



# PROPOSTA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA UTILIZANDO O CICLO COMBINADO E OS GASES DA CARBONIZAÇÃO DA MADEIRA ORIUNDOS DE FORNOS INDUSTRIAIS A MICRO-ONDAS

L. A. VIEIRA<sup>1,2,4</sup>, E. P. TEIXEIRA<sup>1,2,5</sup>, A. M. B. SILVA<sup>1,2</sup>, E. U. BUCEK<sup>1,3</sup>, R. N. TOLEDO<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Uberaba - Mestrado Profissional em Engenharia Química

<sup>2</sup> Universidade de Uberaba - Curso Graduação em Engenharia Elétrica

<sup>3</sup> Universidade de Uberaba - Curso Graduação em Engenharia Ambiental

<sup>4</sup> ONDATEC - Tecnologia Industrial em Micro-ondas LTDA

<sup>5</sup> SIC - Sistemas Inteligentes de Controle LTDA

*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. No cenário proposto com o uso do Ciclo Combinado, pôde-se perceber uma alternativa satisfatória para a geração de energia elétrica, por apresentar de rendimentos da ordem de 50%.*

## 1. INTRODUÇÃO

A energia tem um papel muito importante no desenvolvimento humano e o rápido crescimento industrial exige uma ampla produção de energia (ANVARI, *et al.*, 2016). Além da busca de vasta produção de energia, há esforços em minimizar a poluição ambiental, garantir a sustentabilidade nos sistemas de produção e também a busca de novas fontes de energia, trás uma nova percepção do uso do biogás para a produção de eletricidade (BLEY JUNIOR, 2012).

O processo de carbonização produz basicamente: carvão e fumaça tóxica composta por uma mistura de gases não condensáveis (GNC) e condensáveis (GC), denominados por bio-óleo (alcatrão e ácidos pirolenhosos). 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 fumaça.

---



Setenta e cinco por cento (75%) da floresta se transforma em fumaça na indústria do carvão vegetal por causa da tecnologia usada na carbonização. A troca de tecnologia permitirá aproveitar integralmente a energia da madeira, reduzindo a poluição e gerando energia elétrica com o aproveitamento da fumaça da 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.

Uma das alternativas para a geração de energia elétrica limpa e sustentável é a utilização dos efluentes, tais como: bio-óleo e gases não condensáveis, provenientes da carbonização da madeira com o uso de fornos de micro-ondas para a produção de carvão vegetal para vários fins. De fato, a carbonização da madeira, além de produzir carvão vegetal, gera grande quantidade de efluentes líquidos e gasosos. A Tabela I apresenta a quantidade dos produtos e subprodutos (carvão vegetal, ácido pirolenhoso, alcatrão e gases não condensáveis) gerados durante a carbonização de certa espécie madeira, por meios convencionais, em diferentes faixas de temperatura. Os principais componentes dos gases não condensáveis gerados durante o processo de carbonização da madeira são: o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), o monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), o nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), o metano ( $\text{CH}_4$ ), o hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e hidrocarbonetos ( $\text{C}_n\text{H}_{2n}$ ). Já o alcatrão e o ácido pirolenhoso são formados por diversos compostos orgânicos.

Tabela I. Rendimentos gravimétricos médios de carvão, alcatrão, ácido pirolenhoso e gases não condensáveis, em relação à madeira seca. Adaptado de VALENTE (1985). Tratamento Gases não condensáveis (%) \*.

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.

Um dos produtos com grande potencial é o bio-óleo (efluente condensável). Este produto líquido é constituído por uma mistura complexa de compostos químicos, apresentando mais de 300 compostos distintos, sendo a maioria compostos oxigenados. O óleo proveniente da pirólise da biomassa possui características pouco atraentes para o uso como combustível, quando comparado com os combustíveis fósseis, como elevado teor de água, acidez, viscosidade e corrosividade. Apesar de todas estas características e mesmo apresentando um poder calorífico inferior, o bio-óleo é um recurso energético que representa 30% ou mais da biomassa e apresenta potencial para muitas aplicações entre elas a produção de energia elétrica. E há ainda os gases não condensáveis que apresentam quantidade significativa, embora possua menor poder calórico se comparado do GC, precisam ser aproveitados.



Dentro deste contexto, o objetivo deste trabalho é demonstrar uma forma de disponibilidade imediata da energia contida na fumaça oriunda da pirólise gerada pela Tecnologia ONDATEC<sup>®</sup>. Este estudo se justifica, sabendo-se que toda essa quantidade de energia é desperdiçada nos processos convencionais de carbonização com a consequente emissão de poluentes para atmosfera.

## 2. CICLO COMBINADO

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<sup>®</sup> (GE) e Siemens<sup>®</sup> possuem sistemas de ciclo combinado onde o rendimento superam os 50%.

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.

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 Combinado acopla o ciclo Brayton com o ciclo Rankine (XIANG; CHEN, 2007).

## 3. MATERIAL E MÉTODOS

A ONDATEC<sup>®</sup> - Tecnologia Industrial em Micro-ondas projetou um forno industrial contínuo com foco no aproveitamento dos efluentes, Figura 1. Essa tecnologia reduz o tempo de produção do carvão de 15 dias para 3 horas e com aproveitamento integral dos efluentes. Além disso, o carvão apresenta qualidade maior pela facilidade do controle de temperatura.

---



Figura 1. Forno a micro-ondas  
Fonte: ONDATEC (2010).

O forno de processamento contínuo tecnologia ONDATEC® apresenta as seguintes características: potência 300 kW, tensão de alimentação 380 V, 60 Hz, comprimento total de 42 m, com velocidade da esteira ajustada por inversor de frequência, 320 válvulas emissoras de micro-ondas com controle de acionamento manual e automático e sistema de separação de gases condensáveis (GC) e gases não condensáveis (GNC). A madeira é toletada e inserida no forno manualmente, no sentido de garantir a mínima entrada de oxigênio no seu interior, onde, após o operador posicionar os toletes de madeira, o sistema descarrega-os de forma automática na esteira transportadora. Possui uma tecnologia precisa, contínua, limpa, rápida e com excelente nível de automação, na qual, mesmo com o equipamento em funcionamento, pode-se alterar a qualidade do carvão produzido, como por exemplo, a quantidade de carbono no carvão. A tecnologia realiza também a carbonização de forma contínua da madeira, é capaz de reaproveitar os efluentes da carbonização para a geração de energia elétrica, pode-se alterar a velocidade da esteira e sua potência elétrica.

Outro equipamento que faz parte da proposta deste trabalho é a turbina a gás. Este é um tipo de motor a combustão interna, funcionando seguindo o ciclo de admissão de ar, compressão, combustão e escape, como mostrado na figura 2. Quando ocorre a combustão, o gás produzido na câmara de combustão é expandido na turbina, produzindo energia rotacional em um eixo. Na ponta deste eixo é acoplado um gerador de energia elétrica.

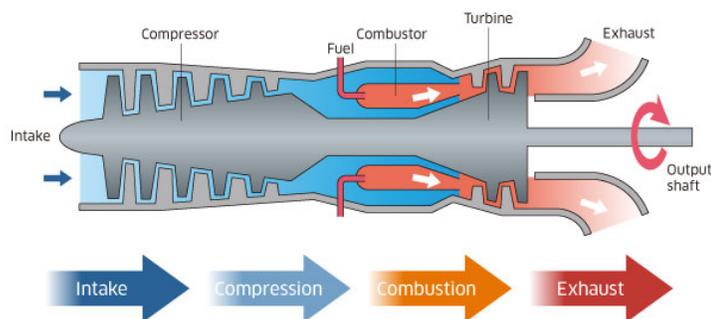


Figura 2. Ciclo da turbina a gás  
Fonte: Kawasaki (2020)

A caldeira de recuperação, que também faz parte do projeto proposto, é um equipamento utilizado para geração de vapor d'água e dá-se o nome de caldeira de recuperação pois o combustível



que a alimenta é proveniente de outro processo, no caso, são os gases de escape da turbina a gás. Após a caldeira de recuperação, encontra-se a turbina a vapor, que é projetada para utilizar o vapor d'água como fluido de trabalho, onde este, é responsável por provocar rotação nas paletas e eixo da turbina. Neste caso há também um gerador de energia elétrica acoplado na ponta de seu eixo rotacional. Na figura 3, pode-se notar a caldeira de recuperação acoplada à turbina a vapor com o gerador de energia elétrica.

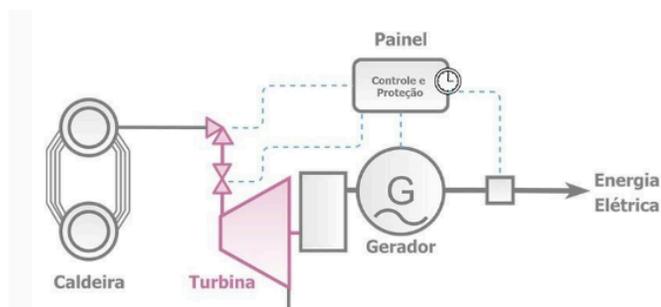
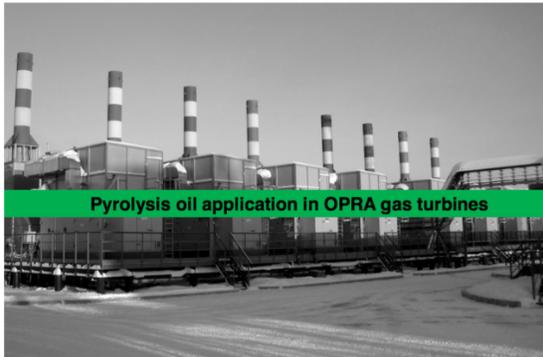


Figura 3. Caldeira de recuperação acoplada a turbina a vapor com gerador de energia elétrica  
Fonte: Wortice (2020)

A seguir serão mostrados os resultados e discussões do projeto proposto.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como o forno a micro-ondas demanda aproximadamente 300 kWh por tonelada de madeira processada, passa a ser vital para a tecnologia, ter um sistema de aproveitamento dos efluentes da carbonização de forma a permitir auferir todos os ganhos do processo. Para tanto, depois de pesquisas no mercado, entramos em contato com a empresa OPRA (Fig. 4), fabricantes de turbinas a gás na Holanda, que desenvolveu uma turbina especificamente para uso nos processos de pirólise (Fig. 5). Essa inovação permitiu propor o ciclo combinado na geração de energia elétrica e alcançar rendimentos satisfatórios.



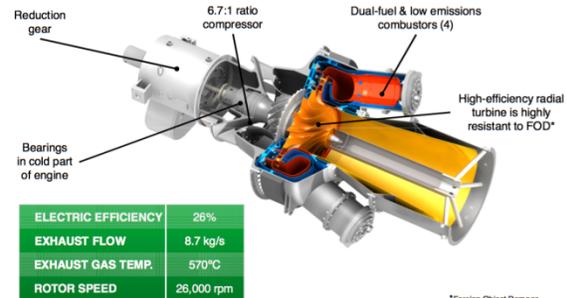
M.Beran  
Combustion engineer

OPRA proprietary information



Figura 4. Turbina OPRA para bio-óleo e GNC.  
Fonte: OPRA (2020).

The 1.9 MW OP16 gas turbine engine combines the best of simplicity and high performance



ELECTRIC EFFICIENCY	26%
EXHAUST FLOW	8.7 kg/s
EXHAUST GAS TEMP.	570°C
ROTOR SPEED	28,000 rpm

\*Foreign Object Damage

OPRA proprietary information



Figura 5. Turbina a gás.  
Fonte: OPRA (2020).

As vantagens do ciclo combinado, uso da turbina a gás em cascata com a turbina a vapor, sempre foram conhecidas pelo mercado por causa do elevado rendimento na conversão da energia térmica para elétrica, mas a turbina projetada para o óleo de pirólise é novidade para o setor.

Os dados do fabricante são motivadores:

- eficiência elétrica de 26%;
- bi-combustível: Óleo (GC – Gás Condensável) e GNC (Gás não condensável)
- temperatura do gás de exaustão: 570°C
- teor de Oxigênio nos gases de exaustão: 55%

Com isso, o cenário proposto é a produção de carvão vegetal com o forno industrial a micro-ondas, onde este carvão poderá ser vendido para a indústria do ferro gusa ou até mesmo no uso em churrasqueiras, e os gases provenientes da carbonização da madeira são alimentados na câmara de combustão da turbina a gás com o gerador de energia elétrica acoplado. Posteriormente, como os gases de combustão da turbina a gás possuem energia térmica agregada, este alimenta uma caldeira de recuperação para a geração de vapor d'água, que em seguida, este vapor, alimenta a turbina a vapor contendo também um gerador de energia elétrica acoplado. Assim, serão dois geradores de energia elétrica trabalhando simultaneamente. Este cenário pode ser visualizado na figura 6. De acordo com os dados dos fabricantes, o conjunto turbogerador (caldeira de recuperação + turbina a vapor), possuem um rendimento médio em torno de 30%.

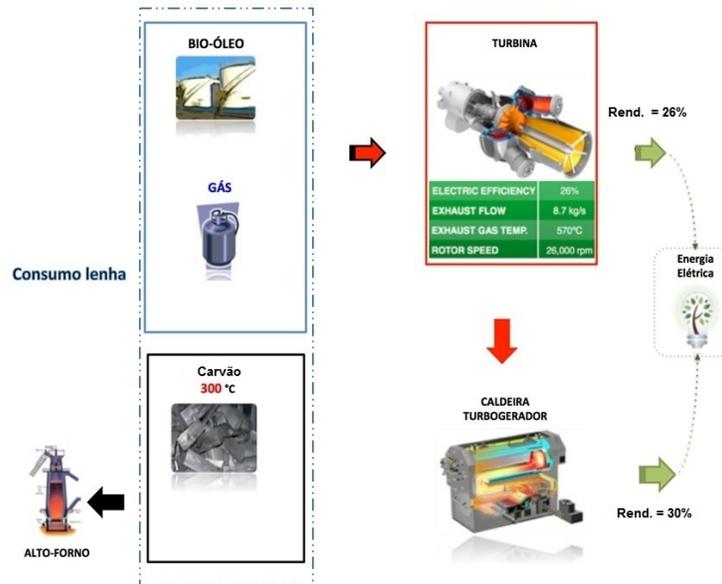


Figura 6. Ciclo Combinado Proposto.

Graças a esse aproveitamento energético é que é possível obter rendimentos em torno de 50%. Comparando este rendimento com os rendimentos individuais dos sistemas, turbina a gás e turbina a vapor, 26% e 30% respectivamente, pode-se notar um ganho interessante quando acoplado estes dois sistemas em cascata. Outra vantagem é que o custo da caldeira de recuperação é menor que da caldeira a biomassa, pois a câmara de combustão é menor e não há necessidade de sistemas de limpeza, já que o combustível é limpo. Continuando a falar das vantagens deste sistema, os gases de exaustão da caldeira de recuperação ainda contêm energia térmica agregada, que podem ser utilizados para secar a madeira de alimentação dos fornos a micro-ondas, aumentando o rendimento deste forno, já que a madeira quanto mais seca entrar no forno, menos energia será necessária para converter a madeira em carvão.

## 5. CONCLUSÃO

Verificou-se que os efluentes da pirólise da madeira podem ser utilizados na geração de energia elétrica e com o uso em turbinas a gás existentes no mercado, especialmente desenvolvida para a queima do gás condensável e do gás não condensável simultaneamente e que apresenta um rendimento na conversão de energia elétrica de 26% e o uso de turbogeradores, com rendimento em torno de 30%, pode-se obter com o sistema combinado um rendimento bastante interessante, em torno de 50%. Além disso, os gases de exaustão provenientes da turbina de recuperação, que ainda possuem energia térmica, podem ser utilizados em processos que demandam aquecimento ou secagem.

No consumo da madeira para produção de carvão vegetal, 3/4 deste insumo se transforma em fumaça que não é aproveitada por causa da tecnologia usada na carbonização. A troca de tecnologia



permitirá aproveitar integralmente a energia da madeira, reduzindo a poluição e gerando energia elétrica com o aproveitamento da fumaça da indústria do carvão, mas esse benefício implica em grandes investimentos para: a troca dos fornos de carvão e a instalação das termelétricas no fabricante.

Com o uso de mais fontes renováveis como o da biomassa (GC e GNC), pode-se diminuir a porcentagem de importação de eletricidade oriunda de fontes hidráulicas e diminuir o uso de fontes não renováveis, contribuindo para o meio ambiente e diminuição do custo da energia elétrica no país.

## 6. REFERÊNCIAS

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.

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

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.

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.

ÇENGEL, YUNES A.; BOLES, MICHAEL A. **Thermodynamics: An Engineering Approach**. McGraw-Hill, 2006. - Vol. 5.

---