado no subitem 4.4.1 (“Uso do GC e GNC para Geração de Energia Elétrica”).

- **Aplicando balanço de energia no turbogerador (Caldeira de Recuperação + Turbina a Vapor), Equação (8):**

Obs.1: Considerando o processo na turbina como adiabático, ou seja, não ocorre troca de calor da turbina para a vizinhança, a equação pode ser simplificada desprezando o termo correspondente ao calor (Q), Equação (9).

Obs.2: Na turbina também são desprezadas a energia cinética e a potencial, pois estes valores são muito inferiores aos valores entálpicos, Equação (10).

Obs.3: A entalpia (H) inicial pode ser determinada pelo valor da energia térmica dos gases de entrada no turbo gerador e a entalpia de saída poderá ser determinada com base na energia elétrica gerada no turbo gerador, Equação (11) e Equação (12) respectivamente:

$$H_{\text{entrada}} = \text{Energia Térmica dos gases de saída da turbina a gás} + \text{Energia Térmica do Carvão Vegetal}$$

$$H_{\text{entrada}} = 8,68 \text{ MWh térmico / h} + 10,74 \text{ MWh térmico / h}$$

$$H_{\text{entrada}} = 19,42 \text{ MWh th / h}$$

Pela Equação (12), determina-se a entalpia de saída do turbo gerador.

$$H_{\text{saída}} = 19,42 \text{ MWh th / h} - 6,8 \text{ MWh elétrico / h}$$

$$H_{\text{saída}} = 12,62 \text{ MWh térmico / h}$$

Confirmando:

$$- W = 1320 * \left( \frac{12,62}{1320} - \frac{19,42}{1320} \right)$$

$$W = 6,8 \text{ MWh elétrico}$$

Onde:

W = Trabalho (J)

1320 = a massa de carvão na entrada da caldeira de recuperação (kg).

Os dois sistemas propostos acima podem ser intercalados visualizando o maior retorno financeiro. Quando o carvão vegetal estiver com seu valor de venda baixo, pode-se gerar energia elétrica com ele (cenário 2 proposto no Ciclo Combinado), e quando o carvão estiver com seu custo elevado, pode-se vendê-lo para a indústria do ferro gusa (cenário 1 proposto no Ciclo Combinado). Cada empresa pode decidir qual melhor caminho a seguir e o momento de se fazer isso.

## 5 - CONCLUSÃO

Com o uso dos Fornos micro-ondas ONDATEC® na fabricação de carvão, consegue-se aproveitar integralmente os efluentes gasosos e líquidos na geração de energia elétrica, ao contrário das tecnologias arcaicas de fabricação de carvão onde se aproveita em média 25% de toda a matéria prima e os 75% restantes são descartados na atmosfera e solo.

Com o uso de motogeradores na geração de energia elétrica, pode-se notar que, o motogerador convertido para o gás não condensável, apesar do rendimento menor que o esperado, 26% contra os 35% informados pelo fabricante, desempenhou como esperado sua função.

O uso do motogerador a gás condensável, não se mostrou viável economicamente, pois o GC possui uma alta viscosidade (174,8 cSt) e baixo pH (2,2). Para contornar o problema da alta viscosidade do GC, teve-se que emulsificar este líquido com 40% de etanol, elevando-se seu custo. O problema do baixo pH, pode ser contornado com a troca do material dos bicos injetores do motogerador para aço inox ou purificar o GC retirando os ácidos presentes nele

Com relação ao uso do Ciclo Combinado para a geração de energia, este sistema se mostrou bastante interessante, pois utiliza-se uma turbina especialmente desenvolvida para a queima do gás condensável e do gás não condensável simultaneamente. Os gases de exaustão desta turbina alimentam uma caldeira de recuperação para a geração de vapor d'água para posterior geração elétrica em uma turbina a vapor.

Ainda se tratando do Ciclo Combinado, os gases de saída da caldeira de recuperação podem ser usados em um secador de madeira afim de diminuir a umidade da madeira de alimentação do forno, aumentando o rendimento dos produtos gerados na carbonização pelas micro-ondas.

No cenário 1 do Ciclo Combinado pode-se gerar 5,65 MWh elétrico com 4 unidades UPEC-250, obtendo um rendimento em torno de 48%. O consumo elétrico das 4 unidades poderá ser pago com a venda do carvão produzido.

No cenário 2 do Ciclo Combinado pode-se gerar 9,85 MWh elétrico com 4 unidades UPEC-250 ONDATEC®, utilizando o carvão produzido para também gerar energia elétrica.

Sendo o consumo elétrico das 4 unidades de 1,33 MWh o excedente nesta geração, ou seja, 8,53 MWh, poderá ser vendido ou utilizado e outros processos.

Embora o bio-óleo possa ser facilmente ser queimado em caldeiras e com evidentes vantagens em relação a qualquer outro combustível, procurou-se focar num sistema de maior rendimento energético, ou seja, o ciclo combinado.

Com o aproveitamento dos efluentes gerados na carbonização da madeira (GC e GNC), paga-se o custo de energia elétrica que alimenta o forno de micro-ondas no processo de carbonização e ainda sobra energia elétrica, podendo ser vendida.

Em um estudo de viabilidade econômica, o uso do Ciclo Combinado sobressai em relação ao uso dos motogeradores, pois, as turbinas possuem um tempo de inspeção/manutenção a cada 4 anos ou 40.000 horas, de acordo com o fabricante, enquanto nos motogeradores há a necessidade de trocas de óleo lubrificantes e inspeções a cada 15 dias, além de que, o uso de bio-óleo em motogeradores a diesel não se mostrou vantajoso.

Para trabalhos futuros pode-se verificar a possibilidade do uso de outras técnicas, mais econômicas, para a redução da viscosidade do bio-óleo, além da diminuição da acidez deste líquido. Além disso, um estudo para analisar qual o impacto, nos compostos presentes nos efluentes, da diminuição da entrada de oxigênio no forno UPEC-250 ONDATEC® e comparado ao forno Protótipo de Engenharia ONDATEC®, se faz necessário. Pode-se também realizar um estudo para extrair do bio-óleo o componente ácido acético, pois ele é amplamente utilizado na indústria, como na fabricação do vinagre, solvente, empregado em tinturarias, perfumarias, na produção de acetato de vinila (produção do plástico PVA), medicamentos, dentre outros.

## 6. REFERÊNCIAS

A. BORGNAKE Claus e Sonntag Richard E **Fundamentos da Termodinâmica** [Livro] /. / trad. Peixoto Roberto de Aguiar. - Michigan : Edgard Blucher Ltda, 2013. - Vol. 8.

ALMEIDA, M.R. de. Recuperação de alcatrão em fornos de alvenaria. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, CETEC. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982, p. 175-180.

ALVES, M.F. **ABC das máquinas eléctricas**. Departamento de Engenharia Eletrotécnica. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2003.

ANDERSON RIBEIRO, S.; AZARIAS MACHADO DE, A. CARBONIZATION OF MECHANICAL PROCESSING RESIDUES OF EUCALYPT WOOD. **Ciência Florestal**, v. 15, n. 1, p. 1-7, 2010.

ANDRADE, J.B. de e SARNO, P. **Química Ambiental em ação: Nova Abordagem para tópicos de Química Relacionados com o Ambiente**. Instituto de Química, UFBA, Campus de Ondina. Salvador, Bahia, 1990.

ANVARI, S.; JAFARMADAR, S.; KHALILARYA, S. Proposal of a combined heat and power plant hybridized with regeneration organic Rankine cycle: Energy-Exergy evaluation. **Energy Conversion and Management**, v. 122, p. 357-365, 2016.

Atlas de Energia Elétrica do Brasil, Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. ed., Brasília, Aneel, 2008. Disponível em: [http://www.aneel.gov.br/visualizar\\_texto.cfm?idtxt=1689](http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1689). Acesso em 03/07/2018.

ASSIS, Carlos Frederico. **Caracterização de Carvão Vegetal para a sua injeção em Altos-Fornos a Carvão Vegetal de Pequeno Porte**. 2008. 165 folhas. Dissertação (Mestrado em Análise e Seleção de Materiais) – Setor de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, 2008.

BÁRBARA LUÍSA CORRADI, P. *et al.* EFEITO DA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA NA ESTRUTURA ANATÔMICA E DENSIDADE DO CARVÃO VEGETAL DE Eucalyptus. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 545-557, 2016.

BARBOSA, R. L. *et al.* Desempenho comparativo de um motor de ciclo diesel utilizando diesel e misturas de biodiesel. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 5, p. 1588-1593, 2008.

BEALL, Francis C. e EICKNER, Herbert W. **Thermal Degradation of Wood Components: a review of the literature**. Maio, 1970.

BEN. **Balanco Energético Nacional. Ministério de Minas e Energia**. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, EPE, 2015. Disponível em: <[http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018\\_\\_Int.pdf](http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf)>. Acesso em 10/03/2019.

BLEY JUNIOR, C. J. **Economia do Biogás**. Informativo plataforma Itaipu de energias renováveis. Itaipu. Foz do Iguaçu, 2012.

BRASIL. Comitê Interministerial Sobre Mudança do Clima. **Plano Nacional Sobre Mudança do Clima, PNMC**. Brasília, 2008. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/estruturas/169/\\_arquivos/169\\_29092008073244.pdf](http://www.mma.gov.br/estruturas/169/_arquivos/169_29092008073244.pdf)>. Acesso em 16/09/2018.

BRIDGWATER, A. V.; PEACOCKE, G. V. C. Fast pyrolysis processes for biomass. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 4, n. 1, p. 1-73, 2000.

BRITO, J. O. **Carvão vegetal no Brasil: Gestões econômicas e ambientais**. Estudos Avançados. Publicado originalmente em São Paulo Energia, n° 64, maio/junho de 1990. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ea/v4n9/v4n9a11>>. Acesso em 03/07/2018.

BRITO, J.O. **O uso energético da madeira**. Estudos Avançados, v.21, n.59, p. 185-193, 2007. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/ea/v21n59/a14v2159.pdf>>. Acesso em 18/07/2018.

BROWNSORT, Peter A. **Biomass Pyrolysis Processes: Review of Scope, Control and Variability**. 2009. 39 folhas. Newcastle University.

CALVO GONZALEZ, A. E.; VIZQUERRA ROJO, V. Ciclo combinado diesel-vapor como repotenciacion de una central termoelectrica: caso de estudio.(APLICACIONES INDUSTRIALES). **Ingenieria Energetica**, v. 35, n. 2, p. 123, 2014.

CASTRO, P.F. de. Obtenção do alcatrão vegetal em fornos de alvenaria. Centro Tecnológico de Minas Gerais, CETEC **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982, p. 189-196.

CAMPOS, A.D. **Técnicas para produção de Extrato Pirolenhoso para Uso Agrícola**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Circular técnica, v. 65. Pelotas, 2007.

CHANG, R. **Química Geral Conceitos Essencias**. Quarta Edição. Editora Bookman. Porto Alegre, 2006.

COLOMBO, S. F.; PIMENTA, A. S. e HATAKEYAMA, K. **Produção de carvão vegetal em fornos cilíndricos verticais: um modelo sustentável**. In: Simpósio de Engenharia de Produção- SIMPEP, v.13. São Paulo, 2006. Disponível em: <[http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais\\_13/artigos/1208.pdf](http://www.simpep.feb.unesp.br/anais/anais_13/artigos/1208.pdf)>. Acesso em 05/11/2018.

DE LA HOZ, A.; DIAZ-ORTIZ, A.; MORENO, A. **Microwaves in organic synthesis. Thermal and non-thermal microwave effects**. Chemical Society Reviews, v. 34, n. 2, p. 164-178, 2005.

DEMIRBAS, A; ARIN, G. **An overview of biomass pyrolysis**. Energy sources, v. 24, n. 5, p. 471-482, 2002.

DE WILD, P.; REITH H. e HEERES H.J. **Biomass Pyrolysis for chemicals**. Biofuels. v.2, n. 2, p. 185-208, 2011.

ESTEVIÃO, Tânia Esmeralda Rodrigues. **O Hidrogênio como Combustível**. 2008. 113 folhas. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto- Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, 2008.

Disponível em: <<http://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/58102>>. Acesso em 02/04/2018.

FELDER, Richard M., ROUSSEAU, Ronald W., **Princípios Elementares de Processos Químicos**, Editora: LTC, 3ª. Ed. 2005.

FERNANDEZ, Y.; ARENILLAS, A. e MENENDEZ, J.A. **Microwave heating applied to pyrolysis**. S. Grundas (Ed.), Advances in induction and Microwave Heating of Mineral and Organic Materials p. 723-752, 2011.

FERREIRA, O.C. **Emissões de gases de efeito estufa na produção e no uso do carvão vegetal**. Economia e Energia, v.4, n. 20, 2000.

FIGUEIREDO, M. E. O. *et al.* Potential of Pterogyne Nitens Tul. wood ( madeira-nova) for charcoal production/Potencial da madeira de Pterogyne Nitens Tul. ( madeira-nova) para producao de carvao vegetal. **Ciencia Florestal**, v. 28, n. 1, p. 420, 2018.

FILHO, R.C.R. **Monóxido de Carbono**. Química Nova Escola. 1999.

FRANKLIN, E. M., **Ciclo de Potência a Gás**. 2018 . 28 folhas [Online] / A. Franklin Erick de Moraes // Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP. - Disponível em: [http://www.fem.unicamp.br/~franklin/ES672/pdf/mot\\_alternat\\_ciclos.pdf](http://www.fem.unicamp.br/~franklin/ES672/pdf/mot_alternat_ciclos.pdf). Acesso em 24/07/2019.

GOMES, P.A. e OLIVEIRA, J.B. de. Teoria da Carbonização da madeira. Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC) **Uso da madeira para fins energéticos**. Belo Horizonte, 1980, p. 27-38.

GAMA GASES. **Monóxido de Carbono**, 2005. Disponível em: <[http://www.gamagases.com.br/propriedades\\_monoxidodecarbono.htm](http://www.gamagases.com.br/propriedades_monoxidodecarbono.htm)>. Acesso em 28/01/2018.

GONÇALVES, F.G.; SILVA, A.G. da; FERRANO, A.C.; COSTA, N.N.M. da, SOUZA, R.A.B. e TOSATO, A.F. **Captação de líquido pirolenhoso da carbonização da madeira de Eucaliptos Cloeziana em forno rabo quente**. Revista Brasileira de Ciências Agrárias. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2010.

GUIMARÃES, A. L. **Ciclos Diesel e Otto**, 2013. [Online]. Disponível em: <<http://www.alguimaraes.com.br>>. Acesso em 25/01/2019.

HERNÁN DARÍO PATIÑO, D.; BRYAN DARIO ROSERO, C. Análisis exergético de una planta de cogeneración operando bajo ciclo combinado. **Ingeniería Investigación y Desarrollo**, v. 17, n. 1, p. 49-58, 2017.

HERRERA, C. A.; ROSILLO, M. E.; CASTAÑO. Fugas de calor y aprovechamiento de efluentes en la optimización de ciclos Brayton totalmente irreversibles. **Revista mexicana de física**, v. 54, n. 2, p. 118-126, 2008.

HIMMELBLAU, D. M.. Engenharia Química: Princípios e Cálculos. Ed. LTC, Rio de Janeiro, 7ª Ed. 2006.

IBG. **Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos. Hidrogênio.** 2008. Disponível em: <<http://www.ibg.com.br/portal/pdf/Hidrogenio.pdf>>. Acesso em 28/01/2018.  
IBG. **Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos. Nitrogênio.** 2008. Disponível em: <<http://www.ibg.com.br/portal/pdf/Nitrogenio.pdf>>. Acesso em 28/01/2018.

JARA, E.R.P. **O poder calorífico de algumas madeiras que ocorrem no Brasil.** 1989. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT. (Comunicação Técnica, 1797)

JUNIOR, JOSÉ NUNES DA SILVA. **Termodinâmica.** 2011. 67 folhas. Disponível em: <[https://pt.slideshare.net/nunes\\_ufc/termodinamica-8900520](https://pt.slideshare.net/nunes_ufc/termodinamica-8900520)>. Acesso em 13/11/2018.

JUVILLAR, J.B. Tecnologias de transformação da madeira em carvão. Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC). **Uso da madeira para fins energéticos.** Belo Horizonte, 1980, p. 67-82.

KAPPE, C.O. **Microwave dielectric heating in synthetic organic chemistry.** Chemical Society Reviews, v. 37, n. 6, p. 1127–1139, 2008.

KLOCK, U. *et al.* **Química da Madeira.** 3ª Edição revisada. Universidade Federal do Paraná. Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal. Curitiba, 2005.

LANÇAS, Fernando M.; MCNAIR, Harold M. **Cromatografia em fase gasosa. 1. Teoria Elementar.** Química Nova, v. 6, n. 1, p. 6-13, 1983.

LEAL, Thales Eduardo. **Produção de energia elétrica através de gases provenientes da carbonização da madeira com micro-ondas.** 2015 110 folhas. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Rede Temática em Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Ouro Preto, 2015.

LINARDI, M. **Hidrogênio e Células a Combustível.** Associação Brasileira do Veículo Elétrico (ABVE). 2008. Disponível em: <<http://www.abve.org.br/destaques/2008/destaque08051.asp>>. Acesso em 25/10/2018.

LINDE GAS. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico. Dióxido de Carbono,** 2002. Disponível em: <[http://www.lindegas.com.br/international/web/lg/br/like1gbr.nsf/repositorybyalias/pdf\\_msds\\_c/\\$file/Carbon%20Dioxide.pdf](http://www.lindegas.com.br/international/web/lg/br/like1gbr.nsf/repositorybyalias/pdf_msds_c/$file/Carbon%20Dioxide.pdf)>. Acesso em 28/01/2019.

LINDE GAS. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico. Nitrogênio,** 2002. Disponível em: <[http://hiq.lindegas.com.br/international/web/lg/br/like351gspgbr.nsf/repositorybyalias/pdf\\_msds\\_n/\\$file/Nitrogen.pdf](http://hiq.lindegas.com.br/international/web/lg/br/like351gspgbr.nsf/repositorybyalias/pdf_msds_n/$file/Nitrogen.pdf)>. Acesso em 28/01/2018.

LINDE GAS. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico. Monóxido de Carbono,** 2002. Disponível em:

<[http://www.lindegas.com.br/international/web/ig/br/likeigbr.nsf/repositorybyalias/pdf\\_msds\\_c/\\$file/Carbon%20Monoxide.pdf](http://www.lindegas.com.br/international/web/ig/br/likeigbr.nsf/repositorybyalias/pdf_msds_c/$file/Carbon%20Monoxide.pdf)>. Acesso em 28/01/2018.

MALAVÉ DE LA FUENTE, M. **La relación de trabajo de retroceso de un ciclo Brayton**. Ingeniería, investigación y tecnología, v. 11, n. 3, p. 259-266, 2010.

MARIDUEÑA, L. 1997. Unidad de Protección Ambiental. Guayaquil. M. Young, **The Technical Writer's Handbook**. Mill Valley, CA: University Science, 1989.

MARQUES, IOMAR NEVES. **Termodinâmica** [Livro] /. - Rio de Janeiro : Científica, 1961. - Vol. 3 : p. 316.

MATOS, Marcelo de; ALMEIDA, Mauro R. de e OLIVEIRA, Lupércio T. de. Características dos produtos da carbonização da madeira. Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Gaseificação de madeira e carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1981, p. 34-43.

MEDEIROS, A.C. e REZENDE, M.E.A. **Alcatrão Vegetal: Perspectivas de Produção e Utilização**. Fundação João Pinheiro, Belo Horizonte, 1983.

MIURA, M. *et al.* **Rapid pyrolysis of wood block by microwave heating**. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis, v. 71, n. 1, p. 187-199, 2004.

MORALES DELGADO, R. A. **Propuesta de metodología para el análisis exergético de una turbina a gas de ciclo simple**. JIMENEZ UGARTE, F. O. 2014.

MORRISON, R. T. e BOYD R.N. **Química Orgânica**. 3ª Edição. 1967.

MURRY, J.C. **Química Orgânica**. 6ª Edição. 2004.

MOHAN, D.; PITTMAN, C.; STEELE, P. **Pyrolysis of wood/biomass for bio-oil: a critical review**. **Energy & Fuels**, v. 20, n. 3, p. 848-889, 2006. Disponível em: <<http://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/ef0502397>>. Acesso em 18/06/2018.

OLIVEIRA, A. C. *et al.* Otimização da produção do carvão vegetal por meio do controle de temperaturas de carbonização. **Revista Árvore**, v. 37, n. 3, p. 557-566, 2013.

OLIVEIRA J.B.; FILHO A.V.; MENDES G.M. E GOMES P.A. Produção de carvão vegetal - Aspectos técnicos. Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982, p. 58-73.

OLIVEIRA JUNIOR, D.P. de. **Motores de Combustão Interna**. Piracicaba, 1997. Disponível em: <[http://www.scooterclube.com.br/download/motores\\_de\\_combustao\\_interna.pdf](http://www.scooterclube.com.br/download/motores_de_combustao_interna.pdf)>. Acesso em 20/12/2018.

OLIVEIRA, P.A.V. de e HIGARASHI, M.M. **Geração e utilização de biogás em unidades de produção de suínos**. Embrapa Suínos e Aves, 2006. Disponível em: <<http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/bitstream/doc/856124/1/doc115.pdf>>. Acesso em 18/12/2018.

OASMAA, A.; CZERNIK, S. Fuel Oil Quality of Biomass Pyrolysis Oils - State of the Art for the End Users. *Energy & Fuels*, v.13, p.914-921, 1999.

PAYAKKAWAN, P.; AREEJIT, S.; SOORAKSA, P. Design, fabrication and operation of continuous microwave biomass carbonization system.(Author abstract). **Renewable Energy**, v. 66, p. 49, 2014.

PECORA, V.; FIGUEIREDO, N.; COELHO, S.T. E VELÁZQUEZ S. **Biogás: estudo de caso em São Paulo**. Encontro brasileiro-britânico: energias renováveis para uma vida sustentável. São Paulo, 2008.

PERES, TEREZINHA BONANHO. **Noções básicas de cromatografia**. *Revista Biológica*, São Paulo, v. 64, n. 2, p. 227-229, 2002.

PINHEIRO, P.C.C.; FIGUEIREDO J.F. e SEYE O. **Influência da temperatura e da taxa de aquecimento da carbonização nas propriedades do carvão vegetal de *Eucalyptos***. *Biomassa & Energia*, v.2, n.2, p. 159-168, 2005.

PINHEIRO, P. C. C., **Seminário “Encuentro Regional sobre biocombustibles y Energias Renovables”**, Udelar, Montevideú, Uruguai, 2009.

PONT, GIORGI DAL. **Um breve histórico e descrição do uso da Cromatografia Gasosa como ferramenta analítica para determinação de hidrocarbonetos de petróleo**, 2018. Disponível em: < <https://gia.org.br/portal/um-breve-historico-e-descricao-do-uso-da-cromatografia-gasosa-como-ferramenta-analitica-para-a-determinacao-de-hidrocarbonetos-de-petroleo/>>. Acesso em 21/02/2019.

POTTER MERLE C. E SCOTT ELAINE P. **Ciências Térmicas - Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transmissão de Calor** [Livro] / A. / trad. Arcanjo Alexandre, Bononi Helena e Cuccio Suely Sonoe Murai. - São Paulo : Thomson, 2007. - Vol. 1.

QUIRINO, WALDIR F. *et al.* **Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos**. *Revista da Madeira*, v. 89, p. 100-106, 2005. Disponível em: < <http://funtecg.org.br/arquivos/podercalorifico.pdf>>. Acesso em 21/02/2019.

RIBEIRO, S.K.; REAL, M.V. **Novos Combustíveis**. 1ª Edição. Rio de Janeiro: E-papers, 2006. 92p.

ROCHA, J.C.; ROSA, A.H. e CARDOSO, A.A. **Introdução à Química Ambiental**. 2ª Edição Bookman. Porto Alegre, 2009.

ROSA, A.H.; FRACETO, L.F. E CARLOS, V.M. **Meio Ambiente e Sustentabilidade**. Porto Alegre. Editora Bookman, 2012. 412 p.

SALAS COLOTTA, G.; PORLLES LOARTE, J.; QUISPE ATUNCAR, C. Ahorro del gas de Camisea por uso de un ciclo de potencia combinado de gas y vapor en la generacion electrica.(Diseno y Tecnologia)(Report). **Industrial data**, v. 13, n. 2, p. 92, 2010.

SANSEVERINO, A. M. **Microondas em síntese orgânica**. Química Nova, São Paulo, v. 25, n. 4, Julho de 2002, p. 660-667.

SIQUEIRA, A.B. e SCHARLÉ, E.A. Processos de recuperação de alcatrão em fornos de alvenaria. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais, CETEC. **Produção e utilização de carvão vegetal**. Belo Horizonte, 1982, p. 181-188.

SINDIFER. Sindicato da Indústria do Ferro no Estado de Minas Gerais. **Anuário Estatístico Ano-Base 2018. 2019. Disponível em:** <[http://www.sindifer.com.br/institucional/anuario/anuario\\_2018.pdf](http://www.sindifer.com.br/institucional/anuario/anuario_2018.pdf)>. Acesso 12/07/2019.

SOTO, G. e MIGUEL-NÚÑEZ, MADERAS. 2008. **Ciencia y tecnología. Fabricación de pellets de carbonilla, usando aserrín de pinus radiata (D. Don), como material aglomerante**. Universidad de Talca, Facultad de Ciencias Forestales. Talca, Chile.

SOUZA, S.N.M. de *et al.* **Custo da eletricidade gerada em conjunto motor gerador utilizando biogás da suinocultura**. Acta Scientiarum Technology, v. 26, n. 2, p. 127-133, 2004.

SUAREZ, J. e CASTRO, R. 1999. **Evaluación del poder calorífico superior en biomasa**. Dpto. Ingeniería Agraria. E.S. y T de Ingeniería Agraria de la Universidad de León.

UFMS. Universidade Federal de Santa Maria. **Cromatografia – Fundamentos, Instrumentação e Aplicações**. 2011. Disponível em: <[http://w3.ufsm.br/larp/media/introd\\_gc.pdf](http://w3.ufsm.br/larp/media/introd_gc.pdf)>. Acesso 12/07/2019.

VALENTE, O.F.; ALMEIDA, J.M. de, VITAL, B.R. e LUCIA, R.M.D. **Efeito da temperatura de carbonização nos rendimentos e propriedades do carvão vegetal produzido**. Revista Árvore, Viçosa, v.9, N.1, p. 28-39, 1985.

XIANG, W.; CHEN, Y. Performance improvement of combined cycle power plant based on the optimization of the bottom cycle and heat recuperation. **Journal of Thermal Science**, Beijing, v. 16, n. 1, p. 84-89, 2007.

WESTERHOF, R. J. M.; BRILMAN, D.W.F.; GARCIA-PEREZ, M.; WANG, Z.; OUDENHOVEN, S.R.G.; VAN SWAAJI, W.P.M.; KERSTEN, S.R.A. **Fractional Condensation of Biomass Pyrolysis Vapors**. Energy & Fuels, v.25, p.1817-1829, 2011.

YIN, C. **Microwave-assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production**. Bioresource technology, v.120, p. 273-284, 2012.

ÇENGEL, YUNES A.; BOLES, MICHAEL A. **Thermodynamics: An Engineering Approach** [Livro] /. - [s.l.] : McGraw-Hill, 2006. - Vol. 5.