

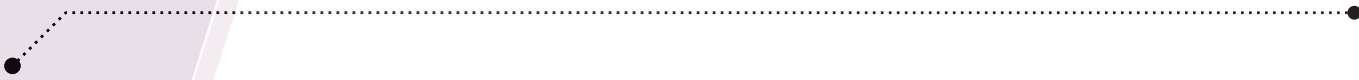
PROPOSTA DE UM SISTEMA AUTÔNOMO PARA UMA COMUNIDADE NÃO-INTERLIGADA BASEADO EM GASEIFICAÇÃO DE BIOMASSA

**PROPUESTA DE UN SISTEMA AUTÓNOMO
PARA UNA COMUNIDAD NO INTERCONECTADA
BASADA EN GASIFICACIÓN DE BIOMASA**

**PROPOSAL FOR AN AUTONOMOUS SYSTEM
FOR A NON-INTERCONNECTED COMMUNITY
BASED ON BIOMASS GASIFICATION**

**Isadora de Oliveira Souza
Diego Mauricio Yepes Maya
Tomás Andrade da Cunha Dias**

▪ Núcleo de Excelência em Geração Termelétrica e Distribuída (NEST), Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Brasil. E- mail:
isadorasouza@unifei.du.br;
diegoyepes@unifei.edu.br;
tomasacdiass@unifei.edu.br

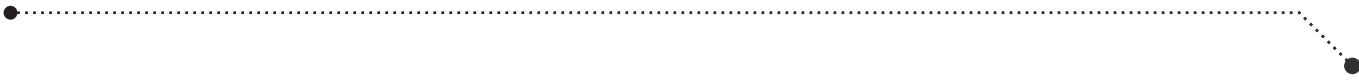


Resumo — A geração de energia elétrica através da gaseificação de biomassa pode ser uma alternativa viável e favorável ao meio ambiente. Neste trabalho, as biomassas residuais – milho, coco e café – foram propostas a partir do mapeamento de informações existentes em bancos de dados, e a partir da análise imediata e elementar, foram realizadas simulações utilizando ferramentas de Dinâmica dos Fluidos Computacionais para determinar as frações molares do gás de síntese gerado a partir da gaseificação de cada resíduo. Calculou-se o poder calorífico e avaliou-se seu desempenho ao ser fornecido como combustível para um motor-gerador de 15kWe especificado a partir de dados obtidos na literatura, fornecendo eletricidade estável advinda da queima de syngas. Com uma alimentação constante de 18 kg/hora, seria necessário gaseificar resíduos de 6,5 hectares de milho ou 17 hectares de coco ou ainda 124 hectares de café. Nestas condições, com uma alimentação contínua, 24 horas/dia, tem-se a geração de 10.800 kWh em um mês, suficiente para alimentar uma comunidade não-interligada de 67 residências, o que comprova a viabilidade da pesquisa para esta aplicação.

Palavras chave — Gaseificação, Syngas, Biomassa, Energia, Aproveitamento Energético de Resíduos.

Abstract — Electricity generation through biomass gasification can be a viable and environment-friendly alternative. In this work, residual biomasses from corn, coconut, and coffee were proposed based on the mapping of information in databases, as the immediate and elementary analysis, simulations were performed using Computational Fluid Dynamics tools to determine the fractions molars of the synthesis gas generated from the gasification of each residue. The calorific value was calculated and its performance evaluated when supplied as fuel for a 15kWe engine-generator specified from data obtained in the literature, providing stable electricity from the burning of syngas. With a constant supply of 18 kg/hour, it would be necessary to gasify residues of 6.5 hectares of corn or 17 hectares of coconut, or 124 hectares of coffee. In these conditions, with continuous feeding, 24 hours/day, there is the generation of 10,800 kWh in one month, enough to feed an unconnected community of 67 residences, which proves the feasibility of the research for this application.

Keywords — Gasification, Syngas, Biomass, Energy, WtE (Waste to Energy).



Resumo — La generación de energía eléctrica mediante gasificación de biomasa puede ser una alternativa viable y respetuosa con el medio ambiente. En este trabajo se propusieron biomásas residuales - maíz, coco y café - con base en el mapeo de la información existente en bases de datos, y a partir del análisis inmediato y elemental se realizaron simulaciones utilizando herramientas de Dinámica de Fluidos Computacional para determinar las fracciones molares del gas de síntesis generado a partir de la gasificación de cada residuo. Se calculó el poder calorífico y se evaluó su rendimiento cuando se suministró como combustible para un motor-generator de 15kWe especificado a partir de datos obtenidos en la literatura, proporcionando electricidad estable a partir de la quema de gas de síntesis. Con un suministro constante de 18 kg / hora, sería necesario gasificar residuos de 6,5 hectáreas de maíz o 17 hectáreas de coco o 124 hectáreas de café. En estas condiciones, con una alimentación continua, las 24 horas/día, se produce la generación de 10.800 kWh en un mes, suficientes para alimentar a una comunidad no interconectada de 67 residencias, lo que prueba la viabilidad de la investigación para esta aplicación.

Palavras chave — Gasificación, Syngas, Biomasa, Energía, Aprovechamiento energético de residuos

I. INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um recurso imprescindível para o desenvolvimento humano e indispensável para a melhoria da qualidade de vida de uma sociedade. Entretanto, atualmente cerca de 2,8 milhões de brasileiros ainda são acometidos pela falta de energia elétrica em seus domicílios, sendo a população rural a que mais sofre, uma vez que as áreas urbanas têm cobertura de rede elétrica em 97,8% [1]. Atentando-se a este cenário, a geração de energia através da biomassa (seja ela residual ou plantada) é uma alternativa potencial para garantir energia elétrica robusta às comunidades isoladas (da rede elétrica).

Entre as diferentes rotas de conversão da energia elétrica, o processo de gaseificação é uma opção de geração renovável que se destaca por transformar a biomassa de baixo poder calorífico em um combustível mais nobre, através da oxidação parcial por meio de ar, oxigênio ou vapor. Nesse processo, a energia química das ligações de carbono presentes na biomassa é convertida em dois estágios, originando um gás que pode ser utilizado na alimentação de turbinas e motores a gás ou matéria prima para obtenção de combustíveis líquidos [2]. O aproveitamento energético da biomassa surge como uma possibilidade de geração de energia elétrica de forma descentralizada com a minimização dos impactos ambientais associados ao descarte, à queima inadequada, ou a utilização de combustíveis fósseis.

Dentro desta perspectiva, o Brasil, que possui a agricultura como um dos fortes pilares de sua economia, com significativa participação no mercado nacional e internacional e atuando de maneira influente no PIB do país, tem ótimas condições de se beneficiar da biomassa para obter mais segurança energética. De acordo com o IBGE, 728.672 domicílios não possuem fornecimento de energia elétrica, o equivalente a 2.749.243 brasileiros. Desse total, são 113.237 domicílios na zona urbana, atingindo 396.294 pessoas, e 595.435 domicílios na área rural, abrangendo o equivalente a 2.352.949 habitantes. Segundo o instituto dos serviços prestados às residências brasileiras, as áreas urbanas representam cobertura de 97,8%, no entanto, mesmo com um alto índice de acesso (89,7%), a população rural é a que mais sofre as consequências de falta de luz elétrica no campo [1].

No presente trabalho, intenciona-se então, estimar o potencial impacto do aproveitamento de resíduos agrícolas para geração de eletricidade em comunidades não interligadas ao sistema elétrico brasileiro. Os resíduos das biomassas escolhidas para este projeto, serão de milho, coco e café, visto serem, dentro outros motivos, culturas abundantes em regiões com consideráveis comunidades isoladas do sistema elétrico interligado, e pouco estudadas em processos de geração de energia elétrica por gaseificação. Para este fim, será simulado o processo de gaseificação utilizando ferramentas de Dinâmica dos Fluidos Computacional, visando

obter além das melhores condições de operação dos reatores, também da composição do gás produzido que posteriormente acionará um grupo gerador composto por um motor de combustão acoplado a um gerador elétrico. Serão realizados: o levantamento da disponibilidade de resíduos destas biomassa em toneladas por hectares no cenário brasileiro; a avaliação teórica da qualidade e da quantidade do gás de síntese gerado a partir da gaseificação; e o dimensionamento de um sistema piloto adequado para geração distribuída ofertando melhores condições sociais a população local em razão das comodidades oferecidas pela eletricidade.

A) Sistema Interligado Nacional (SIN)

O setor elétrico brasileiro é constituído pelo Sistema Interligado Nacional (SIN), uma grande rede que se estende por boa parte do país congregando sistemas de geração e uma malha de transmissão de energia elétrica. Devido à magnitude deste sistema interligado e à existência de restrições físicas associadas à transmissão de energia elétrica por longas distâncias, o SIN foi dividido em quatro subsistemas: Nordeste, Sudeste/Centro-Oeste, Sul e Norte [3].

As instalações são responsáveis pelo suprimento e gestão de energia elétrica a todas as regiões do país interligadas eletricamente, detendo cerca de 96,6% da capacidade total de produção de energia elétrica do país. Ademais, o

SIN é um sistema predominantemente hidrelétrico, sendo que mais de 79% de sua capacidade total de oferta é advinda de geração hídrica [4].

B) Gaseificação

A gaseificação é um processo termoquímico onde materiais carbonáceos sólidos ou líquidos contendo carbono, hidrogênio, oxigênio e uma variedade de constituintes orgânicos e inorgânicos, são convertidos através da oxidação parcial em um gás combustível. O agente oxidante pode ser ar, oxigênio, vapor de água ou até misturas dos mesmos [5]. O processo de gaseificação ocorre em várias etapas, em função de reações químicas que serão apresentadas abaixo. Um reator para gaseificação é chamado de gaseificador, dentro dele o processo de gaseificação se dá em zonas que são definidas pela diferença de temperatura do processo e classificadas em: secagem, pirólise, combustão e redução/gaseificação [6].

A secagem é a eliminação da água presente no combustível, que acontece por completo a partir dos 100°C. O calor das reações remove a umidade da biomassa. À medida que a temperatura aumenta os produtos de baixo peso molecular começam a volatilizar. Já a pirólise é a termo decomposição da biomassa na ausência de oxigênio que ocorre a temperatura entre 280 e 450°C. Envolvem reações de craqueamento térmico, transferência de calor e massa e a produção de gases permanentes

(H_2 , CO , CO_2 , CH_4) e resíduos sólidos devolatilizados, como alcatrão e carvão. A quebra das moléculas de hidrocarbonetos é influenciada pelo tamanho da partícula, temperatura, pressão e tempo de residência do processo [7].

A oxidação se dá a temperaturas da ordem 700 a 1800°C e é caracterizada pela liberação de energia na forma de calor, necessária para o desenvolvimento dos diferentes processos exotérmicos. O oxigênio do agente oxidante reage com o carbono e o hidrogênio do combustível resultando em dióxido de carbono e vapor d'água [6]. E por fim, a redução/gaseificação é uma zona onde acontecem em sua maioria reações endotérmicas numa faixa de temperaturas da ordem de 800 até 1100°C. Nesta fase o carvão é convertido principalmente em CO e CH_4 [7].

A composição do gás gerado é consequência das condições de operação do gaseificador tais como temperatura e pressão, pelas características do combustível como umidade, tipo, tamanho e composição, e teor de oxigênio no [6].

C) Gaseificadores

A gaseificação pode ser realizada em vários tipos de reatores. Estes podem ser classificados em função sua pressão de trabalho (em atmosféricos e pressurizados), do tipo de leito e do deslocamento relativo entre a biomassa

e o meio de oxidação [8]. Tem-se desta forma para gaseificadores de leito fixo: fluxo co-corrente, fluxo contracorrente e fluxo cruzado. Para gaseificadores de leito fluidizado tem-se: o circulante e o borbulhante. Os reatores de leito fixo co-corrente e contracorrente são os mais comumente utilizados [9].

O funcionamento do reator de leito fixo com fluxo concorrente consiste na biomassa inserida na parte superior, e o ar (agente oxidante) introduzido na zona de combustão, que escoam no mesmo sentido, e o gás resultante sai na parte inferior. Já o funcionamento do reator de leito fixo com fluxo contracorrente, compreende a entrada da biomassa também na parte superior, porém, o ar introduzido na zona de combustão escoam no sentido contrário a biomassa, e a saída do gás resultante é na parte superior.

D) Poder Calorífico

O poder calorífico define-se como a quantidade de energia na forma de calor despreendida por unidade de massa ou de volume na combustão completa de um material combustível. Depende basicamente da composição química de cada combustível sendo expressa em J/kg , cal/kg ou J/Nm^3 [10]. Distingue-se dois valores de poder calorífico: o poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI). O primeiro é aquele em que a combustão se efetua a volume constante e no qual a água formada durante a combustão é condensada e o calor que é derivado desta condensação

é recuperado. O inferior é a energia efetivamente disponível por unidade de massa de combustível após deduzir as perdas com a evaporação da água. Como a temperatura dos gases de combustão é muito elevada nas máquinas térmicas, a água contida sempre se encontra no estado de vapor, portanto, o que deve ser considerado é o PCI [11].

E) Resíduos Agrícolas e as Culturas Seleccionadas

Os resíduos agrícolas considerados são as partes das plantas e colheitas que não são aproveitadas para consumo alimentar humano. O descarte inadequado e o não aproveitamento destes materiais deve ser encarado como um desperdício, visto que são matérias-primas renováveis com potencial uso energético.

1) A cultura do milho

A cultura do milho encontra-se amplamente disseminada no país. Segundo o Departamento de Agricultura dos EUA, a produção de milho do Brasil é estimada em 125 milhões de toneladas na temporada 2018/19, com uma estimativa de área de 16,5 milhões de hectares. Atualmente o Brasil é o terceiro maior produtor de milho do mundo [12]. Por também ser um produto típico de pequenas lavouras, cultivado em todo o país, o milho possui grande versatilidade de uso e é de grande importância para a agricultura familiar [13]. A produtividade média das lavouras de milho no Brasil é de 7,8 toneladas/hectare [14]. Na colheita do

milho quatro tipos de resíduos são gerados: o caule, a folha, o sabugo e a palha da espiga, que, comumente, são deixados no campo, para ciclagem de nutrientes. A geração de resíduo na cultura do milho é da ordem de 4,5 toneladas por toneladas de grãos colhidos. [15]. Dentre os resíduos de milho, o caule soma mais de 40% do total, seguido de 30% de folha e em torno de 13% de sabugo e palha, portanto na cultura do milho o caule e folha, resultando em aproximadamente 70%, têm destaque na produção de resíduo com 24,57 toneladas por hectare [16].

2) A cultura do coco

O Brasil é o quarto maior produtor mundial de coco com cerca de 2,8 milhões de toneladas por ano, em uma área colhida de 257 mil hectares de coqueiros. A produtividade no Brasil é próxima de 11 toneladas por hectare em média, parâmetro que eleva o país a notoriedade entre os maiores ranking de produtividade do mundo [17]. Cerca de 70% da exploração de coqueiro no Brasil ocorre em propriedades de até 10 hectares [18]. A geração de resíduos provenientes da sua produção é significativa. O consumo de água de coco tem gerado cerca de 2,4 milhões de toneladas de cascas por ano, acarretando um sério problema ambiental, dado que aproximadamente 85% do peso bruto do coco verde é considerado lixo - sendo a casca responsável por 80% deste total. A decomposição da casca do coco demora cerca de 10 anos e os custos com transporte e disposição desses resíduos são elevados [19].

3) A cultura do café

O Brasil é o maior produtor e exportador mundial de café e o segundo maior consumidor da bebida no mundo. É o 5º produto na pauta de exportação brasileira, movimentando US\$ 5,2 bilhões em 2017 [20]. A área em produção de cafés no Brasil, considerando as duas espécies (Arábica e Robusta), na safra de 2018 totalizou 1,980 milhão de hectares, cuja safra estava estimada em um volume equivalente a 53 milhões de sacas de 60 kg, com produtividade média de 25 sacas por hectares, ou seja, 1500 kg/ha [21]. Nas diferentes etapas do processo de produção do café são geradas biomassas residuais, que incluem a mucilagem, polpa, casca, entre outros, já que apenas 5% do peso do fruto é usado para a preparação da infusão [22]. Entre os resíduos do café destacam-se as cascas, que representam cerca de 50% do fruto. Dessa forma, aproximadamente 2,5 milhões de toneladas de cascas de grãos de café são produzidas por ano no Brasil [23]. Além disso, novas técnicas de poda no manejo dos cafezais podem proporcionar o aumento de biomassa residual.

II. MATERIAIS E MÉTODOS

A) Caracterização dos Resíduos Selecionados

Há a necessidade da caracterização físico-química da biomassa visando desenvolver comparações quanto suas propriedades específicas para fins energéticos, objetivando então,

haver uma análise de fato sobre seu potencial como fonte de alimentação de um gaseificador. A caracterização necessita, basicamente, de 3 classes de procedimentos, sendo elas: a análise imediata, análise elementar e o poder calorífico. A análise imediata fornece as frações de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo. Na análise elementar são obtidas as frações dos constituintes da biomassa, onde os principais elementos são carbono, oxigênio e hidrogênio. No poder calorífico é obtido o calor liberado pela combustão completa da biomassa com oxigênio [24]. Realizou-se uma revisão bibliográfica com o objetivo de encontrar na literatura, dados acerca das biomassas escolhidas. Utilizou-se a base de dados Phyllis [25] para se obter a análise da biomassa desejada.

1) Caracterização dos resíduos do milho

Tabela 1. Análise Imediata, Análise Elementar e PCI do Resíduo de Milho.

Análise Imediata* [%]	
Material Volátil	85,17
Carbono Fixo	14,83
Análise Elementar** [%]	
Carbono	49,31
Hidrogênio	6,04
Nitrogênio	0,7
Enxofr	0,11
Oxigênio	43,56
Total	100
PCI do Resíduo de Milho [MJ/kg]	
	19,42

*em base seca e livre de cinzas, **em base seca.

Fonte: PHYLLIS1, 2019 [26].

Visando a caracterização do resíduo de milho, vale ressaltar, inicialmente, que o insumo para a gaseificação considerado

nesta pesquisa, consiste no uso das folhas e caules que permanecem na plantação depois do cereal ser colhido. A Tabela 1 sintetiza os dados sobre os resíduos do milho.

2) Caracterização dos resíduos do coco

Visando a caracterização do resíduo de coco, tem-se definido que o insumo utilizado como fonte de alimentação do reator de gaseificação nesta pesquisa, consiste no uso das cascas do coco, o próprio fruto em si, com a ausência da água no seu interior. A Tabela 2 sintetiza os dados sobre os resíduos do coco.

Tabela 2. Análise Imediata, Análise Elementar e PCI do Resíduo de Coco.

Análise Imediata* [%]	
Material Volátil	72,76
Carbono Fixo	27,24
Análise Elementar** [%]	
Carbono	51,2
Hidrogênio	5,6
Enxofr	0,1
Oxigênio	43,1
Total	100
PCI do Resíduo de Coco [MJ/kg]	
	19,65

*em base seca e livre de cinzas, **em base seca.
Fonte: PHYLLIS1, 2019 [27].

3) Caracterização dos resíduos do café

Já para o café, tem-se como a biomassa residual específica utilizada nesta pesquisa, suas cascas, derivado do processamento do grão. A Tabela 3 sintetiza os dados sobre os resíduos do café.

Tabela 3. Análise Imediata, Análise Elementar e PCI do Resíduo de Café.

Análise Imediata* [%]	
Material Volátil	67,36
Carbono Fixo	32,64
Análise Elementar** [%]	
Carbono	43,9
Hidrogênio	4,8
Nitrogênio	1,6
Enxofr	0,1
Oxigênio	49,6
Total	100
PCI do Resíduo de Café [MJ/kg]	
	15,12

*em base seca e livre de cinzas, **em base seca.
Fonte: PHYLLIS1, 2019 [28].

B) Componentes do sistema simulado

1) Tipo de gaseificador

O projeto neste trabalho, utiliza como reator o modelo co-corrente, também denominado como *Downdraft* [29]. Eles são recomendados pela simplicidade e o baixo teor de alcatrão formado. O alcatrão é indesejável devido a diversos problemas associados a sua condensação, formação de aerossóis de alcatrão e polimerização que formam estruturas complexas que causam problemas no equipamento e também em turbinas e motores onde o gás produzido é utilizado [30]. O gás gerado pela queima desses resíduos passa por um processo de pós-tratamento para a separação de material particulado e, em seguida, alimenta um pequeno motor que aciona e mantém em operação um gerador de energia elétrica. O gás é automaticamente sugado pelo motor, que começa a funcionar acoplado ao gerador. A vibração do motor é então transferida para o gerador que, após

ser rotacionado em alta frequência, consegue manter o sistema homogêneo para a geração de eletricidade [31].

2) Conjunto Reator e Motor-Gerador

O presente projeto visa a utilização das características do PP20 Power Pallet, que consiste em um gaseificador, um motor industrial GM Vortec 3.0L de quatro cilindradas – produzido para aplicações industriais já configurado para funcionar com combustíveis gasosos, trabalhando numa eficiência de aproximadamente 28% – emparelhado com geradores Mecc Alte AVR, além de uma unidade de controle de processo [32].

Tabela 4. Características do Conjunto Motor-Gerador.

Modelo do Conjunto	
Dimensões [m]	1,4 x 1,4 x 2,2
Peso [kg]	1.065
Eficiência	28%
Características do Motor	
Potência Nominal [kW]	18
Consumo Biomassa [kg/kWh]	1,2
Características do Gerador	
Potência Nominal [kWe]	15
Frequência [Hz]	60

Fonte: ALL POWER LABS, 2015 [32].

A queima do Syngas fornece eletricidade estável advinda da gaseificação de biomassa e resíduos agrícolas e florestais. São modelos compactos e portáteis, que podem ser transportados em uma pequena caminhonete para onde a energia for necessária. Utilizando avanços patenteados no controle eletrônico e na reciclagem de calor residual, os gaseificadores são extremamente eficientes, consumindo 1,2 kg de biomassa por kWh de eletricidade produzida [32].

A Tabela 4 demonstra as características do modelo e apresenta os dados sobre o motor e o gerador.

3) Simulações computacionais

Os métodos numéricos aplicados na mecânica de fluidos são ferramentas que permitem estudos dos fenômenos da gaseificação sem que isso represente grandes custos econômicos com testes experimentais [33]. A previsão dos campos de velocidades, pressão, temperaturas e propriedades turbulentas é efetuada através de modelos matemáticos baseados nos princípios de conservação de massa, da energia e da quantidade de movimento, domínio do espaço e/ou do tempo, assim como definição de constantes quando necessário [34].

Para obter a composição do Syngas para as diferentes biomassas residuais consideradas nesta pesquisa, permitindo posteriormente o cálculo do poder calorífico inferior, foi utilizado o modelo desenvolvido por Maya [35], e que permite simular diferentes condições operacionais com biomassa e reagentes desde que seja mantida a condição de equilíbrio químico. As principais hipóteses consideradas nas simulações foram: equilíbrio químico; o leito do gaseificador é composto por duas fases, a sólida e a gasosa, que interagem como dois fluxos paralelos (para a fase sólida e gasosa é assumido que os elementos de fase se movimentam com perfis de velocidade uniforme); regime permanente dado que a maioria dos reatores de leito fixo operam por longos períodos sem variações

significativas de suas propriedades físicas; condição isotérmica; comportamento de gás ideal na mistura de gases; cinzas são consideradas inertes quimicamente; reações químicas são descritas para cada situação particular.

4) Fluxo energético

Considerando as condições estabelecidas para o motor e gaseificador, a Figura 1 esquematiza o fluxograma energético. Sabendo-se que o gerador produz 15kWe, em uma hora ele gerará 15kWh. Como já mencionado, sabe-se também que para gerar 1kWh neste conjunto, precisa-se de 1,2kg de biomassa (ALL POWER LABS, 2015), então encontra-se a necessidade de alimentar o gaseificador com 18kg de biomassa por hora.

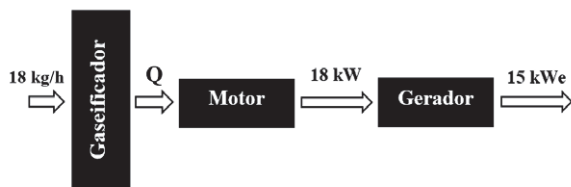


Figura 1. Fluxograma da energia no sistema proposto. Fonte: Da própria autora, 2020.

Sabendo que a eficiência do motor é de 28%, calculou-se inicialmente a energia total (em calor) que entra do combustível (Q) para ter essa geração de 18kW, conforme Equação 1. Pelo calor e com os PCI dos gases de síntese, obteve-se o consumo de combustível necessário para cada tipo de resíduo, por meio da Equação 2.

$$Q = \left[\frac{18 \text{ kW}_{\text{mecânico}}}{0,28} \right] = 64,3 \text{ [kW}_{\text{térmico}}] \quad (1)$$

$$Q = \text{consumo de combustível} \cdot \text{PCI}_{\text{gás de síntese}} \quad (2)$$

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A) PCI do gás de síntese

A partir dos dados gerados pela simulação do processo de gaseificação utilizando ferramentas de Dinâmica dos Fluidos Computacional, foi possível obter as frações molares da composição do gás de síntese para cada biomassa residual, como apresentado na Tabela 5. Os outros elementos não foram considerados em razão de não serem elementos que apresentam poder calorífico significativos.

Tabela 5. Frações Molares dos gases combustíveis no Gás de Síntese para cada biomassa residual.

	CH ₄ [v/v]	CO [v/v]	H ₂ [v/v]
Resíduo de Milho	0,243 21,25		21,80
Resíduo de Coco	0,212	21,35	20,70
Resíduo de Café	0,237	24,35	20,30

Fonte: FRIGO et al, 2019.

O poder calorífico inferior (PCI) do gás é calculado a partir da fração volumétrica dos combustíveis do gás: CO, H₂ e CH₄. De acordo com a metodologia apresentada pelo Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL, pelas siglas em inglês do National Renewable Energy Laboratory), o poder calorífico inferior do CH₄, CO e H₂ é respectivamente: 35,814 MJ/Nm³, 12,622 MJ/Nm³ e 10,788 MJ/Nm³ (SALES, 2015).

A partir disto, com os dados da Tabela 5 e os respectivos poderes caloríficos dos elementos descritos acima, é possível obter o poder calorífico do gás de síntese de cada biomassa residual, pela média ponderada como é apresentado na Tabela 6.

Tabela 6. Poder Calorífico Inferior do Gás de Síntese de cada biomassa residual.

PCI do Gás de Síntese [MJ/Nm ³]	
Resíduo de Milho	5,121
Resíduo de Coco	5,004
Resíduo de Café	5,348

Fonte: da autora, 2020.

B) Alimentação do Motor e Gaseificador

A partir dos dados apresentados no referencial do trabalho, tem-se sintetizado na Tabela 7 os dados referentes a geração de resíduos durante um ano de cada biomassa especificada.

Tabela 7. Geração de biomassa residual durante um ano para 1 hectare no Brasil.

Geração anual de Resíduos	
Milho	24,57 t/h
Coco	9,34 t/h
Café	1,27 t/h

Fonte: Da própria autora, 2020.

Para calcular as demandas de syngas de cada cultura, utilizou-se o PCI dos gases obtidos pela Tabela 6 nas Equações 1 e 2. E para a estimativa das áreas necessárias de cada cultura para fornecer biomassa para uma unidade de gaseificação proposta, utilizou-se os dados de geração anual de resíduos da Tabela 7. Tais resultados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8. Resultados obtidos para o consumo de syngas e para a área necessária para o projeto para cada cultura.

Resultados	Milho	Coco	Café
Consumo de syngas [Nm ³ /h]	45,22	46,26	43,2
Área necessária [ha]	6,5	17,0	124,0

Fonte: Autora, 2020.

C) Geração de Eletricidade

Uma vez considerada as situações acima calculadas, tem-se que para os 3 casos, com as devidas variações de quantidade de hectares para a obtenção da biomassa residual, que alimentando o gaseificador continuamente 24h por dia, tem-se a geração de 360kWh de energia elétrica. Desta forma, em 30 dias, totaliza-se a geração de 10.800 kWh. Considerando o consumo médio brasileiro de energia elétrica ser de 160 kWh por mês em uma residência com 5 pessoas, calcula ser possível através deste sistema, em um mês alimentar uma comunidade de aproximadamente 67 casas.

De maneira proporcional, conforme representado na Figura 2, tem-se então que em um mês, um hectare pode gerar aproximadamente 55,38 kWh, 21,18 kWh ou 2,90 kWh, a depender se é utilizado como plantação de milho, coco ou café, respectivamente. Consequentemente, tem-se que para gerar energia para alimentar somente uma residência nos moldes do padrão de consumo médio brasileiro, para a geração de 160 kWh seria necessário um terreno de aproximadamente 3 hectares de cultura do milho ou 7,5 hectares de cultura de coco ou ainda 55,1 hectares de cultura de café.

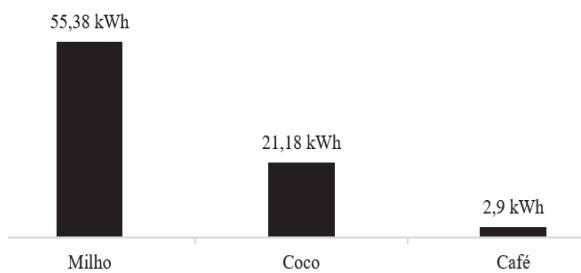


Figura 2. Capacidade de geração de energia elétrica, em kWh, com a biomassa residual de 1 hectare para cada cultura

Fonte: Autora, 2020.

IV. CONCLUSÕES

Realizadas as devidas simulações, empregando as características de um reator de gaseificação co-corrente, foram obtidos os valores das frações molares dos gases combustíveis para cada resíduo, notando-se uma grande proximidade entre suas proporções, o que influencia diretamente na semelhança dos valores calculados para o poder calorífico inferior, que define a qualidade do gás gerado e a capacidade de combustão, consequentemente a entrega de calor ao motor. Sendo o poder calorífico do resíduo de café ligeiramente maior do que o da biomassa residual do milho e coco, tem-se a razão para a maior eficiência do gaseificador neste caso.

A partir da sequência de cálculos para a estimativa da quantidade de biomassa necessária para tocar o sistema, com o arranjo motor-gerador especificado com geração de 15kWe, deve-se alimentar o gaseificador com 18 kg/h de biomassa residual. Considerando os valores de quantidade de resíduos por hectare

gerado em cada cultura, conclui-se que seria viável esta geração distribuída somente se na região houver pelo menos 6,5 hectares de cultivo de milho, ou 17 hectares de cultivo de coco ou ainda 124 hectares de cultivo de café. Evidencia-se então, que seria improvável para o pequeno/médio produtor o último cenário, haja visto a extensão de terras necessária.

Com a alimentação contínua de 18kg/hora, 24h/dia, em um mês tem-se a geração de 10.800 kWh, energia elétrica suficiente para alimentar uma comunidade de 67 residências que estejam dentro do consumo médio brasileiro. Ou seja, o sistema projetado, com as culturas especificadas, com a exceção já mencionada para o café, possui ótimas condições para um aproveitamento relevante dos resíduos em benefício de uma notória quantidade de energia elétrica que pode beneficiar uma considerável comunidade rural não interligada ao sistema elétrico brasileiro.

V. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de registrar seus agradecimentos ao Comitê da Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro aos subsídios para apoiar esta pesquisa.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] PEREIRA, C. A. Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios - Síntese de Indicadores. Rio de Janeiro, 2015 . Disponível em: <https://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv98887.pdf>.
- [2] MCKENDRY, P. Energy production from biomass: Gasification Technologies, 2002.
- [3] EPE. Empresa de Pesquisa Energética - Balanço Energético Nacional (BEN): Ano base 2016, 2017, 2017. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br>>.
- [4] ALVES, E.; GARAVELLI, S. Sistema Interligado Nacional (SIN) com ênfase no Controle de Tensão. Brasília, 2008.
- [5] BRIDGWATER, V. A techno-economic comparison of power production by biomass fast pyrolysis with gasification and combustion, 2002.
- [6] OLIVEIRA, C. A. V. B. DE S. Estudo experimental da gaseificação do eucalipto em gaseificador co-corrente de duplo estágio com ar , vapor saturado e oxigênio para produção de gás de síntese. Universidade Federal de Itajubá - UNIFEI, 2015.
- [7] BASU. Biomass Gasification and Pyrolysis. Burlington, MA: Elsevier Inc., 2013.
- [8] BAYER, P. Gasificación de biomassa Estudios teórico-experimentales en lecho fijo equicorriente. Editor UdeA, 2009.
- [9] CASTANHEIRA, D. F. D. Estudo de um sistema de gaseificação para cogeração – Estudo experimental e de aplicação. Universidade do Porto - Faculdade de Engenharia, 2017.
- [10] ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. Standard test method for gross calorific and ash value of waste materials. West Conshohocken, 8p., 2007.
- [11] HUGOT, E. Handbook of Cane Sugar Engineering. 3rd.ed. Amsterdam: Elsevier Science Publishers B.V., 1186p., 1986.
- [12] ABIMILHO. Milho: Brasil deve produzir 90 milhões de toneladas em 2018/2019. Disponível em: <<http://www.abimilho.com.br/noticia/milho-brasil-deve-produzir-90-milhoes-de-toneladas-em-20182019>>. Acesso em: 31 de Maio de 2019.
- [13] CALADO, J. A Cultura do Milho. 1a ed. Évora: Escola de Ciências e Tecnologia Departamento de Fitotecnia, 2014.
- [14] BERTRAND, C.; YPERSELE, J. V.; BERGER, A. Are Natural Climate Forcings Able to Counteract the Projected Anthropogenic Global Warming? Climatic Change, 2002. Disponível em: <<http://stephenschneider.stanford>.

- edu/Publications/PDF_Papers/BertrandEtAlfulltext.pdf>.
- [15] KOOPMANS, A. Agricultural and forest residues: generation, utilization and availability. Malasia: Regional Consultation on Modern Applications of Biomass Energy, 2000.
- [16] TEIXEIRA, A.; SIQUEIRA, V. F. DE. Artigo Original Potencial Energético dos Resíduos da cultura do Milho (Zea mays). p. 153–164, 2018.
- [17] MARTINS, C. R. Produção e Comercialização de Coco no Brasil Frente ao Comércio Internacional: Panorama 2014. Documentos Embrapa Tabuleiros Costeiros, 2014.
- [18] SIGUEIRA, A.; ARAGÃO, M. A introdução do coqueiro no Brasil: importância histórica e agrônômica. Embrapa Tabuleiros Costeiros. Documentos, 47, p. 24, 2002.
- [19] ROSA, F. Cellulose nanowhiskers from coconut husk fibers: Effect of preparation conditions on their thermal and morphological behavior, 2010.
- [20] SUPLICY, E. M. Brasil se consolida na tradição de grande produtor mundial de café. Visão Agrícola nº12. Brasília, 2013. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/va12-custos-e-comercializacao03.pdf>. Acesso em: 23 de Maio de 2020.
- [21] TADEU, L. Consórcio Pesquisa Café - Juntos por um café brasileiro ainda melhor. Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <http://www.consorciopesquisacafe.com.br/index.php/imprensa/noticias/878-2018-08-01-20-31-50>. Acesso em: 3 de Julho de 2019.
- [22] ARTURO, E.; CECIBEL, N.; MARIEL, K. Propuesta para el aprovechamiento de los subproductos del beneficiado del café como una alternativa para la diversificación de la actividad cafetalera y aporte de valor a la cadena productiva. Universidad de El Salvador, 2008.
- [23] KAFLER, L. M.; LIRA, T. S. Casca do café para a geração de energia: Caracterização da Biomassa e Análise dos Gases. Fortaleza, 2016.
- [24] SÁNCHEZ, C. Tecnologia da gaseificação de biomassa, Campinas Editora Átomo, 2012.
- [25] PHYLLIS. Database for the physico-chemical composition of (treated) lignocellulosic biomass, micro- and macroalgae, various feedstocks for biogas production and biochar. ECN. TNO, Holanda, 2020. Disponível em: <https://phyllis.nl/>.
- [26] PHYLLIS1. Corn Stover (#704). Disponível em: <https://phyllis.nl/Biomass/View/704>. Acesso em: 16 de Julho de 2019.

- [27] PHYLLIS2. Coconut Shell (#1919). Disponível em: <https://phyllis.nl/Biomass/View/1919>. Acesso em: 16 de Julho de 2019.
- [28] PHYLLIS3. Coffee Husk (#1917). Disponível em: <https://phyllis.nl/Biomass/View/1917>. Acesso em: 16 de Julho de 2019.
- [29] VERA, R. Gaseificação de Biomassa na Geração de Eletricidade em Pequena Escala. UnB, Brasília, 2016. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/biblioteca/citenel2007/pdf/it34.pdf>.
- [30] LOOF, R. Multistage reactor for thermal gasification of wood. *Energy*, v. 19, n. 4, p. 397–404, 2003.
- [31] LEMOS, M. V. D. Uso Eficiente de Biogás de Esgoto em Motores Geradores. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.
- [32] ALL POWER LABS. Carbon Negative Power & Products: Catálogo. Califórnia, EUA. 20p. Catálogo de produto, 2015.
- [33] MAYA, D. M. Y. et al. Biomass Gasification in downdraft dual stage reactor by experimental analysis and simulation with CDF tools. *European Biomass Conference and Exhibition Proceedings*, v. 2017, n. 25thEUBCE, p. 808–816, 2017.
- [34] VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics - The Finite Volume Method*, 2nd ed. 1996.
- [35] MAYA, D. M. Y. Estudo da gaseificação de biomassa em reator co-corrente de duplo estágio mediante análises experimentais e modelagem com ferramentas de Dinâmica dos Fluidos Computacional. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, p. 23. 2016.