

**JOSÉ MARCELO DE ASSIS WENDLING JÚNIOR**

**Análise de Viabilidades Técnica e Econômica de Sistema Híbrido aplicado  
a Setor Sucroalcooleiro: uso de Biogás de Vinhaça e Energia Fotovoltaica**

**José Marcelo de Assis Wendling Júnior**

**Análise de Viabilidades Técnica e Econômica de Sistema Híbrido aplicado  
a Setor Sucroalcooleiro: uso de Biogás de Vinhaça e Energia Fotovoltaica**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Conselho de Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira  
Coorientador: Prof. Dr. Leonardo Mesquita

Guaratinguetá - SP  
2020

W471a Wendling Júnior, José Marcelo de Assis  
Análise de viabilidades técnica e econômica de sistema híbrido aplicado a setor sucroalcooleiro: uso de biogás de vinhaça e energia fotovoltaica / José Marcelo de Assis Wendling Júnior – Guaratinguetá, 2020.  
83 f : il.  
Bibliografia: f. 76-81

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2020.  
Orientador: Prof. Dr. José Luz Silveira  
Co-Orientador: Prof. Dr. Leonardo Mesquita

1. Biogás. 2. Energia – Fontes alternativas. 3. Motores de combustão interna. I. Título.


CDU 620.91(043)

**JOSÉ MARCELO DE ASSIS WENDLING JÚNIOR**

**ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE  
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”**

**PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA**  
**ÁREA: ENERGIA**

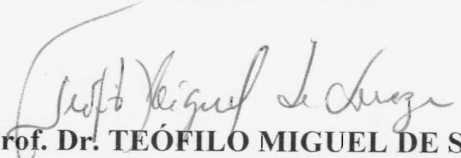
**APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO**

  
**Prof. Dr.ª Ivonete Ávila**  
Coordenadora

**BANCA EXAMINADORA:**



**Prof. Dr. JOSÉ LUZ SILVEIRA**  
Orientador / UNESP/FEG

  
**Prof. Dr. TEÓFILO MIGUEL DE SOUZA**  
UNESP/FEG

  
**Prof. Dr. JOSÉ RUI CAMARGO**  
UNITAU

## **DADOS CURRICULARES**

### **NOME COMPLETO DO AUTOR**

<b>NASCIMENTO</b>	11.04.1988 – Guaratinguetá / SP
<b>FILIAÇÃO</b>	José Marcelo de Assis Wendling Simone Daló Wendling
<b>2003/2005</b>	Técnico em Eletrônica Colégio Técnico Industrial de Guaratinguetá “Prof. Carlos Augusto Patricio Amorim” - UNESP
<b>2008/2016</b>	Bacharel em Engenharia Elétrica Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP

Dedico este trabalho,  
de modo especial, à minha Família e  
aos meus grandes Amigos e Irmãos,  
fontes de apoio sincero na caminhada.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Universo por tudo: sobretudo, por ser quem sou e por chegar onde cheguei. Sei que havia forças que me impulsionavam dia após dia, manifestadas através de minha família e de meus amigos.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Luz Silveira, por acreditar que eu *podia* e por me dar a oportunidade de trabalhar com ele. Grato pela orientação e pela disposição em me ajudar.

Ao meu co-orientador, Prof. Dr. Leonardo Mesquita, por continuar me auxiliando e incentivando, desde minha graduação, em todas as fases do meu desenvolvimento acadêmico; a ele, o meu mais profundo reconhecimento.

A todos que fizeram parte, direta ou indiretamente, de minha jornada: emprestando seus ouvidos e ombros, com seus abraços apertados e com suas mãos fortes, ajudaram-me a me levantar muitas e muitas vezes. A isso se dá o nome de fraternidade, de irmandade.

Por fim, à Universidade, em toda a sua composição: docentes, técnico-administrativos e colegas, por propiciarem a conclusão do que não é somente uma etapa, mas uma grande conquista pessoal.

“Aventurar-se causa ansiedade, mas deixar de arriscar-se é perder a si mesmo... e aventurar-se no sentido mais elevado é, precisamente, tomar consciência de si próprio.”  
Kiergaard



## RESUMO

Neste trabalho, propõe-se efetuar análises técnica, energética e econômica da implantação de dois sistemas de geração de energia, aplicados a uma indústria do setor sucroalcooleiro. Os sistemas são avaliados operando separadamente e em operação conjunta (Sistema Híbrido). Propõe-se um sistema de geração de bioeletricidade, que utiliza motor de combustão interna/gerador elétrico, operando com biogás de vinhaça, e um sistema de geração fotovoltaica de mesma capacidade, para suprir parte da demanda de eletricidade da indústria considerada. Inicialmente, é realizada uma revisão bibliográfica sobre o tema, seguida da caracterização da indústria. Posteriormente, são efetuadas análises energéticas e econômicas, considerando três cenários de produção de energia: geração exclusiva de bioeletricidade, geração exclusiva fotovoltaica e geração simultânea das duas plantas (Sistema Híbrido de Produção de Eletricidade). Da análise energética, foi possível determinar o potencial de geração de eletricidade, baseando-se na disponibilidade de biogás do biorreator e, a partir dos dados gerados por essa análise, construir os Diagramas de Sankey da planta de geração de bioeletricidade e da planta fotovoltaica. Da análise econômica, foram avaliados o custo da produção de eletricidade e a receita anual esperada, em cada um dos cenários propostos, utilizando-se o método de *payback*, considerando taxas anuais de juros e subsídios governamentais (caso fotovoltaico), além do período equivalente de operação dos sistemas. Conclui-se que a geração de bioeletricidade a partir de biogás de vinhaça é energeticamente correta, eficiente e atrativa sob o ponto de vista econômico (2 anos de *payback* considerando 7300 h/ano de operação). No caso de uso de sistema solar, a viabilidade é corroborada quando há incentivo governamental (3 anos com 50 % de incentivo e 8 anos sem o subsídio). No caso de operação em forma de sistema híbrido de geração, a viabilidade econômica se situa em posição intermediária, apresentando valores de *payback* entre 2,2 e 3,5 anos (com e sem subsídio governamental, respectivamente).

**PALAVRAS-CHAVE:** Biogás. Energia Fotovoltaica. Motor de Combustão Interna. Sistema Híbrido. Vinhaça.

## ABSTRACT

In this work, energetic and economic analyzes of two power generation systems applied to a sugar and alcohol industry are presented. The systems are assessed operating separately and in a joint operation (Hybrid System). A bioelectricity generation system is proposed, which uses vinasse biogas fueled internal combustion engine with an electric generator and a photovoltaic generation system of the same capacity for supplying part of the electricity demand of the considered industry. Initially, a bibliographic review on the topic is carried out, followed by the characterization of the industry. Subsequently, energy and economic analyzes are performed considering three energy production scenarios: exclusive generation of bioelectricity, exclusive photovoltaic generation and simultaneous generation of the two plants (Hybrid Electricity Production System). From the energy analysis, it was possible to determine the potential for electricity generation based on the biogas availability of the bioreactor and, from the data generated by this analysis, to prepare the Sankey Diagrams of both the bioelectricity generation plant and the photovoltaic plant. From the economic analysis, the cost of electricity generation and the expected annual revenue were evaluated, in each of the proposed scenarios, using the payback method, considering annual interest rates and government subsidies (photovoltaic case), in addition to the systems equivalent period of operation. It is concluded that the generation of bioelectricity from vinasse biogas is energetically feasible, efficient and attractive from an economic point of view (2 years of payback considering 7300 h / year of operation). In the case of using a solar system, the viability is confirmed when there is a government incentive (3 years payback with 50% incentive and 8 years without the subsidy). In the case of operation in the form of a hybrid generation system, economic viability is in an intermediate position, with payback values ranging from 2.2 to 3.5 years, with and without government subsidy, respectively.

**KEYWORDS:** Biogas. Photovoltaic Power. Internal Combustion Engine. Hybrid System. Vinasse.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fatores técnicos e econômicos a serem avaliados na implantação de GD. ....	19
Figura 2 – Conexão de mini e micro-geradores por tipo de fonte até 23/05/17 .....	20
Figura 3 – Diferenciação de (a) rede elétrica tradicional e de (b) rede elétrica com GD utilizando fontes de energia renovável.....	20
Figura 4 – Processo de produção de vinhaça .....	22
Figura 5 – Utilização da vinhaça de cana-de-açúcar para produção de Bioeletricidade. ....	23
Figura 6 – Histórico da estimativa de produção de vinhaça no Brasil (2009 a 2018). ....	26
Figura 7 – Conceito de GD utilizando FV.....	27
Figura 8 – Localização geográfica Usina Santa Adélia Pioneiros.....	29
Figura 9 – Produções de (a) açúcar, (b) etanol total e (c) energia elétrica do grupo. ....	30
Figura 10 – Gráfico da produção de Etanol Total e Estimado produzido. ....	32
Figura 11 – Formas de geração de energia propostas para o estudo apresentado.....	33
Figura 12 – Esquema simplificado de geração de bioeletricidade utilizando Biodigestor UASB + MCI.....	34
Figura 13 – Etapas da biodigestão anaeróbia.....	36
Figura 14 – Estrutura do biodigestor UASB.....	37
Figura 15 – Funcionamento do Ciclo Otto de 4 tempos em um MCI.....	39
Figura 16 – Ciclo termodinâmico padrão a ar. ....	41
Figura 17 – Resumo do processo de produção de biogás a partir da vinhaça .....	43
Figura 18 – Conjunto gerador Caterpillar CG260-12 .....	45
Figura 19 – Diagrama de Sankey para o sistema de geração de bioeletricidade .....	46
Figura 20 – Diagrama do sistema fotovoltaico proposto. ....	47
Figura 21 – Influência da incidência da radiação solar em painéis fotovoltaicos. ....	48
Figura 22 – Influência da variação da temperatura em painéis fotovoltaicos.....	49
Figura 23 – Diagrama esquemático simplificado de um inversor de frequência monofásico com FV.....	50
Figura 24 – Mapa da incidência de radiação solar.....	51
Figura 25 – Faixa de tensão de operação de inversor de frequência com MPPT. ....	53
Figura 26 – Conexão simplificada de geração fotovoltaica trifásica.....	54
Figura 27 – Inversor de frequência ABB PVS-800-57B-1645KW-C de 6,7MVA. ....	56
Figura 28 – Arranjo possível dos painéis fotovoltaicos para o sistema proposto.....	57
Figura 29 – Diagrama de Sankey para o sistema fotovoltaico.....	58

Figura 30 – Estimativa do custo de investimento do MCI a partir da metodologia Boehm....	60
Figura 31 – Custo da bioeletricidade produzida ao longo dos anos – Cenário 1.....	62
Figura 32 – Receita anual em função do <i>payback</i> do sistema – Cenário 1.....	62
Figura 33 – Variação do custo da bioeletricidade produzida no primeiro ano em relação à flutuação do custo do combustível ( $k = 2$ ). .....	63
Figura 34 – Custo de produção de eletricidade ao longo dos anos em função da variação de taxas de juros e subsídios governamentais – Cenário 2. ....	68
Figura 35 – Receita anual em função do <i>payback</i> , variando taxa de juros e subsídios governamentais – Cenário 2. ....	69
Figura 36 – Gráfico da estimativa de atuação de cada forma de geração do SHPE. ....	70
Figura 37 – Gráfico do custo de produção de eletricidade ao longo dos anos em função da variação de taxas de juros e subsídios governamentais para o SHPE – Cenário 3. ....	72
Figura 38 – Receita anual em função do <i>payback</i> , variando taxa de juros e subsídios governamentais para o SHPE – Cenário 3. ....	73

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Potência, custo de implantação, operação e manutenção e vida útil de diversas formas de geração de energia em um sistema elétrico com GD. ....	18
Tabela 2 – Composição típica do biogás e do biometano.....	24
Tabela 3 – Consolidação da caracterização da vinhaça.....	25
Tabela 4 – Etanol total produzido pelo grupo Usina Santa Adélia e estimado para a unidade Pioneiros.....	32
Tabela 5 – Valores da conversão do biogás gerado pela biodigestão da vinhaça.....	38
Tabela 6 – Comparação entre tecnologias disponíveis para conversão de energia. ....	39
Tabela 7 – Potência nominal e Eficiência Elétrica (100% carga) de geradores Caterpillar. ...	42
Tabela 8 – Especificações do conjunto gerador Caterpillar CG260-12.....	44
Tabela 9 – Painéis fotovoltaicos comerciais.....	52
Tabela 10 – Parâmetros utilizados para análise econômica de geração de bioeletricidade. ....	61
Tabela 11 – Determinação de $n_{tec}$ no sistema fotovoltaico.....	66
Tabela 12 – Parâmetros utilizados para análise econômica de geração fotovoltaica. ....	67

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABB	Empresa Asea Brown Boveri
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	Tensão Alternada
CC	Tensão Contínua
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CTC	Centro de Tecnologia Canavieira
DQO	Demanda Química de Oxigênio
FV	Sistema Fotovoltaico
GD	Geração Distribuída
IEA	<i>International Energy Agency</i>
MCI	Conjunto Motor de Combustão Interna mais Gerador
MPPT	<i>Maximum Power Point Tracker</i>
PCI	Poder Calorífico Inferior
PLL	<i>Phase-Locked Loop</i>
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
SHPE	Sistema Híbrido de Produção de Eletricidade
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket Digestion</i>
UNICA	União da Indústria de Cana-de-açúcar
VA	Válvula de Admissão
VE	Válvula de Escape

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Unidade</b>
$A_T$	Área total dos painéis fotovoltaicos	$m^2$
$C$	Estimativa de custo de implantação do conjunto gerador especificado	US\$
$C_b$	Custo do sistema de armazenamento FV	US\$
$c_{comb}$	Custo de combustível	US\$/kWh
$C_d$	Custo de aquisição e instalação de componentes periféricos do sistema FV	US\$
$c_{ele}$	Tarifa de eletricidade da rede	US\$/kWh
$c_{elFV}$	Custo de produção de eletricidade fotovoltaica	US\$/kWh
$c_{elMCI}$	Custo do produção de bioeletricidade	US\$/kWh
$c_{elSHPE}$	Custo de eletricidade produzida pelo SHPE	US\$/kWh
$C_{FV}$	Custo de cada painel fotovoltaico	US\$
$c_{manFV}$	Custo de manutenção da planta	US\$/kW
$c_{mMCI}$	Custo de manutenção do conjunto MCI	US\$/kWh
$c_{opFV}$	Custo de operação da planta fotovoltaica	US\$/kW
$C_R$	Custo de referência de conjunto MCI	US\$
$E_{comb}$	Potência energética suprida pelo combustível	kW
$E_{eFV}$	Eletricidade produzida pelo painel fotovoltaico	W
$E_{ge}$	Potência térmica dos gases de exaustão	kW
$E_{jaq}$	Potência térmica transferida para a jaqueta para arrefecimento do motor	kW
$E_{jg}$	Potência térmica transferida para a jaqueta para arrefecimento do motor e dos gases de exaustão	kW
$E_{op}$	Energia necessária para operação	Wh
$E_{pFV}$	Energia anual produzida pelo sistema fotovoltaico	kWh/ano
$E_{pFVm}$	Energia mensal produzida pelo sistema fotovoltaico	kWh/mês
$E_{pMCI}$	Eletricidade produzida pelo conjunto MCI mais gerador	kW
$E_{pPrática}$	Eletricidade prática produzida pelo conjunto gerador	kW
$E_{pTeórica}$	Eletricidade teórica produzida pelo conjunto gerador	kW
$E_{solar}$	Eletricidade disponível pela irradiação solar incidente total	W
$f$	Fator de anuidade	1/ano

$G_{STC}$	Irradiância nas condições de teste padrão	$W/m^2$
$H$	Período equivalente de utilização do conjunto MCI	horas/ano
$h_{ar}$	Entalpia do ar de combustão	$kJ/kg$
$h_{op}$	Horas de operação da carga	h
$H_{TOT}$	Incidência de irradiação total solar local	$Wh/m^2$
$i$	Taxa anual de juros	%
$I_{plFV}$	Investimento na planta fotovoltaica	US\$
$I_{plMCI}$	Investimento no conjunto motor/gerador	US\$
$k$	Período de retorno de investimento	ano
$m$	Fator de correção no método Boehm	-
$m_{ar}$	Vazão mássica de ar de combustão	$kg/s$
$m_{comb}$	Vazão mássica de combustível	$kg/s$
$N_{FV}$	Número de painéis fotovoltaicos	-
$n_{tec}$	Número de técnicos necessários para a operação do sistema FV	-
$n_w$	Número de meses de trabalho dos técnicos do sistema FV	-
$PCI_{comb}$	Poder calorífico inferior do combustível	$kJ/kg$
$P_{dem}$	Potência demandada para operação	$kW$
Perdas	Perdas energéticas incluindo perdas da parede externa por radiação e convecção	$kW$
$perdas_{prim}$	Perdas no processo de conversão de energia solar para energia elétrica	$W$
$perdas_{sec}$	Perdas no processo de conversão e transmissão de energia	$W$
$P_{FV}$	Potência instalada no sistema fotovoltaico	$W_p$
$P_{painel}$	Potência elétrica nominal de pico do painel fotovoltaico	$W_p$
$R_{FV}$	Receita anual de eletricidade produzida com o sistema FV	US\$
$R_{MCI}$	Receita anual de eletricidade produzida pelo conjunto MCI	US\$
$R_{SHPE}$	Receita anual de eletricidade produzida pelo SHPE	US\$
$S$	Potência nominal de um conjunto MCI	$kW$
$S_{al}$	Salário mensal dos técnicos do sistema FV	US\$/mês
$S_R$	Potência nominal conjunto MCI de referência	$kW$
$S_{ub}$	Subsídio governamental para a planta FV	US\$
TD	Taxa de desempenho do sistema fotovoltaico	%
$\eta_{el}$	Rendimento elétrico do conjunto gerador	%
$\eta_{FV}$	Rendimento do painel fotovoltaico	%



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
1.1	OBJETIVOS .....	16
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	17
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	18
2.1	GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE A PARTIR DA VINHAÇA.....	21
2.2	GERAÇÃO FOTOVOLTAICA .....	26
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA TÍPICA</b> .....	29
<b>4</b>	<b>SISTEMA HÍBRIDO DE PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE – SHPE</b> .....	34
4.1	SISTEMA DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE.....	34
4.1.1	<b>Biodigestor Anaeróbio UASB</b> .....	35
4.1.2	<b>Motor de Combustão Interna – MCI</b> .....	38
4.1.3	<b>Gerador de Eletricidade</b> .....	41
4.1.4	<b>Potencial de produção de energia elétrica com biogás de vinhaça</b> .....	42
4.1.5	<b>Balanco energético do sistema de geração de bioeletricidade</b> .....	45
4.2	SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICO.....	47
4.2.1	<b>Controlador de Carga e Inversor de Frequência</b> .....	47
4.2.2	<b>Especificação da planta fotovoltaica</b> .....	50
4.2.3	<b>Balanco energético do sistema fotovoltaico</b> .....	57
<b>5</b>	<b>ANÁLISE ECONÔMICA</b> .....	59
5.1	ANÁLISE ECONÔMICA PARA GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE – CENÁRIO 1 .....	59
5.2	ANÁLISE ECONÔMICA PARA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA – CENÁRIO 2 .....	64
5.3	ANÁLISE ECONÔMICA PARA GERAÇÃO HÍBRIDA – CENÁRIO 3 .....	70
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	74
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	76

# 1 INTRODUÇÃO

Com o aumento da preocupação com a crise energética, soluções para o aumento da oferta de energia disponível e diversificação de sua matriz foram desenvolvidas. Dentre elas, a geração de bioeletricidade a partir da queima de biogás e de eletricidade a partir de painéis fotovoltaicos conectados à rede elétrica, dando origem ao conceito denominado Geração Distribuída – GD.

A partir desse processo, caracteriza-se o consumidor-gerador de energia, em que as unidades geradoras estão próximas das cargas, diminuindo as perdas de potência, melhorando a capacidade de energia disponível na rede e diminuindo as emissões de CO<sub>2</sub> (PATRAO et al., 2015). Esse sistema é usado principalmente no suprimento de consumidores residenciais e comerciais, injetando os eventuais excedentes da geração na própria rede (DE FARIA et al., 2017), que atua, nesse caso, como elemento armazenador da energia excedente gerada.

O presente trabalho apresenta um estudo da implantação de um sistema de geração de bioeletricidade a partir da queima do biogás de vinhaça e de um sistema fotovoltaico, operando separados e em conjunto, objetivando à geração de energia para parte da operação de uma indústria do setor sucroalcooleiro. Esse estudo realiza a análise técnica, energética e econômica desses sistemas operando em três cenários possíveis: (1) geração exclusiva a partir do biogás de vinhaça, (2) geração exclusiva a partir dos painéis fotovoltaicos e, por fim, (3) a geração combinada dessas duas formas de geração.

## 1.1 OBJETIVOS

O trabalho proposto visa aos seguintes objetivos:

1. Realizar um estudo do potencial de geração de energia a partir do biogás de vinhaça de uma indústria do setor sucroalcooleiro do Estado de São Paulo;
2. Apresentar um estudo de implantação de geradores fotovoltaicos, com mesmo potencial de geração, para parte da operação da Usina;
3. Executar as análises energéticas e econômicas da implantação da geração, visando a avaliar sua aplicabilidade em indústrias do setor sucroalcooleiro, em três cenários:
  - a. Cenário 1: geração exclusiva a partir do biogás de vinhaça;
  - b. Cenário 2: geração exclusiva fotovoltaica; e
  - c. Cenário 3: geração a partir de sistema híbrido de geração.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 realiza uma breve introdução ao tema proposto, apresenta os objetivos do trabalho e sua estrutura.

O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica, com os principais dados referentes à Geração Distribuída, à geração de bioeletricidade a partir do biogás de vinhaça e à geração fotovoltaica.

O Capítulo 3 faz a caracterização da usina utilizada como caso de estudo do trabalho, como base para realização dos cálculos propostos, com seus principais dados de produção e consumo de energia.

O Capítulo 4 disserta sobre o Sistema Híbrido de Produção de Eletricidade – SHPE, apresentando especificações, análises energéticas e cálculos de potencial de geração de energia para os três cenários propostos.

O Capítulo 5 apresenta a análise econômica dos três cenários propostos para o SHPE, identificando e especificando custos de produção de eletricidade, investimento, manutenção e rentabilidade dos sistemas com a produção ao longo dos anos;

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho e as propostas de trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Muitos locais no mundo estão implementando sistemas de GD para a produção de eletricidade a partir de fontes diversas. Entretanto, é primordial verificar que muitos fatores podem influenciar a adoção de sistemas de GD. Dentre esses fatores, incluem-se políticas governamentais em níveis local, estadual e federal, além dos custos do projeto, que podem variar, dado o tempo, a localização, o tamanho e os tipos de aplicação (JO et al.,2016).

A Tabela 1 sintetiza algumas formas de geração de energia, assim como suas principais características, como faixa de potência, estimativa do custo de implantação, operação e manutenção e vida útil, segundo Patrao et al. (2015).

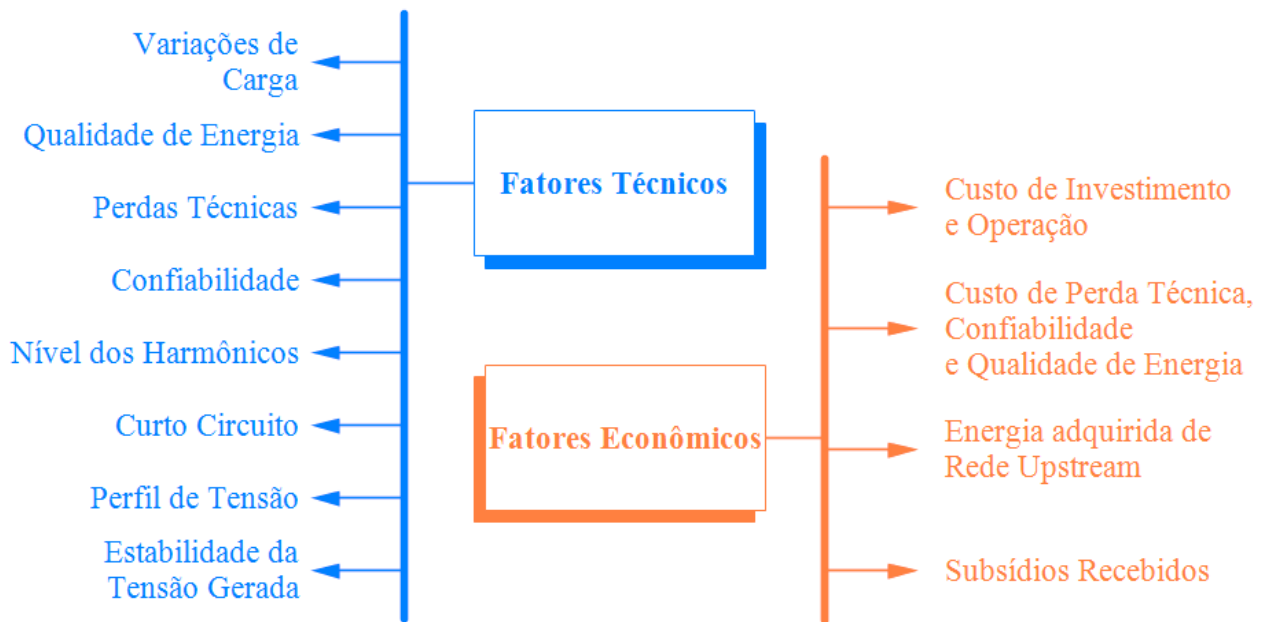
Tabela 1 – Potência, custo de implantação, operação e manutenção e vida útil de diversas formas de geração de energia em um sistema elétrico com GD.

	Potência (kW)	Custo (US\$/kW)	Custo de Operação e Manutenção	Vida útil (anos)
Gerador a Diesel	5 – 500	700	26,5 US\$/kW/ano + 0,000033US\$/kWh	12,5
Gerador a Gás Natural	50 – 500	950	26,5 US\$/kW/ano + 0,000033US\$/kWh	12,5
Gerador Eólico	10	6055	5,7 US\$/kW/ano	12,5
Pequenos Geradores Fotovoltaicos	5	8650	14,3 US\$/kW/ano	20
Grandes Geradores Fotovoltaicos	50 – 500	6675	3,93 US\$/kW/ano	20
Células de Comb.	1 – 2000	5000	0,035 US\$/kW/ano	5 – 10

Fonte: Adaptado de Patrao et al. (2015).

Os sistemas que utilizam GD, conforme Chakraborty et al. (2015), desempenharão um papel vital no futuro: visando à melhora da qualidade da vida humana e sua integração à rede elétrica local, além de fornecerem alternativas econômicas – como o fluxo de potência bidirecional – fornecem também um *backup* para apoio durante a falha da rede ou *blackouts*. Entretanto, para sua implantação, devem ser considerados fatores técnicos e econômicos, que são sintetizados na Figura 1, para que as análises possam ser realizadas e o sistema planejado, mantendo a qualidade da energia e a viabilidade de implantação (SADEGHI; KALANTAR, 2015).

Figura 1 – Fatores técnicos e econômicos a serem avaliados na implantação de GD.

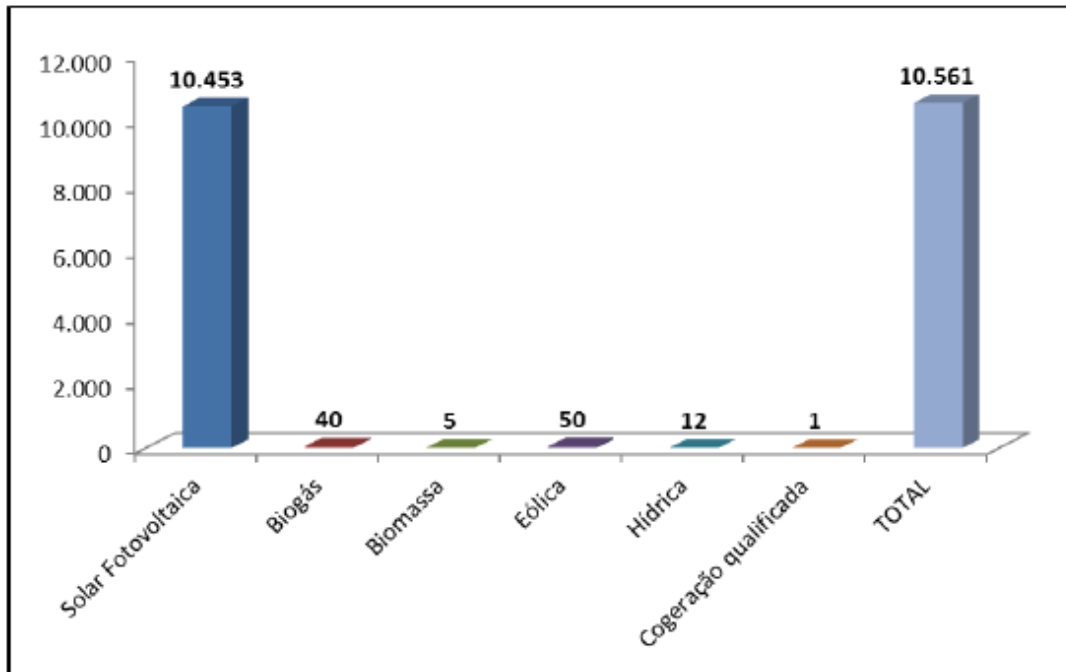


Fonte: Adaptado de Sadeghi; Kalantar (2015).

Segundo AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL (2012), quando se trata de instalação de sistemas de GD utilizando micro (abaixo de 75kW) e mini-geradores (entre 75kW e 5MW), considerando consumidores residenciais ou comerciais, a geração de energia fotovoltaica é predominante, seguida da geração eólica e, em terceiro lugar, por biogás, apontando ser esse um mercado ainda em exploração.

A Figura 2 apresenta, segundo a AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL (2017), o número de conexões de micro e mini-geradores por tipo de fonte, até 23 de maio de 2017. Nela, pode-se observar a predominância da geração fotovoltaica, com o biogás em terceiro lugar.

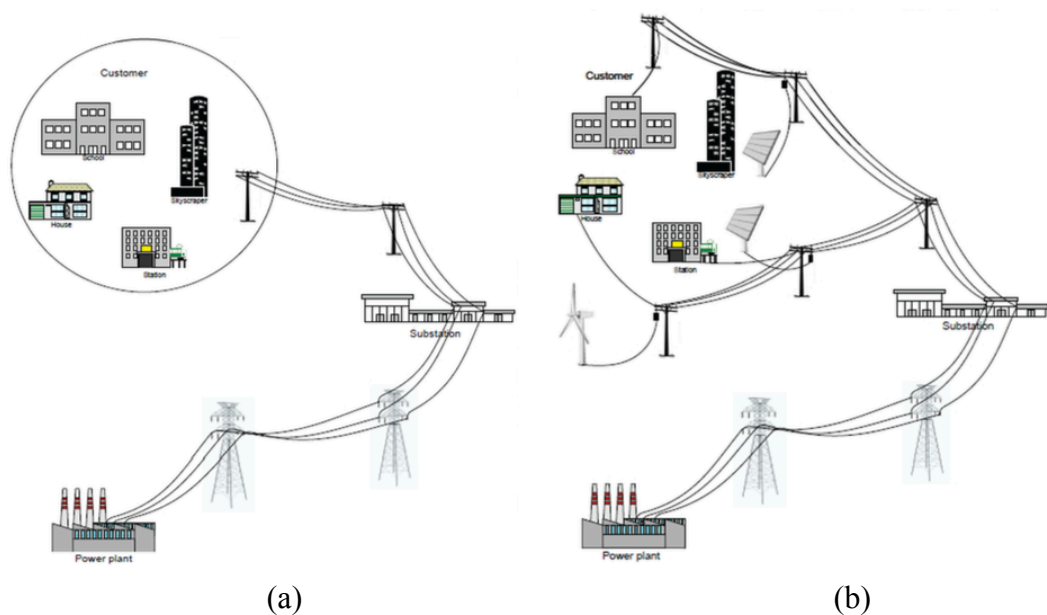
Figura 2 – Conexão de mini e micro-geradores por tipo de fonte até 23/05/17



Fonte: AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL (2017).

A Figura 3 apresenta um diagrama geral (a) de uma rede elétrica tradicional versus (b) uma rede elétrica com GD, que utiliza fontes de energia renovável, no caso, fotovoltaica e eólica, em que se pode observar a busca da maior proximidade entre as unidades geradoras e as consumidoras.

Figura 3 – Diferenciação de (a) rede elétrica tradicional e de (b) rede elétrica com GD utilizando fontes de energia renovável.



Fonte: Chen; Hu (2015).

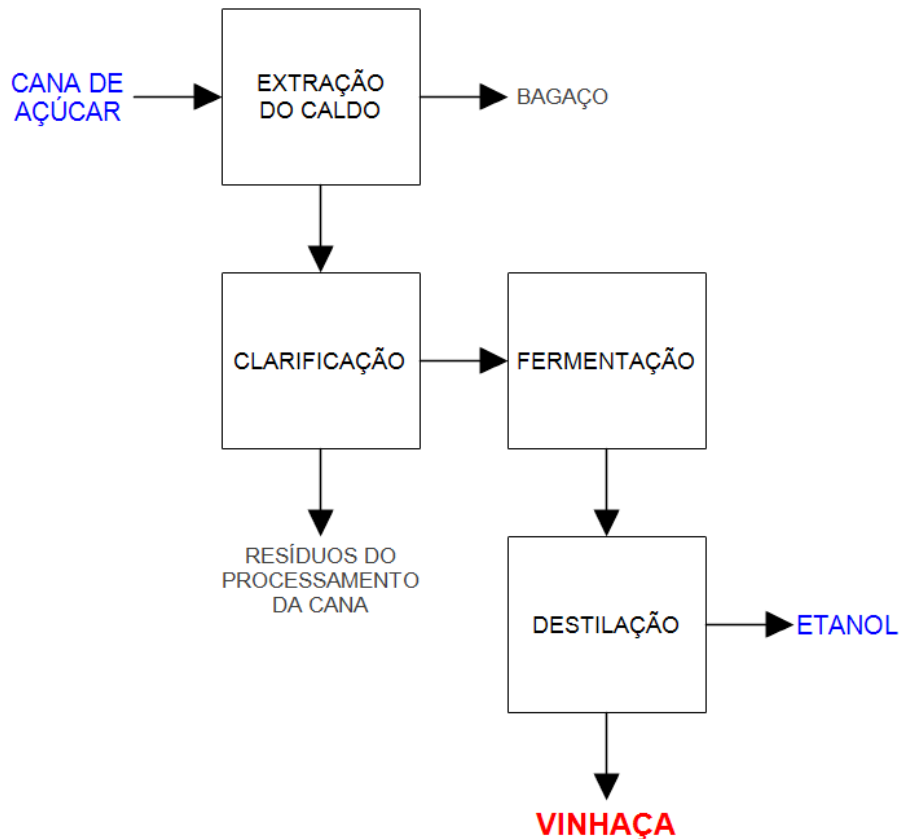
A seguir, são apresentadas mais informações sobre a geração de energia a partir de sistemas que operam com biogás de vinhaça e painéis fotovoltaicos, foco do trabalho proposto.

## 2.1 GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE A PARTIR DA VINHAÇA

A vinhaça, subproduto da produção de etanol, é comumente empregada no setor agrícola como fertilizante, principalmente nos cultivos de cana-de-açúcar (NOGUEIRA; GARCIA, 2013). Porém, segundo um estudo do Estado da Arte da Vinhaça, publicado pela União da Indústria de Cana-de-Açúcar – UNICA (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2016), a sua biodigestão via anaeróbica é, além de um sistema de tratamento para esse resíduo, um processo que visa a obter uma energia extra pela utilização do biogás gerado, rico em metano, para ser utilizado em conjunto com o motor de combustão interna, doravante chamado de conjunto MCI.

Pode-se estimar – segundo dados apresentados por União da Indústria de Cana-de-Açúcar (2016), Mariano et al. (2015) e Rodrigues et al. (2012) – que 1 m<sup>3</sup> de etanol produz cerca de 12 m<sup>3</sup> de vinhaça. Além disso, para cada 1 m<sup>3</sup> de vinhaça, há o potencial de produção de 7,4 m<sup>3</sup> de biogás (com teor de metano de cerca de 60%), o que seria suficiente para acionar um conjunto MCI e produzir energia elétrica suficiente para o consumo mensal de 1,4 residência pequena, cerca de 207 kWh. Salienta-se que as propriedades do biogás produzido dependem de aspectos como a variedade e a maturidade da cana-de-açúcar utilizada no processo (PARSAEE et al., 2019). O processo de produção da vinhaça, segundo Parsaee et al. (2019), é apresentado na Figura 4.

Figura 4 – Processo de produção de vinhaça.



Fonte: Adaptado de Parsaee et al. (2019).

Dados recentes apresentam que, na região Centro-Sul do Brasil, onde está concentrada a maior parte da produção sucroalcooleira, o processamento de cerca de 607,14 milhões de toneladas de cana-de-açúcar gerou 25,65 bilhões de litros de etanol, na Safra 2016/2017 (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2017a). Dentro desses números pode-se estimar uma produção de 307,8 bilhões de litros de vinhaça, com potencial de geração de cerca de 5,31 TWh.

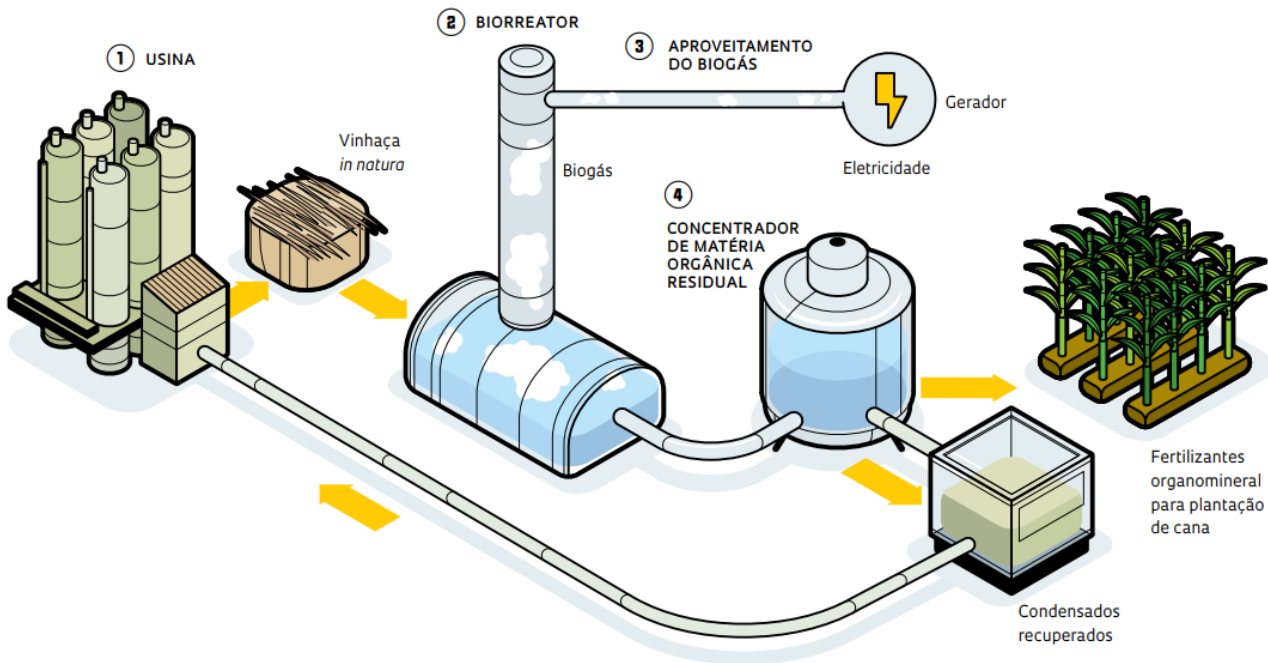
Segundo uma pesquisa da Empresa de Pesquisa Energética – EPE –, dentro um total de 370 usinas sucroalcooleiras em 2016, apenas 175 unidades exportam excedentes de bioeletricidade para a rede elétrica. Ou seja, há bastante potencial a ser explorado, com o processo de *retrofit* nas 195 unidades restantes, a fim de aproveitar os subprodutos da cana, como bagaço, palha e vinhaça, atuando, também, como unidades geradoras para o sistema elétrico (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2017b).

A Figura 5 ilustra o processo de aproveitamento da vinhaça de cana-de-açúcar no processo de geração de Bioeletricidade, no qual a vinhaça passa por um biorreator, para que seja convertida em biogás a partir do processo de biodigestão anaeróbia (descrito



posteriormente) e possa ser aproveitada para a geração de energia. Já a matéria orgânica do biorreator (biodigestor) ainda pode ser aproveitada como fertilizantes.

Figura 5 – Utilização da vinhaça de cana-de-açúcar para produção de Bioeletricidade.



Fonte: Adaptado de FAPESP - FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO (2015).

A digestão anaeróbica da vinhaça, segundo Mariano et al. (2015), é feita em reatores de alto desempenho e baixo tempo de retenção, como os biodigestores do tipo Fluxo Ascendente e de Manta de Lodo, também conhecidos como UASB – do inglês, *upflow anaerobic sludge blanket digestion*. Do processo resultam, principalmente, dióxido de carbono, gás metano e água. Dependendo do teor do metano, pode-se possuir um poder calorífico inferior (PCI) na ordem de 20,9 a 25,1 MJ/m<sup>3</sup> que, podendo ser queimado, passa a ser classificado como gás combustível.

Para garantir a viabilidade do uso do biogás, processos de filtragem devem ser executados, a fim de remover umidade, dióxido de carbono, gás sulfídrico, entre outros contaminantes, fazendo com que o biogás seja muito similar ao gás natural convencional, principalmente no que diz respeito ao PCI. Após passar por esse processo, pode ser chamado de biometano (MARIANO et al., 2015). A Tabela 2 apresenta a composição típica do biogás e do biometano.

Tabela 2 – Composição típica do biogás e do biometano.

Parâmetro	Biogás	Biometano
CH <sub>4</sub> (% v/v)	55 – 65	90 – 95
CO <sub>2</sub> (% v/v)	35 – 45	4
H <sub>2</sub> (% v/v)	0 – 0,02	0 – 0,06
N <sub>2</sub> (% v/v)	<2	<3
H <sub>2</sub> S (ppmv)	20 – 20.000	<20
Amônia (ppmv)	<500	<20
H <sub>2</sub> O (% v/v)	<5	0

Fonte: Mariano et al. (2015).

Pode-se considerar que, após passar pelo processo de biodigestão, a vinhaça, produzida a partir de uma tonelada de cana, apresenta 7,2kg de metano, com PCI de 23 MJ/kg, obtendo-se um total de cerca de 100 kWh.t<sup>-1</sup> de cana (SILVIA et al, 2010; MARIANO et al, 2015; BALDACIN; PINTO, 2015).

Segundo Silvia et al. (2010), a eficiência do sistema de geração de energia depende da tecnologia utilizada na conversão do biogás, em que são consideradas, basicamente, três tecnologias: turbinas a gás, microturbinas e motores de ciclo Otto.

Essencialmente, a conversão de energia se dá a partir da combustão controlada do biogás. Essa combustão faz com que a energia química seja convertida em mecânica, que por sua vez ativa um alternador que a converte em energia elétrica. São mais comumente utilizadas, para esse tipo de conversão, as microturbinas a gás e os motores de combustão interna do tipo Ciclo-Otto (SILVIA et al, 2010).

A Tabela 3 apresenta uma caracterização consolidada da vinhaça, segundo a União da Indústria de Cana-de-açúcar (2016), com base em trabalhos desenvolvidos pelo CTC – antigo Centro de Tecnologia Coopersucar e, atualmente, Centro de Tecnologia Canavieira – e pela CETESB:

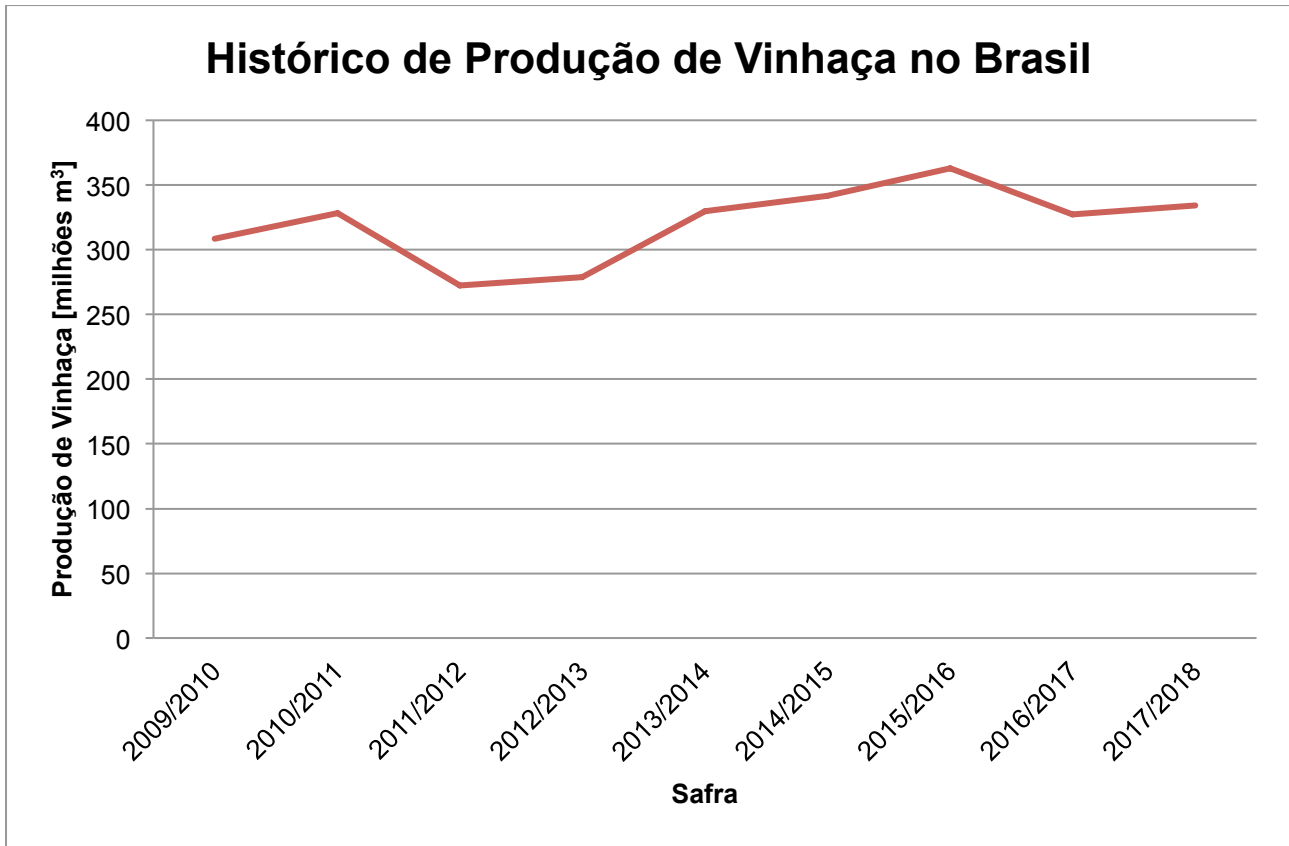
Tabela 3 – Consolidação da caracterização da vinhaça.

Parâmetros	CTC		CETESB, 1982		Composição Final	
	1995	2008	Caldo	Mista	Média	Faixa
pH	4,15	4,8	3,7 – 4,6	4,4 – 4,6	4,3	3,5 – 4,9
Temperatura (°C)	89		80 – 100	80 – 100	90	65 – 110,5
DBO <sub>5</sub> (mg/L O <sub>2</sub> )	16.950	11.331	6.000 – 16.500	19.800	14.833	5.879 – 75.330
DQO (mg/L O <sub>2</sub> )	28.450	31.505	15.000 – 33.000	45.000	23.801	9.200 – 97.400
DQO/DBO <sub>5</sub>	1,7	2,8	2,5 – 2,0	2,1	1,6	1,6 – 2,8
ST (mg/L)	22.386,9	29.596	23.700	52.700	32.788	10.780 – 56.780
SVT (mg/L)	10.211,74	21.905,4	20.000	40.000	23.030	628 – 45.225
SFT (mg/L)	18.420,06	24.520,4	3.700	12.700	14.835	1.509 – 45.630
Nitrogênio (mg/L N)	357	353	150 – 700	480 – 710	433	81 – 1.215
Fósforo (mg/L P)	60,41	32,0	2,1 – 44,1	1,89 – 42	34	2,1 – 188
Potássio (mg/L K)	2.035	2.667	991 – 1.735	2.759	2.206	814 – 7.612
Cálcio (mg/L Ca)	286,2	479,5	72,2 – 854,7	738,2 – 2.536,4	832	39,4 – 1.451,2
Magnésio (mg/L Mg)	135,4	321	120 – 294	348 – 420	262	97 – 1.112,9
Sulfato (mg/L S)	1.538	861	200 – 253	1.233 – 1.243	965	92 – 1.243

Fonte: União da Indústria de Cana-de-açúcar (2016).

Dada a grande produção de etanol e, assim sendo, de vinhaça, é necessário que sejam feitas análises de formas alternativas de utilização desse subproduto. A Figura 6 apresenta o histórico de produção de vinhaça no Brasil, baseado na produção de etanol entre 2009 e 2018.

Figura 6 – Histórico da estimativa de produção de vinhaça no Brasil (2009 a 2018).



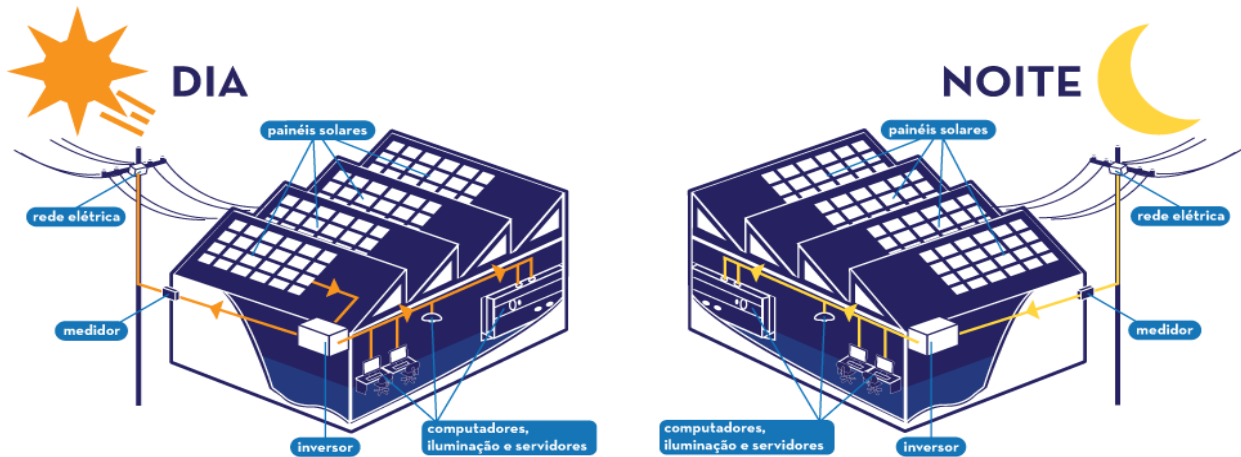
Fonte: Adaptado de Agrolink (2018).

## 2.2 GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

A geração a partir de sistemas fotovoltaicos – FV – representa uma das formas de micro-geração mais utilizadas na integração de GD em sistemas de distribuição (WU et al., 2017) que buscam, cada vez mais, integrar fontes de energias renováveis no sistema. Afinal, esse tipo de produção de eletricidade faz parte do conjunto de estratégias destinadas para reduzir a emissão de gases de efeito estufa, buscando a obtenção de um fornecimento sustentável de energia (DE FARIA et al., 2017).

A Figura 7 apresenta o conceito de geração de energia FV, em que a energia gerada durante o dia alimenta as cargas do sistema e o excedente é enviado à rede elétrica e, no período noturno, a energia enviada para o Sistema Elétrico, como excedente gerado durante o dia, é utilizado, diminuindo o consumo da energia da distribuidora de energia

Figura 7 – Conceito de GD utilizando FV.



Fonte: Solstício Energia (2017).

Segundo Grossmann et al. (2015), entre 1976 e 2013, a capacidade mundial de geração de energia a partir de painéis fotovoltaicos dobrou a cada dois anos e, em cada duplicação, os custos diminuíram cerca de 20%, fazendo com que essa forma de geração alcançasse competitividade em vários locais do mundo e que fosse, essa tecnologia, a que possui a maior taxa de desenvolvimento na atualidade.

Segundo Hongxia et al. (2017), a indústria de sistemas fotovoltaicos ainda tem uma série de problemas para seu desenvolvimento, que vão desde políticas públicas de incentivo até dificuldades tecnológicas. Dentre esses problemas, estão o custo de produção do sistema de geração de energia, a eficiência de conversão dos inversores, a grande flutuação da tensão da rede pela conexão do sistema, dentre outros fatores.

Várias técnicas de controle têm contribuído com o desenvolvimento desse cenário. Algumas delas utilizando PLL – *phase-locked loop*, para que o sincronismo com a rede elétrica seja rapidamente atingido (LUNA et al., 2015). E considerando que a quota de energias renováveis deverá atingir 20% da matriz de geração de energia em 2030, as restrições de operação de plantas sob as condições de falha de fornecimento do sistema elétrico ganharam uma importância especial. A partir disso, o entendimento dos métodos de controle, para que os níveis de tensão na rede sejam mantidos e para que não haja curto-circuitos, se tornou essencial (LUNA et al., 2015).

Ao se utilizar geração fotovoltaica, faz-se necessário, segundo Guerrero-Rodríguez et al. (2015), o controle do fluxo de energia entre as fontes de energia renovável e a principal, assim como seu fator de potência. Atualmente, a intensa utilização desses sistemas conectados à rede elétrica por meio de inversores eletrônicos, contribui para o desempenho de diversas

funções de controle do sistema de energia. Nesse contexto, Leite et al. (2016) indicam que um fator-chave para que seja permitida a integração em grande escala desses sistemas é a existência de uma infraestrutura de comunicação flexível.

Como vantagem da utilização de FV, do ponto de vista de qualidade de energia, segundo Silva et al. (2016), é que pode haver um aumento de 31% nos índices de conformidade de tensão e um aumento na vida útil dos reguladores, visto que há uma diminuição de 20% no número de mudanças de *tap* neles.

Em 2050, segundo a *International Energy Agency* – IEA (IEA, 2010), a geração fotovoltaica deve representar 11% de toda a eletricidade global. Países como a China e Japão despontam como vanguardas na capacidade instalada de geração fotovoltaica, segundo Chen; Song (2017), e demonstram que subsídios são essenciais para acelerar a implementação da GD utilizando esses sistemas. Isso é apontado como forma promissora de geração de energia para a redução de emissão de CO<sub>2</sub>, representando um rápido progresso, do ponto de vista da sustentabilidade.

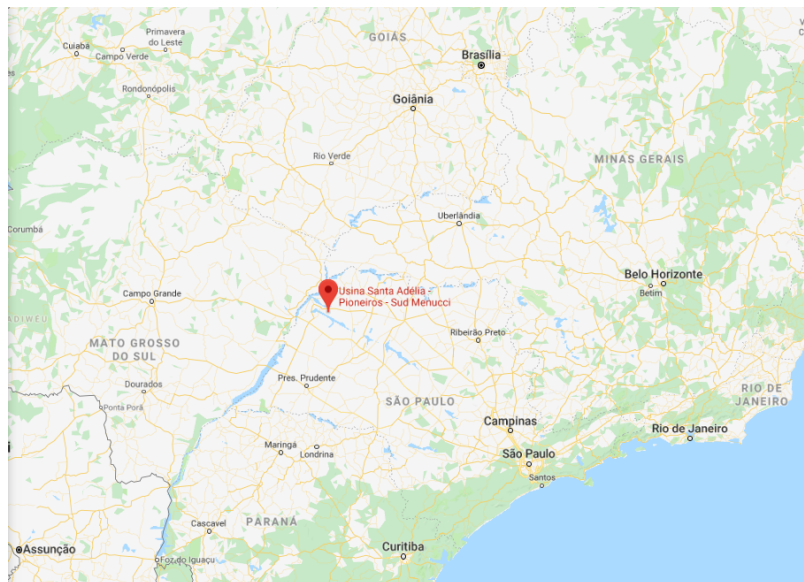
É indubitável que as políticas públicas devam melhorar o nível de preferência do investidor, a fim de alcançar menores custos de subsídio. Uma das sugestões, propostas por Chen; Song (2017), é a da conscientização do investidor através da educação, da transparência política no que diz respeito aos subsídios e à ampla divulgação das vantagens econômicas e ambientais da GD utilizando energia fotovoltaica.

Por fim, Camilo et al. (2017) apresenta boas práticas de apoio e desenvolvimento de pesquisas na área, de forma a apoiar os gestores políticos no seu dever de promover acessibilidade à energia renovável. Dentre essas práticas, está o menor custo para suas nações, bem como o fomento de um forte mercado, buscando o incentivo da produção dos componentes dos sistemas fotovoltaicos, a fim de quebrar a dependência da importação de materiais/tecnologias e desenvolver, em seu próprio mercado, todo um ciclo de produção, em concordância com uma contínua queda global do custo desses sistemas.

### 3 CARACTERIZAÇÃO DA INDÚSTRIA TÍPICA

Para execução do estudo de caso, foram utilizados os dados da Usina Santa Adélia Pioneiros, situada na cidade de Sud Mennucci – região de Araçatuba, na parte noroeste do Estado de São Paulo. Uma das três usinas integrantes do grupo Santa Adélia atualmente utiliza 100% do bagaço da cana-de-açúcar na geração de energia elétrica (USINA SANTA ADÉLIA, 2019). A Figura 8 apresenta a localização geográfica da Usina Santa Adélia Pioneiros, em (a) representação plana e em (b) representação espacial.

Figura 8 – Localização geográfica Usina Santa Adélia Pioneiros.



(a)



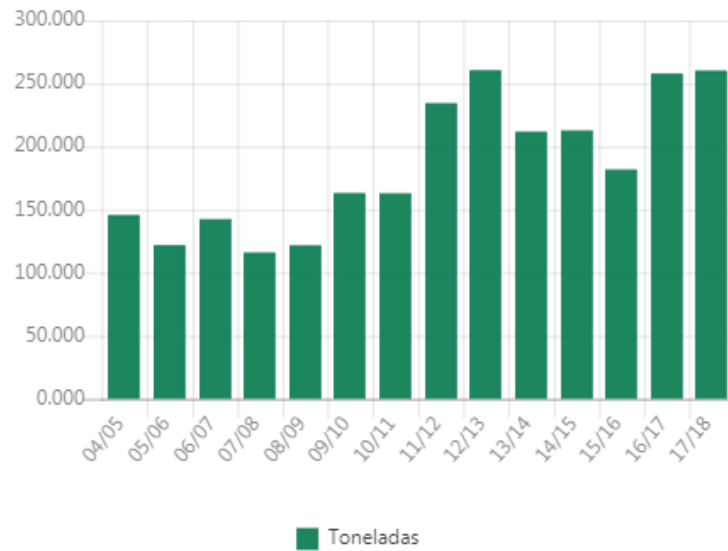
(b)

Fonte: GoogleMaps (2019).

A Figura 9 apresenta o histórico de produção de (a) açúcar, (b) etanol total – hidratado e anidro, e (c) energia elétrica do grupo Santa Adélia – a partir do bagaço de cana-de-açúcar, ao longo das últimas 14 safras:

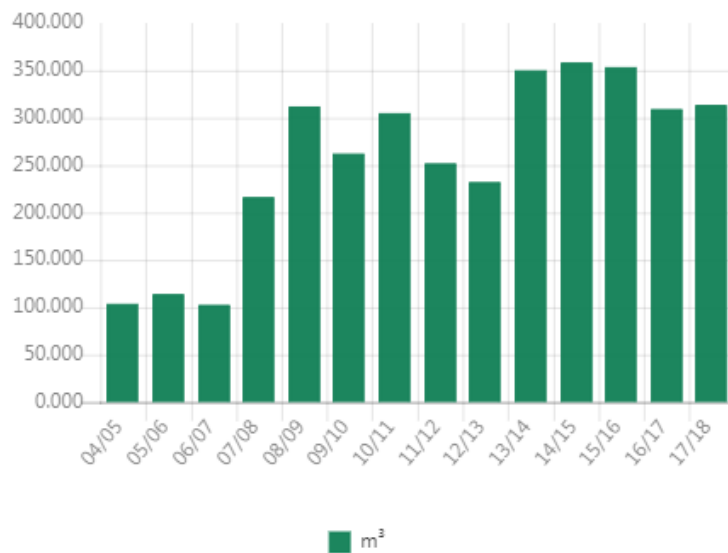
Figura 9 – Produções de (a) açúcar, (b) etanol total e (c) energia elétrica do grupo.

### Produção de Açúcar



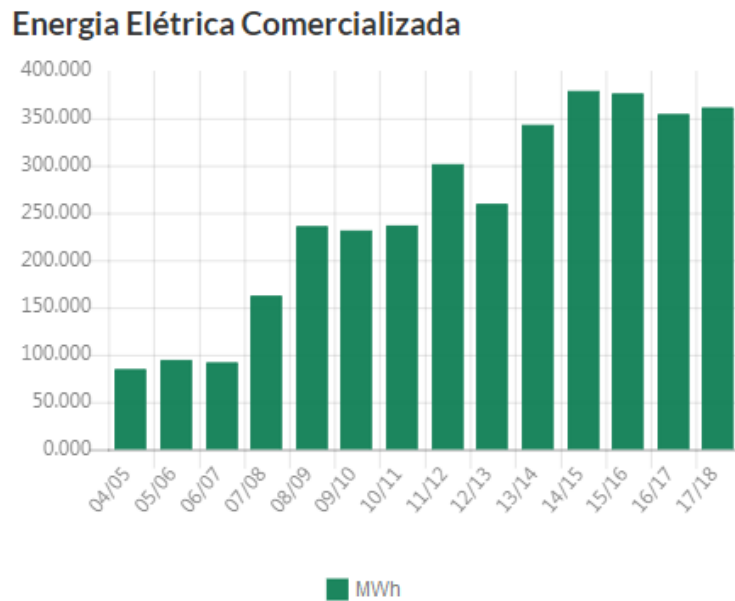
(a)

### Produção de Etanol Total



(b)





(c)

Fonte: Usina Santa Adélia (2019).

Segundo Vane (2012), a potência elétrica produzida pelo turbogerador da usina Santa Adélia Pioneiros (caso estudado) é de 19,15 MW, sendo 7,60 MW a demanda para sua operação e 11,55 MW o excedente de energia produzida e comercializada.

Normalmente, usinas tradicionais utilizam o bagaço, com alto teor de umidade, e a palha da cana-de-açúcar como combustíveis de caldeiras de baixa pressão, para gerar vapor e energia, com intuito de fornecimento de calor, eletricidade e energia mecânica para a planta (MACHIN, 2015).

A fim de avaliar o potencial de geração de energia elétrica da usina Santa Adélia Pioneiros, com estimativas realizadas a partir da divulgação de dados da empresa antes de sua incorporação pelo grupo (GLOBO RURAL, 2011), ocorrida em 2011, segundo Usina Santa Adélia (2019), considera-se que a referida unidade é responsável por de 27,28% da produção total do grupo.

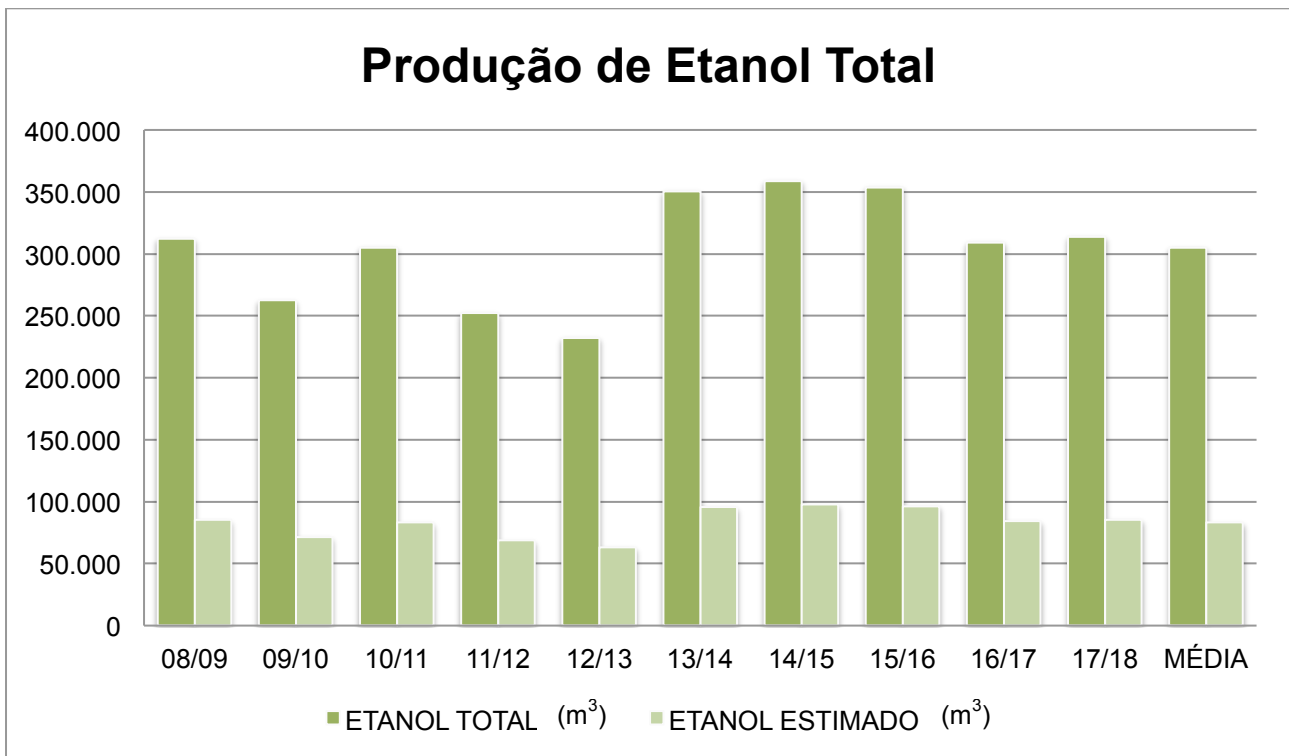
A Tabela 4 apresenta a produção de Etanol total das 10 últimas safras do grupo, a estimativa de produção da unidade Pioneiros e as médias de produção dessas safras, para posterior uso no cálculo de potencial de geração de energia. Já a Figura 10 apresenta um gráfico referente a essa produção.

Tabela 4 – Etanol total produzido pelo grupo Usina Santa Adélia e estimado para a unidade

Pioneiros		
Safra	Etanol Total (m <sup>3</sup> )	Etanol Estimado (m <sup>3</sup> )
08/09	312.045	85.125,88
09/10	262.347	71.568,26
10/11	304.995	83.202,64
11/12	252.028	68.753,24
12/13	232.296	63.370,35
13/14	350.211	95.537,56
14/15	358.473	97.791,43
15/16	353.554	96.449,53
16/17	309.303	84.377,86
17/18	313.685	85.573,27
Média	304.894	83.175,00

Fonte: Produção do próprio autor.

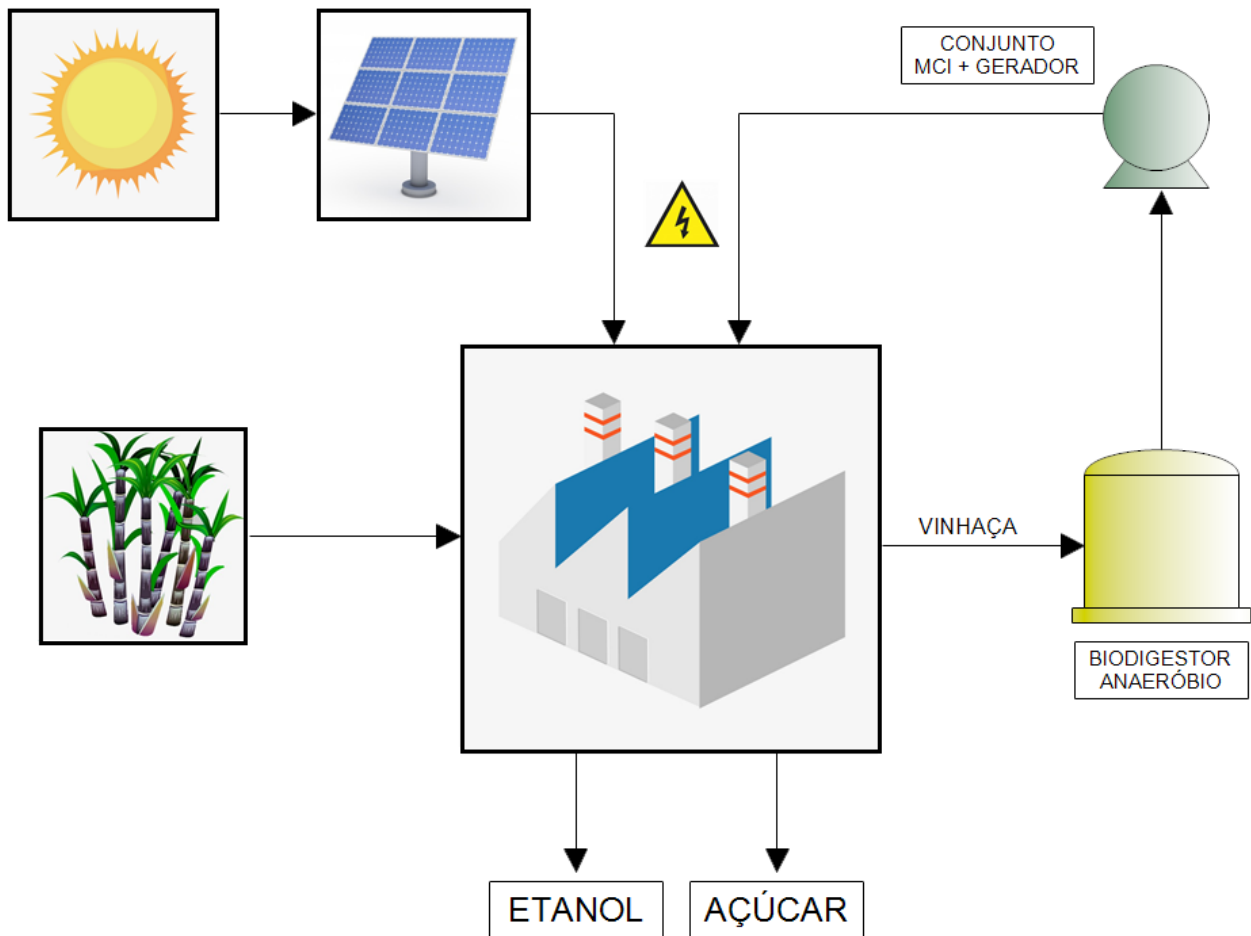
Figura 10 – Gráfico da produção de Etanol Total e Estimado produzido.



Fonte: Produção do próprio autor.

Para o caso estudado nesse trabalho, são propostas apenas duas formas de geração de energia na usina: bioeletricidade a partir de vinhaça e fotovoltaica. A Figura 11 apresenta um esquema sintetizando as formas de geração de energia apresentadas e pode-se verificar que, para os fins propostos, não é considerada a geração de energia utilizando o bagaço da cana-de-açúcar compondo o Sistema Híbrido de Produção de Eletricidade – SHPE, mas apenas as duas formas supra citadas.

Figura 11 – Formas de geração de energia propostas para o estudo apresentado.



Fonte: Produção do próprio autor.

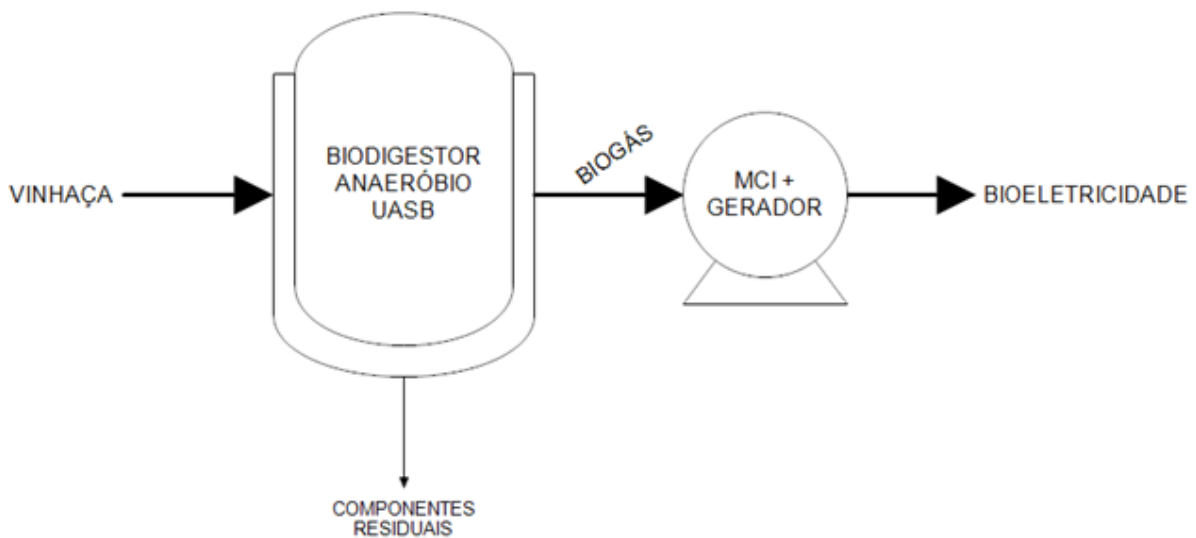
#### 4 SISTEMA HÍBRIDO DE PRODUÇÃO DE ELETRICIDADE – SHPE

A seguir, são especificadas e analisadas, do ponto de vista energético, as plantas propostas para o SHPE, com o mesmo potencial de geração, para que possam ser comparadas e combinadas nos cenários apresentados e, para fins do estudo proposto, não considerando a utilização do bagaço da cana-de-açúcar na geração de energia para sua operação.

##### 4.1 SISTEMA DE GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE

A Figura 12 apresenta um esquema simplificado do sistema de geração de bioeletricidade proposto, composto pelo Biodigestor Fluxo Ascendente e de Manta de Lodo – UASB – e pelo conjunto Motor de Combustão Interna e Gerador – MCI, operando com o biogás proveniente do processo de biodigestão.

Figura 12 – Esquema simplificado de geração de bioeletricidade utilizando Biodigestor UASB + MCI



Fonte: Produção do próprio autor.

A seguir, são detalhados os componentes desse sistema.

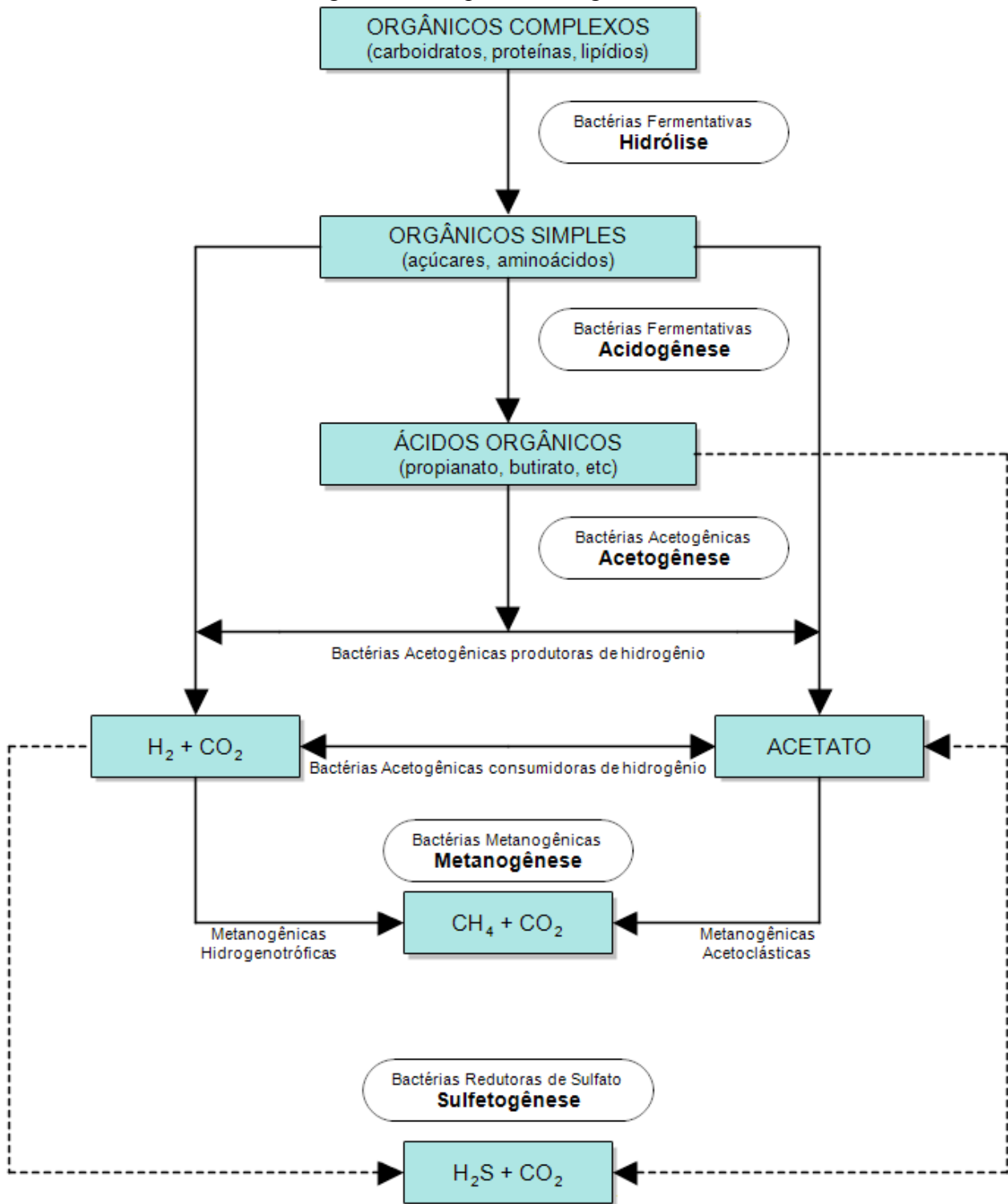
#### 4.1.1 Biodigestor Anaeróbio UASB

A digestão anaeróbia nada mais é que o processo em que, na ausência de oxigênio, micro-organismos trabalham na transformação de compostos orgânicos. Nesse caso, metano e dióxido de carbono. As principais vantagens desse tipo de técnica é que não consomem energia e não necessitam da adição de substâncias químicas no processo (BALDACIN; PINTO, 2015). O biodigestor UASB é um dos mais adequados para a biodigestão da vinhaça, pois contém elevada concentração de micro-organismos em seu interior (COSTA, 2014). Nesse tipo de sistema, entre 70 e 90% da matéria orgânica é convertida em biogás, restando apenas biomassa microbiana (BALDACIN; PINTO, 2015).

A Figura 13 apresenta as etapas do processo de digestão anaeróbia, que pode ser descrito, sucintamente, segundo Baldacin; Pinto (2015), como:

O processo de biodigestão anaeróbia possui várias etapas como a hidrólise, na qual a matéria orgânica complexa é hidrolisada em materiais dissolvidos mais simples; a acidogênese, na qual os produtos solúveis da fase anterior são metabolizados pelas bactérias fermentativas, resultando em compostos mais simples, que são posteriormente excretados; a acetogênese, que utilizam bactérias acetogênicas para oxidar os produtos gerados na etapa anterior resultando em  $H_2$ ,  $CO_2$  e acetato; a metanogênese, na qual os produtos da etapa anterior são transformados em  $CH_4$  e  $CO_2$ ; sendo que as metanogênicas que produzem metano a partir do ácido acético são chamadas de acetoclásticas e as que produzem metano a partir de  $CO_2$  e  $H_2$  são as hidrogenotróficas. Caso o efluente a ser tratado contenha compostos de enxofre (que é o caso da vinhaça) ainda ocorre a fase chamada de sulfetogênese, onde sulfatos, sulfitos e outros compostos sulfurados são reduzidos a sulfetos devido ao sulfato funcionar como aceptor de elétrons durante a oxidação de compostos orgânicos. (BALDACIN; PINTO, 2015, p. 2)

Figura 13 – Etapas da biodigestão anaeróbia.

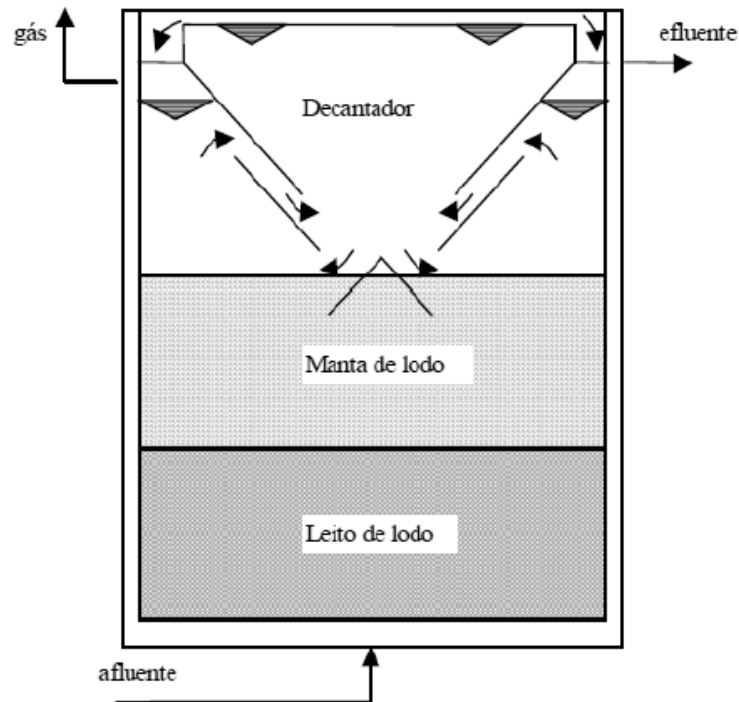


Fonte: Adaptado de Costa (2014).

A estrutura básica do biodigestor UASB pode ser observada na Figura 14. Esse biodigestor trabalha utilizando bactérias termofílicas – 8 a 10 kg DQO/m<sup>3</sup>/dia, e temperatura de 56°C, constituído, em sua parte inferior por um tanque – onde é realizada a digestão por

leito de lodo biológico – e em sua parte superior por um decantador, responsável pela separação do gás (COSTA , 2014).

Figura 14 – Estrutura do biodigestor UASB.



Fonte: Costa (2014).

Para o dimensionamento do biodigestor, que não é proposto nesse trabalho, podem-se usar metodologias já propostas por Silvia et al. (2010), em que são apresentadas as equações e os parâmetros a serem adotados para tal determinação.

A Tabela 5, a seguir, apresenta as principais relações da conversão do biogás gerado a partir da biodigestão da vinhaça, a partir de dados apresentados por Mariano et al. (2015) e Rodrigues et al. (2012).

Tabela 5 – Valores da conversão do biogás gerado pela biodigestão da vinhaça.

Conversão	
1 t cana	90 L etanol
1 t cana	1080 L vinhaça
1 m <sup>3</sup> vinhaça	7,4 m <sup>3</sup> biogás
1 m <sup>3</sup> etanol	12 m <sup>3</sup> vinhaça
DQO típica da vinhaça	20 kg/m <sup>3</sup>
Produção de biogás	0,375 Nm <sup>3</sup> /kg DQO removido
Concentração média de metano	70%
Produção típica de metano	0,26 Nm <sup>3</sup> /kg DQO
PCI metano (médio)	23 MJ/Nm <sup>3</sup>

Fonte: Adaptado de Mariano et al. (2015) e Rodrigues et al. (2012).

#### 4.1.2 Motor de Combustão Interna – MCI

Segundo Suzuki et al. (2012), Motores de Combustão Interna – MCI – são máquinas térmicas que realizam trabalho mecânico a partir da energia química da combustão ar-combustível, sendo bastante utilizados pela possibilidade de operação com combustíveis líquidos ou gasosos, serem robustos e possuírem alta relação potência/peso.

Em relação ao combustível, algumas características como vazão, composição química e PCI são necessárias para que o biogás possa ser utilizado como combustível para geração de energia elétrica, seja em motores, turbinas a gás ou microturbinas, além de processos de tratamento prévio, para remoção de H<sub>2</sub>S – ácido sulfídrico – e umidade, evitando danos ao equipamento e aumentando o PCI do combustível (COELHO et al., 2006).

A Tabela 6 apresenta a comparação de alguns parâmetros como potência, rendimento e emissões de NO<sub>x</sub>, entre algumas tecnologias comerciais de conversão de energia.



Tabela 6 – Comparação entre tecnologias disponíveis para conversão de energia.

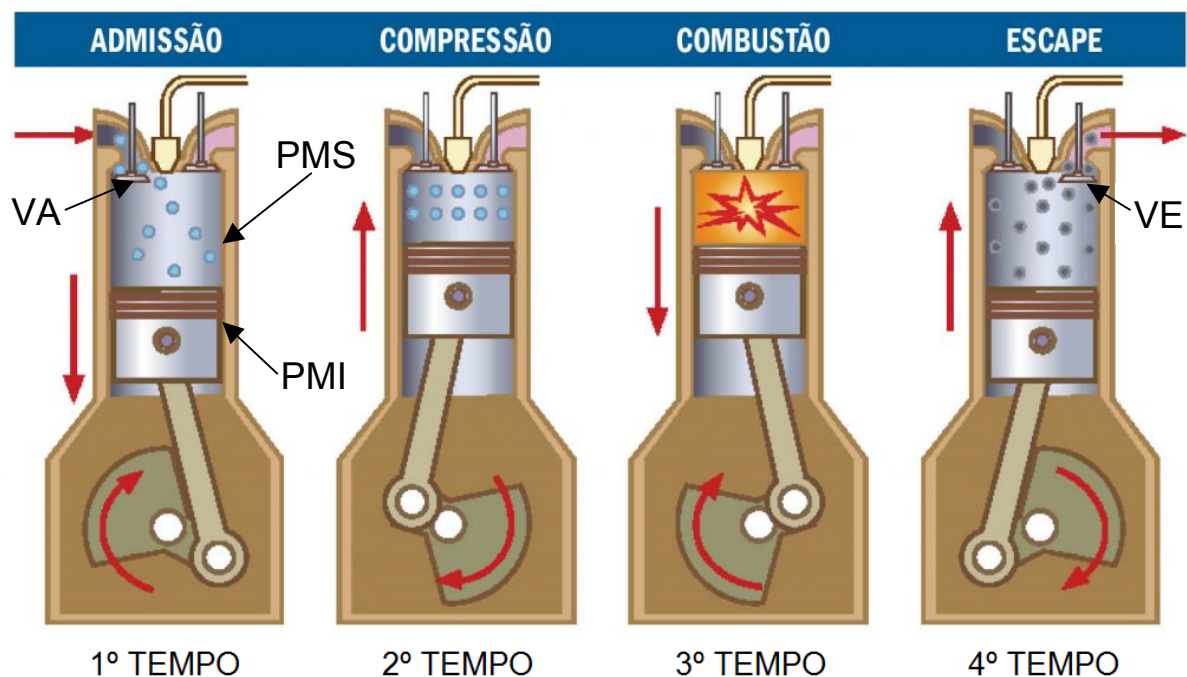
	Motores a Gás	Turbinas a Gás para Biogás de Pequeno – Médio Porte	Microturbinas (CAPSTONE)
Potência	30kW – 20MW	500 kW – 150 MW	30 kW – 100 kW
Rendimento com biogás	30% a 34%	20% a 30%	24% a 28%
Emissões de NO <sub>x</sub>	< 3000 ppm Motores com baixa emissão: < 250ppm	Média aprox. 35 a 50 ppm	< 9 ppm

Fonte: Adaptado de Suzuki et al. (2012).

Em um MCI, o trabalho produzido no motor para a geração de energia é realizado através de uma biela e de um eixo de manivelas, que utilizam o princípio do êmbolo alternativo, que possui movimentos cíclicos de vai e vem no interior do cilindro, impulsionados pela combustão dentro dos pistões, sendo, em sua maioria, do tipo Ciclo Otto, pois a centelha é mais fácil de ser ajustada para o biogás (SOUZA, 2016).

A Figura 15 apresenta, segundo Wildner (2006), as quatro etapas de funcionamento do Ciclo Otto de em um MCI, detalhadas em seguida.

Figura 15 – Funcionamento do Ciclo Otto de 4 tempos em um MCI.



Fonte: Adaptado de Joel S. Alves (2020).

Observando a Figura 15, temos, segundo Wildner (2006), que:

- 1º TEMPO – Admissão: entrada da mistura ar mais combustível via válvula de admissão – VA – a partir da aspiração criada pelo afastamento entre o êmbolo e cabeçote, acionada pela biela e pelo eixo de manivelas, formando o curso do pistão entre o ponto morto superior – PMS– e o ponto morto inferior – PMI;
- 2º TEMPO – Compressão: a mistura ar mais combustível é comprimida com o deslocamento do cilindro entre o PMI e o PMS, fechando a VA. No final desse tempo, tem-se uma rotação completa do eixo de manivelas e o êmbolo se encontra novamente no PMS;
- 3º TEMPO – Combustão e Expansão: antes do êmbolo atingir o PMS, a partir de uma centelha interna, é efetuada a ignição da mistura, queimando a massa de gás e provocando um aumento de temperatura e pressão interna, deslocando novamente o êmbolo do PMS ao PMI, realizando a transmissão de força motriz ao eixo de manivelas;
- 4º TEMPO – Descarga: ao se aproximar do PMI (final do 3º tempo), a válvula de escape – VE – começa a ser aberta para a liberação dos gases da queima interna, quando o êmbolo se desloca entre o PMI e o PMS. Após a expulsão completa dos gases queimados, quando o cilindro retorna ao PMS, a VE é fechada e é iniciado um novo ciclo.

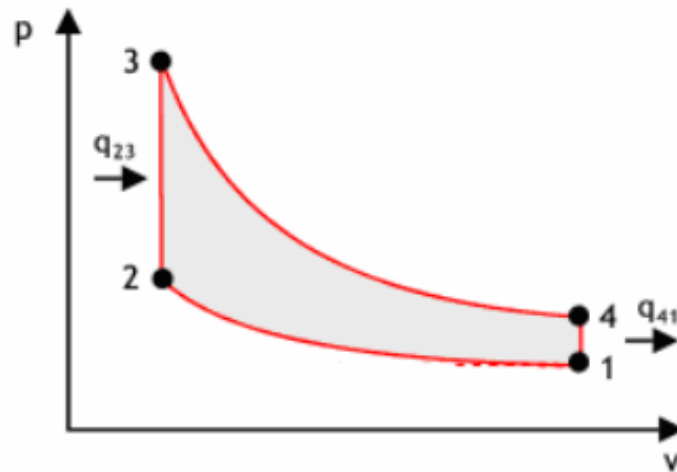
Souza (2016) descreve o Ciclo Otto como um ciclo padrão a ar, considerado ideal, apresentado na Figura 16, em que:

- no 1º TEMPO, processo 1-2, é uma compressão isentrópica<sup>1</sup> do ar;
- no 2º TEMPO, processo 2-3, o calor é transferido, diante da ignição da mistura ar + combustível –  $q_{23}$  quando o êmbolo está no PMS;
- no 3º TEMPO, processo 3-4, ocorre uma expansão isentrópica no sistema; e
- no 4º TEMPO, processo 4-1, ocorre a rejeição de calor –  $q_{41}$ , enquanto o êmbolo está no PMI.

404040

<sup>1</sup> Isentrópica: processos termodinâmicos onde a entropia do sistema é constante. (WYLEN; SONNTAG; BORGNAKKE, 2003).

Figura 16 – Ciclo termodinâmico padrão a ar.



Fonte: Souza (2016)

#### 4.1.3 Gerador de Eletricidade

O gerador de eletricidade é a máquina secundária do sistema gerador, com a função de transformar a energia mecânica, proveniente da movimentação do eixo de manivelas do MCI, em energia elétrica. É composto por uma parte móvel – denominada rotor – e uma fixa – denominada estator –, que é responsável pelo campo magnético necessário para que o sistema funcione. Esse conjunto pode ser conectado ao MCI através de uma relação de engrenagens, relação de polias e correias e por acoplamento direto, possuindo eficiência que depende, além do sistema de acoplamento, de fatores como carga de operação, PCI e vazão do combustível utilizado (SOUZA, 2016).

Todo o conjunto MCI será composto, como descrito por Souza (2016), por controlador de velocidade, sistema de controle da mistura ar mais combustível, sistema de partida do gerador, sistema de exaustão e silencioso, sistema de arrefecimento e ventilação e painel de controle.

Existem diversas empresas que produzem geradores que operam com biogás e pode-se destacar, por possuir visibilidade no mercado, o fabricante Caterpillar. A Tabela 7 apresenta as principais características de 5 grupos geradores Caterpillar, que operam com biogás como combustível e a 60 Hz.

Tabela 7 – Potência nominal e Eficiência Elétrica (100% carga) de geradores Caterpillar.

Modelo	CG132-16	G3516A+	G3220C	CG170-20	CG260-12
Potência Elétrica (kW)	800	1015	1622	2000	2530
Eficiência Elétrica de Catálogo (%)	41,7	36,1	39,8	42,7	42,2

Fonte: Caterpillar (2019a).

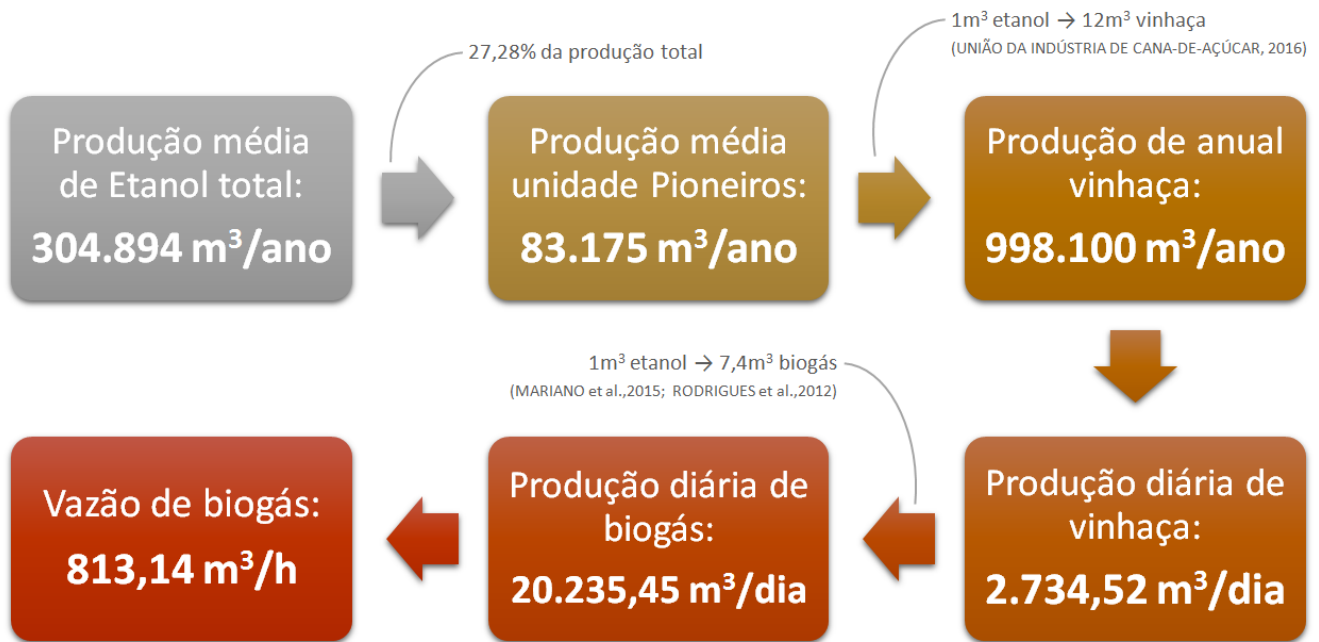
#### 4.1.4 Potencial de produção de energia elétrica com biogás de vinhaça

Dadas as características apresentadas no Capítulo 2, onde foi caracterizada a Usina Santa Adélia Pioneiros, tem-se que:

- Produção média total de etanol do grupo é de 304.894,00 m<sup>3</sup>/ano;
- Produção média estimada (27,28%) da unidade Pioneiros é de 83.175,00 m<sup>3</sup>/ano;
- Produção de vinhaça – considerando a geração de 12 m<sup>3</sup> de vinhaça para cada 1 m<sup>3</sup> de etanol (UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR, 2016), de 998.100 m<sup>3</sup>/ano e, portanto, 2.734,52 m<sup>3</sup>/dia (considerando 1 ano com 365 dias).
- Produção de biogás – considerando a produção 7,4 m<sup>3</sup> de biogás para cada 1 m<sup>3</sup> de vinhaça (MARIANO et al.,2015; RODRIGUES et al.,2012), de 20.235,45 m<sup>3</sup>/dia e, portanto, uma vazão de 813,14 m<sup>3</sup>/h.

A Figura 17 apresenta o resumo dos dados de produção e geração apresentados da unidade Pioneiros.

Figura 17 – Resumo do processo de produção de biogás a partir da vinhaça



Fonte: Produção do próprio autor.

Segundo Mariano et al. (2015) e Baldacin; Pinto (2015), o biogás de vinhaça típico possui um PCI médio de 23 MJ/m<sup>3</sup> e uma massa específica de 1,8428 kg/m<sup>3</sup>; sendo assim, pode-se realizar o cálculo da Potência Energética suprida pelo Combustível –  $E_{comb}$ , em kW, disponível a partir da equação (1) (XAVIER, 2016):

$$E_{comb} = m_{comb} \cdot PCI_{comb} \quad (1)$$

Onde:

$m_{comb}$ : Vazão mássica de combustível [kg/s]

$PCI_{comb}$ : Poder Calorífico Inferior do combustível [kJ/kg]

Realizando o cálculo da vazão mássica  $m_{comb}$ , temos:

$$m_{comb} = 843,14 \frac{m^3}{h} \times 1,8428 \frac{kg}{m^3} = 1.553,74 \frac{kg}{h} = 0,4316 \frac{kg}{s}$$

Para o cálculo do potencial de energia, ainda faz-se necessário ajustar as unidades do PCI:

$$PCI_{comb} = 23 \frac{MJ}{m^3} = \frac{23.000 \text{ kJ}}{1,8428 \text{ kg}} = 12.481,01 \frac{kJ}{kg}$$

Sendo assim, o  $E_{comb}$  calculado é de:

$$E_{comb} = 0,4316 \frac{kg}{s} \times 12.481,01 \frac{kJ}{kg} = 5.386,80kW$$

A eletricidade produzida –  $E_p$ , pode ser calculada pela equação (2) (XAVIER, 2016):

$$E_{pMCI} = \eta_{el} \cdot E_{comb} \quad (2)$$

Onde:

$\eta_{el}$ : Eficiência elétrica do conjunto gerador [%]

A partir da potência energética suprida pelo combustível disponível e as eficiências elétricas apresentadas pelos grupos geradores, na Tabela 7 pode-se especificar o conjunto gerador CG260-12 para a planta proposta. Tendo em vista a potência disponível, a partir dos dados de catálogo, esta será:

$$E_{pTeórica} = 42,2\% \times 5.386,80kW = 2.273,23kW$$

Essa potência está abaixo da potência nominal do gerador, que é de 2530 kW, que, por sua vez, estará operando com, aproximadamente, 90% de carga.

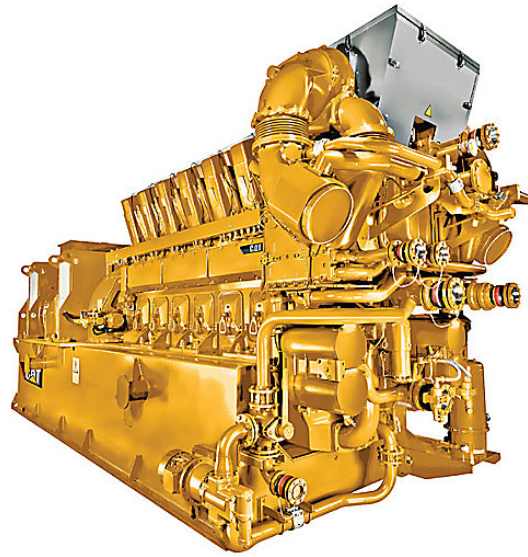
A Tabela 8 apresenta mais dados do conjunto gerador CG260-12 da Caterpillar e a Figura 18 apresenta seu aspecto físico.

Tabela 8 – Especificações do conjunto gerador Caterpillar CG260-12

Especificações	CG 260-16
Potência Elétrica (kW)	2.530
Eficiência Elétrica – catálogo (%)	42,2
Rotação (RPM)	900
Nível de Emissão NO <sub>x</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )	500
Eficiência Térmica (%)	40,3
Dimensões – comprimento / largura / altura (mm)	8000 / 2660 / 2794
Peso (kg)	40.649,60

Fonte: Caterpillar (2019b)

Figura 18 – Conjunto gerador Caterpillar CG260-12



Fonte: Caterpillar (2019b)

Para o trabalho, será considerado o rendimento prático de 26%, que segundo Souza (2016), indica que a eficiência prática depende de diversos fatores, como mistura combustível, condições de trabalho e acoplamento do sistema. Sendo assim, tem-se que:

$$E_{pPrática} = 26\% \times 5.388,26kW = 1.400,57kW = E_{pMCI}$$

#### 4.1.5 Balanço energético do sistema de geração de bioeletricidade

A partir da equação (3) (XAVIER, 2016; SILVIA et al., 2010), pode-se realizar o balanço energético do sistema de geração de bioeletricidade:

$$E_{comb} + m_{ar} \cdot h_{ar} = E_{pMCI} + E_{jaq} + E_{ge} + perdas \quad (3)$$

Onde:

$E_{ge}$ : Potência térmica dos gases de exaustão [kW]

$E_{jaq}$ : Potência térmica transferida para a jaqueta para arrefecimento do motor [kW]

$h_{ar}$ : Entalpia do ar de combustão [kJ/kg]

$m_{ar}$ : Vazão mássica de ar de combustão [kg/s]

Perdas: perdas energéticas incluindo perdas da parede externa por radiação e convecção [kW].

Como para o caso proposto não há cogeração, a equação (3) será reescrita, como equação (4), considerando uma única variável de potência térmica de arrefecimento do motor e gases de exaustão:

$$E_{comb} + m_{ar} \cdot h_{ar} = E_{pMCI} + E_{jg} + perdas \quad (4)$$

Caso seja implementado o sistema de cogeração, Paulino (2017) e Xavier (2016) descrevem as equações e métodos de determinação da potência térmica transferida para a jaqueta para arrefecimento do motor –  $E_{jaq}$ , – e da potência térmica dos gases de exaustão –  $E_{ge}$ .

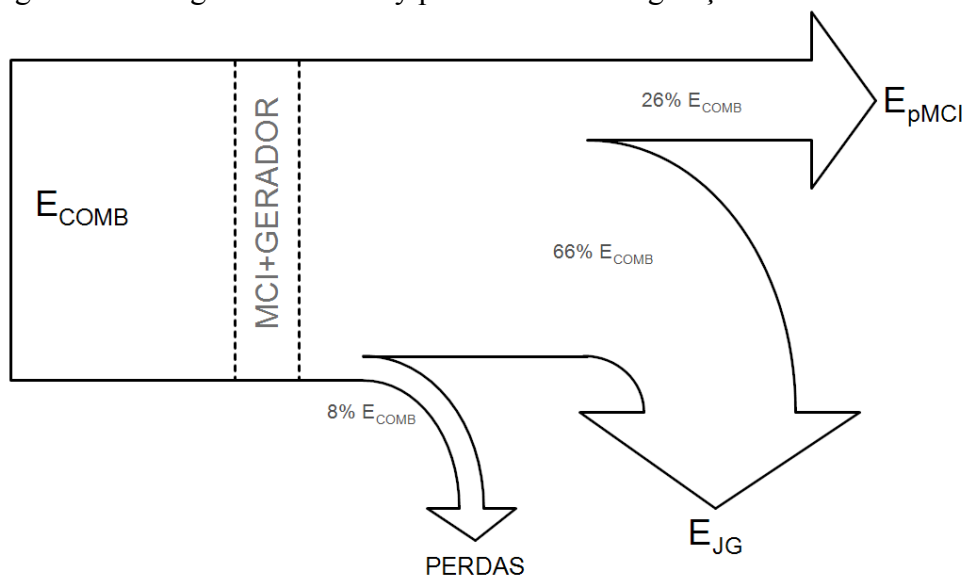
Em relação às demais perdas, Coronado et al. (2011) recomenda que sejam estimadas em 8% da energia total suprida pelo combustível –  $E_{comb}$ .

Utilizando a equação (4), pode-se determinar o balanço energético do sistema, em que se tem, para o caso proposto:

- $E_{comb} = 5.386,23 \text{ kW}$
- $E_{pMCI} = 1.400,57 \text{ kW}$  – considerando o rendimento elétrico de 26%
- $E_{jg} = 3.554,76 \text{ kW}$  – para o caso proposto, cerca de 66%
- Perdas = 430,90 kW (considerando 8% de  $E_{comb}$ ) (CORONADO et al., 2011).

Esses resultados foram representados em um Diagrama de Sankey, apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Diagrama de Sankey para o sistema de geração de bioeletricidade



Fonte: Produção do próprio autor.



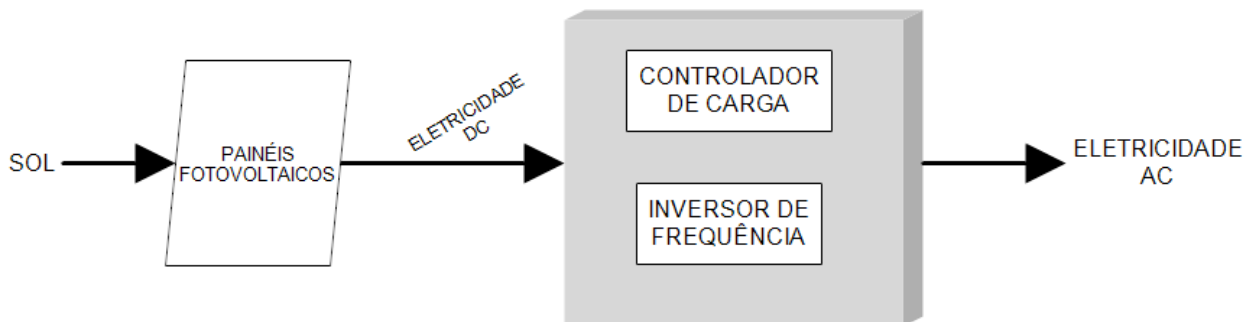
## 4.2 SISTEMA DE GERAÇÃO FOTOVOLTAICO

Essencialmente, um sistema de geração fotovoltaico é composto por um conjunto de painéis fotovoltaicos – responsáveis pela conversão da energia solar em elétrica –, controladores de carga – responsáveis pelo acoplamento entre os painéis e a carga –, banco de baterias – para o armazenamento da energia excedente gerada – e, por último, inversores de frequência – que atuam para transformação da tensão contínua, gerada pelos painéis, em tensão alternada (WENDLING JÚNIOR, 2016).

No sistema proposto, não há banco de baterias para armazenamento do excedente de energia gerada, visto que, caso haja, ele será enviado para o Sistema Elétrico e compensado posteriormente.

A Figura 20 apresenta o esquema do sistema de geração fotovoltaico proposto, com seus principais elementos demonstrados.

Figura 20 – Diagrama do sistema fotovoltaico proposto.



Fonte: Produção própria do autor.

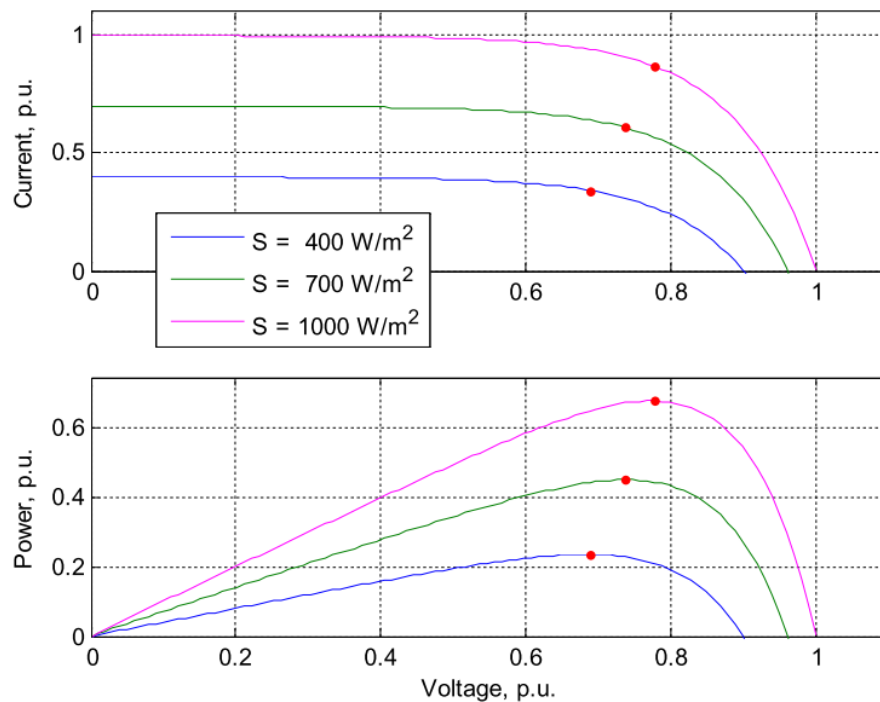
### 4.2.1 Controlador de Carga e Inversor de Frequência

O controlador de carga, normalmente implementado dentro do inversor de frequência, tem a função de realizar o interfaceamento entre a carga e os geradores (painéis), visto que a geração fotovoltaica é limitada e depende de fatores como incidência de radiação solar e temperatura dos painéis. Para isso, os inversores são dotados de técnicas de Rastreamento do Máximo Ponto de Potência dos painéis, denominado MPPT.

*Maximum Power Point Trackers*, MPPTs, são seguidores do ponto de potência máxima e que desempenham um papel importante nos sistemas fotovoltaicos, por maximizar a potência de um sistema para um determinado conjunto de condições e, portanto, maximizar a eficiência do sistema global. Assim, um algoritmo MPPT pode minimizar o custo global do sistema. Muitos algoritmos têm sido propostos e muitos são empregados em soluções de mercado, podendo-se obter com um MPPT eficiências acima de 97%. (CARVALHO, 2011,p. 14)

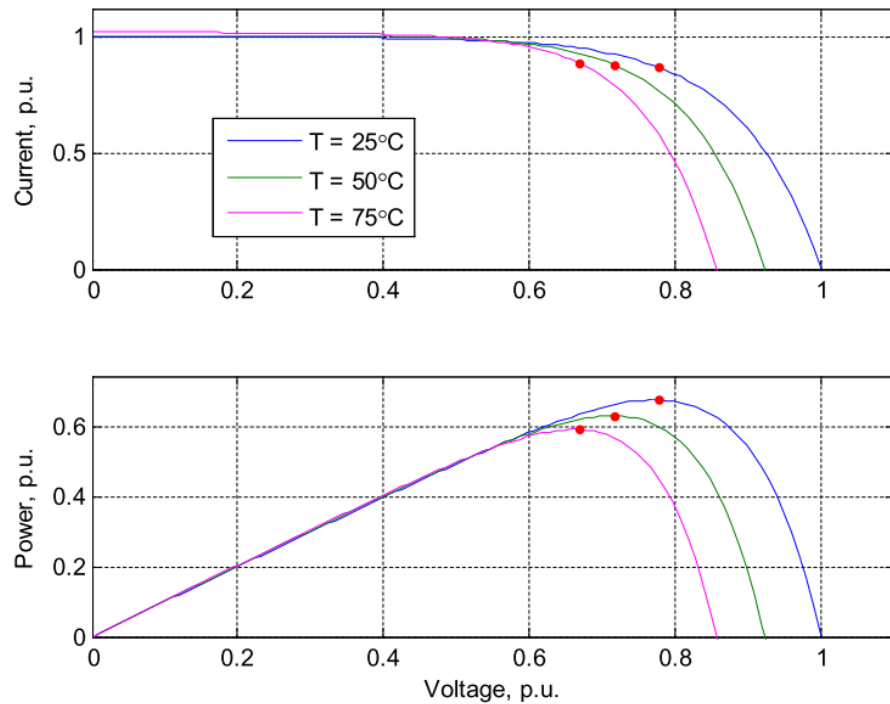
As Figuras 21 e 22 apresentam a influência da incidência da radiação solar e da temperatura na produção de energia elétrica a partir de painéis fotovoltaicos, em valores por unidade – p.u.. Elas apresentam, também, o ponto de trabalho em que ocorre a máxima transferência de potência dos painéis, justificando, assim, a necessidade de métodos de controle de interface entre a fonte geradora e a carga.

Figura 21 – Influência da incidência da radiação solar em painéis fotovoltaicos.



Fonte: Morales (2010).

Figura 22 – Influência da variação da temperatura em painéis fotovoltaicos.



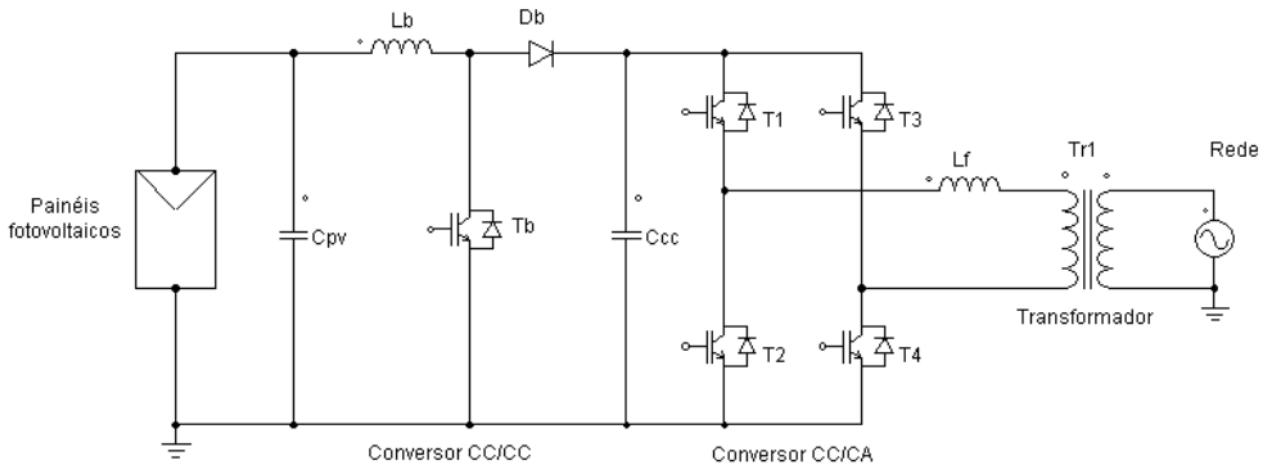
Fonte: Morales (2010).

Os inversores de frequência são os responsáveis pelo condicionamento da tensão contínua, gerada pelos painéis fotovoltaicos, e a tensão necessária para a alimentação das cargas. Devem garantir sincronismo da rede, conformidade de tensão e controle do fluxo de potência e apresentam perdas no processo de conversão que podem atingir 10% da energia recebida, dependendo do tipo de conversor utilizado (CARVALHO, 2011).

A Figura 23 apresenta o diagrama esquemático, simplificado, de um tipo comum de inversor de frequência monofásico com um painel fotovoltaico conectado, que utiliza um transformador para adequar o nível de tensão a ser transmitida para a rede elétrica.

Pode-se observar, nessa figura, que o painel fotovoltaico é conectado a um Conversor CC/CC, que tem como função adequar o nível de tensão CC gerado, para posterior conversão para CA. O conjunto Conversor CC/CC e Conversor CC/CA compõem o Inversor de Frequência do sistema, ambos controlados por um sistema de controle e disparo dos semicondutores de potência, não representado na Figura 23.

Figura 23 – Diagrama esquemático simplificado de um inversor de frequência monofásico com FV.



Fonte: Carvalho (2011).

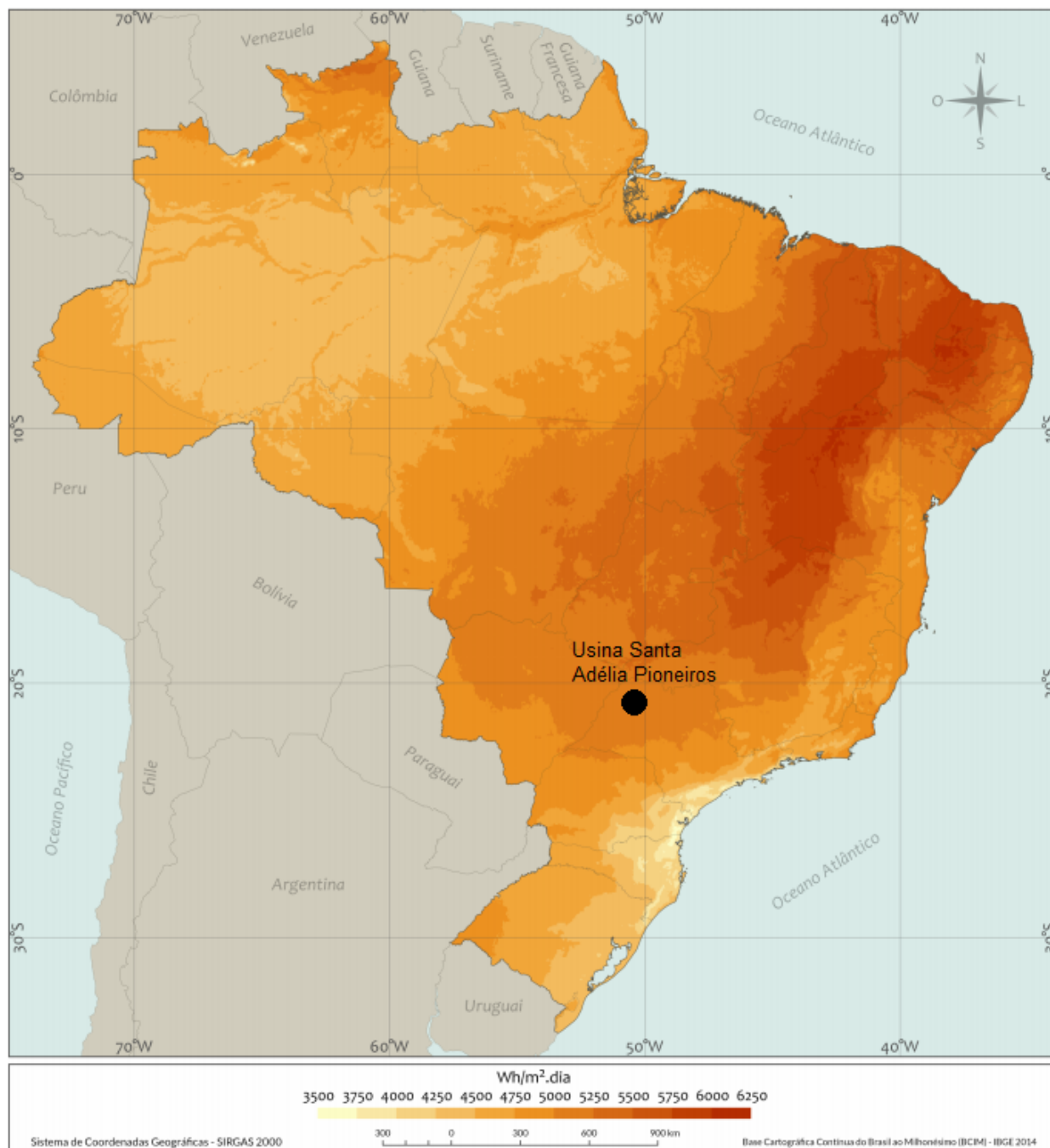
#### 4.2.2 Especificação da planta fotovoltaica

Tendo em vista o potencial de geração de energia a partir do biogás obtido da biodigestão da vinhaça, calculado em 1.400,57 kW, o sistema de geração fotovoltaico foi dimensionado com a mesma potência, ou seja, também possui uma potência de 1.400,57 kW.

Uma metodologia para dimensionamento do Sistema Fotovoltaico é apresentada a seguir, a partir da energia necessária para operação da carga a ser alimentada, segundo recomendações feitas pela empresa ABB (ABB, 2014; 2017).

Para a especificação do sistema, faz-se necessário conhecer a incidência de radiação solar na região onde a usina está localizada. A Figura 24 apresenta o mapa de incidência da radiação solar média e a região de localização da usina.

Figura 24 – Mapa da incidência de radiação solar.



Fonte: Adaptado de Martins et al. (2017).

Pode-se verificar, através da Figura 23, que o índice médio de incidência de radiação solar na região é de 5750 Wh/m<sup>2</sup>.dia.

Além disso, para a especificação da planta, é necessário conhecer a potência nominal e a eficiência de conversão de painéis fotovoltaicos comerciais. A Tabela 9 apresenta uma lista com os principais painéis de alguns fabricantes, com as principais características, como potência, eficiência de conversão e dimensões físicas de cada modelo.

A eficiência e a potência geradas por cada painel dependem do tipo de construção da célula fotovoltaica – elemento primário de conversão da incidência de radiação solar em energia elétrica –, que são associadas para formação do painel fotovoltaico, podendo ser construídas de dois modos: células monocristalinas ou policristalinas (MORALES, 2010).

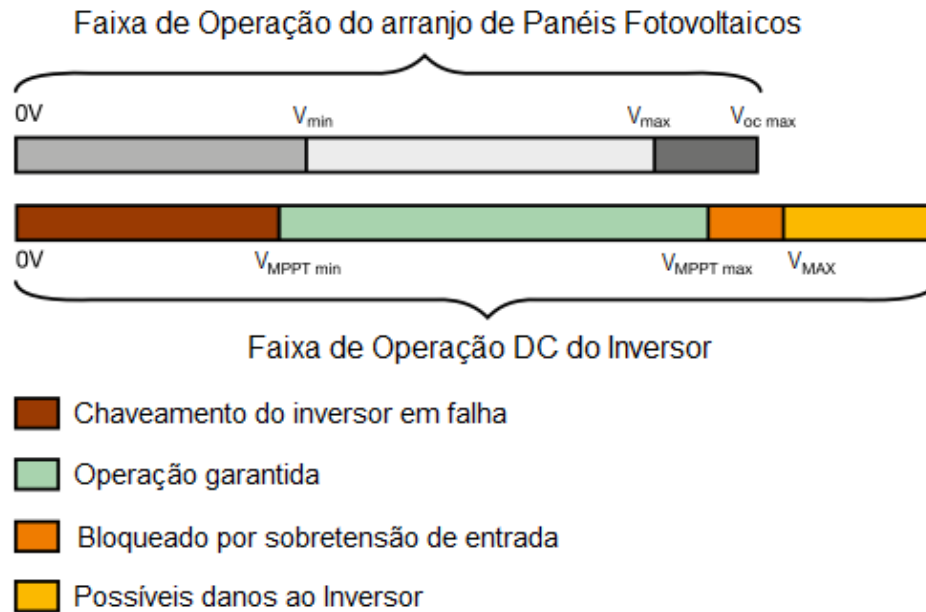
Tabela 9 – Painéis fotovoltaicos comerciais.

Fabricante	Modelo	Tipo PV	Potência Elétrica (W)	Eficiência de Conversão (%)	Dimensões (mm x mm x mm)
Yingli Solar	YL270C-30b	Monocristalino	270	16,5	1650 x 990 x 40
Yingli Solar	YL270C-29b	Policristalino	270	16,6	1640 x 990 x 40
Yingli Solar	YL290C-35b	Policristalino	290	14,9	1970 x 990 x 40
Sunpower	X21-335-BL	Monocristalino	335	21,1	1559 x 1046 x 46
Sunpower	SPR-E19-320	Monocristalino	320	19,9	1559 x 1046 x 46
Seraphin Power	SRP-5MA-270W	Monocristalino	270	16,0	1580 x 1064 x 40
Seraphin Power	SRP-6MB-270W	Monocristalino	270	16,5	1640 x 992 x 40
Seraphin Power	SRP-6PB-265	Policristalino	265	16,3	1580 x 1064 x 40
Kyocera	KK255P-3CB2CG	Policristalino	255	15,4	1662 x 990 x 46
Kyocera	KD255GH-4FB2	Policristalino	255	15,4	1662 x 990 x 46
Kyocera	KT265-6MCA	Policristalino	265	16,1	1662 x 990 x 46
Tamesol	TMM660255	Monocristalino	255	15,57	1640 x 992 x 40
Tamesol	TMM272290	Monocristalino	290	14,94	1956 x 992 x 50
Tamesol	TMP660250	Policristalino	250	15,37	1640 x 992 x 40
Tamesol	TMP672280	Policristalino	280	14,50	1956 x 992 x 50
Atersa	A-260P ULTRA	Policristalino	250	15,97	1645 x 990 x 40
Atersa	A-270M CSE	Monocristalino	270	16,57	1638 x 995 x 40
Canadian Solar	CS6K-275M	Monocristalino	275	16,80	1650 x 992 x 40
Canadian Solar	CS6-265P	Policristalino	265	16,47	1638 x 982 x 40
Canadian Solar	CS6X-315	Policristalino	315	16,42	1954 x 982 x 40

Fonte: Ruiz (2016).

Os painéis fotovoltaicos devem ser arranjados de forma que consigam suprir as necessidades de tensão, para operação dos inversores de frequência – dentro de uma faixa de trabalho específica, como apresentado na Figura 25 – e corrente demandada para a operação do sistema.

Figura 25 – Faixa de tensão de operação de inversor de frequência com MPPT.

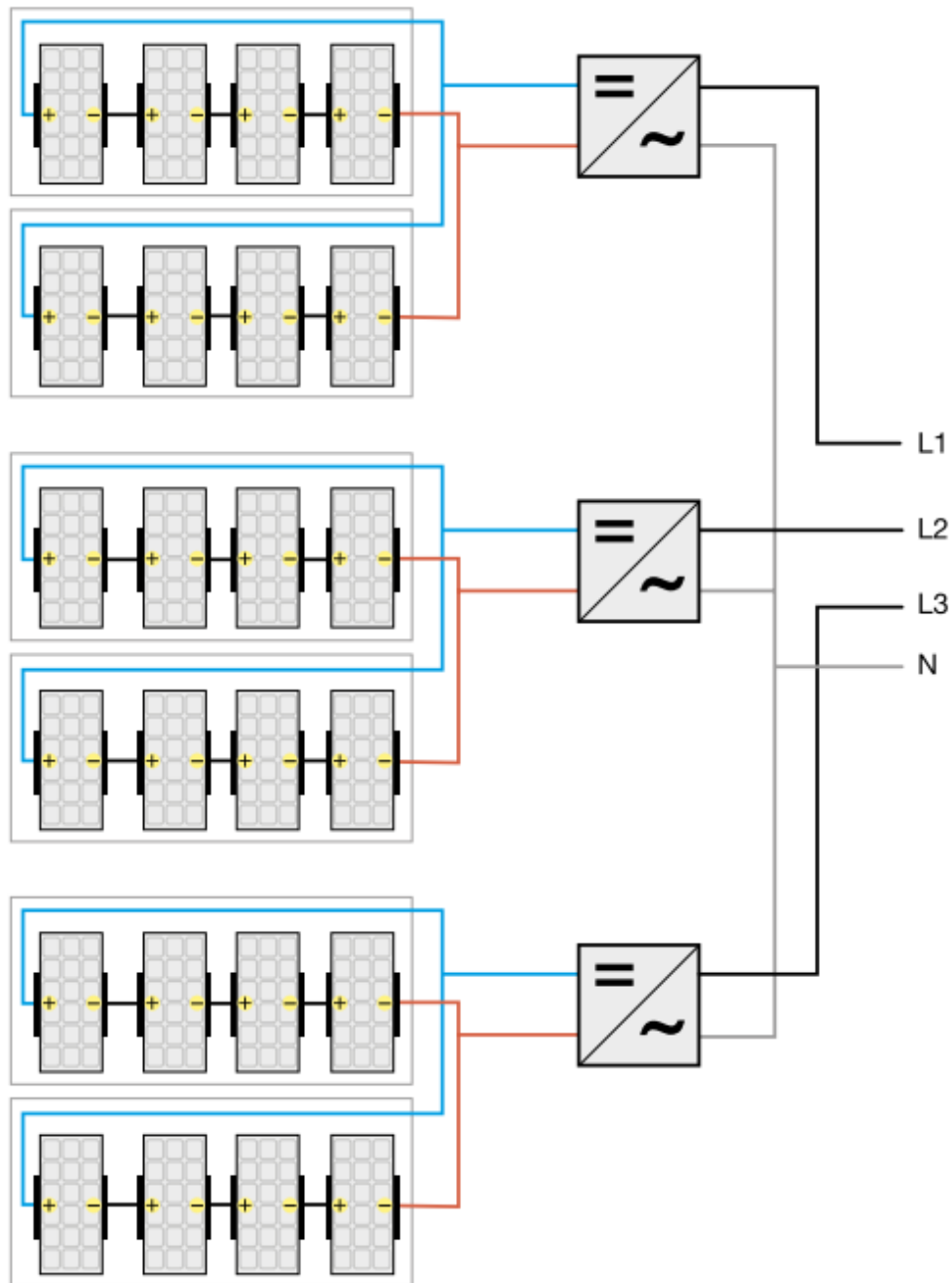


Fonte: Adaptado de ABB (2014).

Pode-se observar pela Figura 24 que, para que o inversor funcione corretamente, há necessidade do arranjo de painéis em série – que definem qual a tensão de operação do sistema – esteja dentro da faixa de Operação Garantida. Nessa faixa, a função do controlador de carga, que é garantir que os painéis trabalhem em seu máximo ponto de transferência de potência, é executada com efetividade.

A Figura 26 apresenta um esquema simplificado de conexão de um sistema genérico de geração fotovoltaico trifásico, em que, nesse caso, são utilizados 3 inversores monofásicos para compor cada uma das fases do sistema. Nessa figura, pode-se observar um arranjo de quatro painéis em série – visando a atingir a tensão de operação garantida do inversor – e dois arranjos em paralelo – visando a atingir a corrente demandada para o sistema – por fase.

Figura 26 – Conexão simplificada de geração fotovoltaica trifásica.



Fonte: Adaptado de ABB (2014).

Segundo ABB (2017), a potência para dimensionamento do sistema fotovoltaico depende do fator de desempenho do sistema, que deve considerar perdas na conversão do inversor de frequência e nos demais elementos da instalação, como cabos, conectores e dispositivos de manobra e interface. Esse fator de desempenho é relacionado, em sua maior parte, à performance do inversor.



Carvalho (2011) recomenda uma estimativa de perdas em 10%, em sistemas de baixa potência, e ABB (2014, 2017) recomenda uma estimativa de perdas entre 15% e 25% em sistemas com maior geração de energia, ou seja, considerando um fator de performance entre 75% e 85%.

A equação (5) apresenta, segundo ABB (2017), como realizar o cálculo da potência, em W, necessária para os painéis fotovoltaicos:

$$P_{FV} = \frac{E_{op} \cdot G_{STC}}{H_{TOT} \cdot TD} \quad (5)$$

Onde:

$E_{op}$ : Energia necessária para operação da usina [Wh]

$G_{STC}$ : Irradiância nas condições de teste padrão – STC<sup>2</sup> [1000 W/m<sup>2</sup>]

$H_{TOT}$ : Incidência de irradiação total solar local [Wh/m<sup>2</sup>]

$P_{FV}$ : Potência instalada no sistema fotovoltaico [W<sub>p</sub>]

TD: Taxa de desempenho do sistema – entre 75% e 85% [%]

Com os dados da potência demandada e as horas de operação do sistema, pode-se calcular que a energia necessária para a operação da planta será, em kWh/dia, de acordo com a equação (6):

$$E_{op} = P_{dem} \cdot h_{op} \quad (6)$$

Onde:

$h_{op}$ : Horas de operação da usina [h]

$P_{dem}$ : Potência demandada para operação [W]

Para calcular o número de painéis necessários para o sistema –  $N_{FV}$ , segundo ABB (2017), é utilizada a equação (7):

$$N_{FV} = \frac{P_{FV}}{P_{painel}} \quad (7)$$

555555

<sup>2</sup> STC: condições de teste padrão, definidos pela IEC 60904-2 com irradiação de 1000 W/m<sup>2</sup> e 25°C.

Onde:

$P_{\text{painel}}$ : Potência elétrica nominal de pico do painel selecionado [ $W_p$ ]

A partir da Tabela 9, para os fins de dimensionamento desse sistema, optou-se por utilizar modelo X21-335-BL, da *Sunpower*, que é um painel monocristalino com potência de 335  $W_p$ , tensão máxima de saída de 57,3 V, corrente máxima de 5,85 A e eficiência de 21,1%, segundo Sunpower (2019). Esse modelo foi selecionado pois, dos listados na Tabela 9, possui grande potência e eficiência, para que o número de painéis seja reduzido. Sendo assim, o número necessário de painéis será:

$$N_{FV} = \frac{1.400,57 \times 10^3}{335} = 4.181 \text{ painéis}$$

Para a potência demandada, foi selecionado, para fins do trabalho, o inversor de frequência ABB PVS-800-57B-1645KW-C, com capacidade de 1.645 kW de potência e alto rendimento de trabalho, suportando até 2.468  $kW_p$ . A Figura 27 apresenta o inversor escolhido, que trabalha com tensões DC de entrada na faixa entre 550 V e 850 V (ABB, 2019) e suas demais especificações encontram-se disponíveis no catálogo do fabricante.

Figura 27 – Inversor de frequência ABB PVS-800-57B-1645KW-C de 6,7MVA.

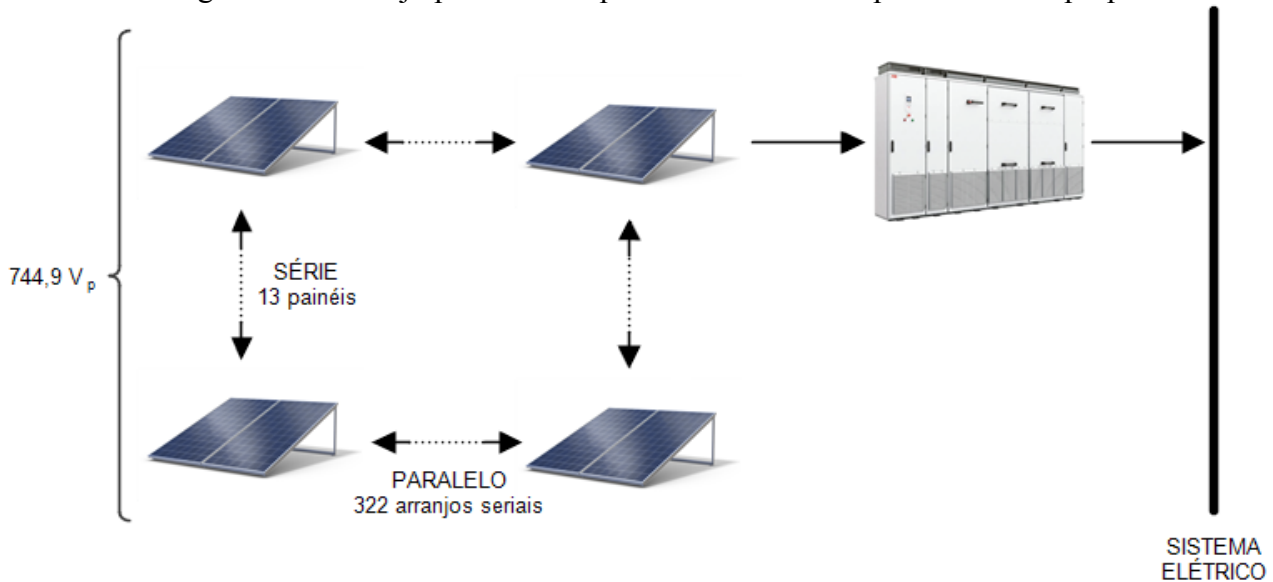


Fonte: ABB (2019).

Para que a condição de operação garantida do inversor seja atingida, optou-se por um dos possíveis arranjos para o sistema, apresentado na Figura 28. Nesse arranjo, são associados 13 painéis em série, atingindo uma tensão de operação de, aproximadamente, 745  $V_p$ , e 322

associações seriais em paralelo, totalizando 4186 painéis. Isso garante os requisitos de tensão para operação do inversor e potência para a operação do sistema.

Figura 28 – Arranjo possível dos painéis fotovoltaicos para o sistema proposto.



Fonte: Produção própria do autor.

O número de painéis é maior do que o calculado pela equação (7), pois, para que o arranjo utilizado atenda à especificação de faixa de tensão de entrada do inversor, foi necessária a adição de mais alguns painéis.

O inversor proposto ainda permite a conexão com outros inversores, além de realizar a disponibilização de dados *on-line* para monitoramento da planta implementada, atuando como elemento flexível que possibilita expansões do sistema, segundo dados de ABB (2019).

#### 4.2.3 Balanço energético do sistema fotovoltaico

Tendo em vista os conceitos apresentados e as equações de (5) a (7), pode-se considerar, na equação (8) o seguinte balanço energético para o sistema fotovoltaico:

$$E_{solar} = E_{eFV} + perdas_{prim} \quad (8)$$

Onde:

$E_{eFV}$ : Eletricidade produzida pelo efeito fotovoltaico, convertida pelos painéis [W]

$E_{solar}$ : Eletricidade produzida pela irradiação solar incidente total [W]

$perdas_{prim}$ : Perdas no processo de conversão solar – energia elétrica [W]

Considerando o rendimento do painel fotovoltaico –  $\eta_{FV}$ , temos, pela equação (9), que:

$$E_{eFV} = E_{solar} \cdot \eta_{FV} \quad (9)$$

e pela equação (10) que:

$$E_{eFV} = P_{FV} + perdas_{sec} \quad (10)$$

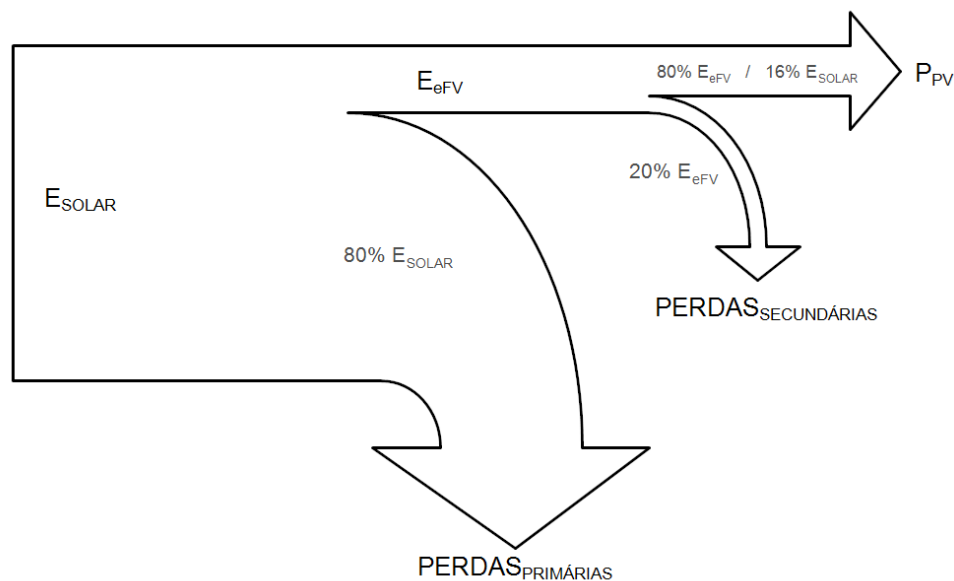
Onde:

$perdas_{sec}$ : Perda de energia no processo de conversão e transmissão da energia convertida nos componentes da instalação elétrica, como cabos, elementos de proteção e seccionamento e transformadores [W]

$P_{FV}$ : Potência fornecida pelos painéis fotovoltaicos [W]

Como recomendado por ABB (2017), podem-se estimar as perdas secundárias do sistema entre 25% e 15%, sendo utilizado, nesse trabalho, 20%. A partir das equações (8) a (11), pode-se apresentar um Diagrama de Sankey para o sistema fotovoltaico, apresentado na Figura 29.

Figura 29 – Diagrama de Sankey para o sistema fotovoltaico.



Fonte: Produção própria do autor.

## 5 ANÁLISE ECONÔMICA

A análise econômica foi realizada considerando cada um dos cenários supramencionados, considerando o custo da eletricidade produzida e da receita anual esperada ao longo do tempo – *payback* do sistema.

### 5.1 ANÁLISE ECONÔMICA PARA GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE – CENÁRIO 1

As análises econômicas foram realizadas utilizando o método descrito por Silveira et al. (2012) – adaptado por Xavier (2016), e Reto (2002) – no qual estão contidos os cálculos do custo da eletricidade produzida pelo sistema, com base no valor de investimento, no custo de combustível e no custo de manutenção. Além desses aspectos, trabalha com a receita anual esperada ao longo do tempo, após suas implantações.

A equação (12) apresenta o cálculo do custo de produção de bioeletricidade –  $c_{el}$  – em US\$/kWh:

$$c_{elMCI} = \frac{I_{pMCI} \cdot f}{H \cdot E_{pMCI}} + c_{comb} \cdot \frac{E_{comb}}{E_{pMCI}} + c_{mMCI} \quad (12)$$

Onde:

$c_{comb}$ : Custo de combustível [US\$/kWh]

$c_{mMCI}$ : Custo de manutenção do MCI [US\$/kWh]

f: Fator de anuidade [1/ano]

H: Período equivalente de utilização do equipamento [horas/ano] – considerado 7300 horas/ano.

$I_{pMCI}$ : Investimento no conjunto motor / gerador [US\$]

O fator de anuidade pode ser calculado pela equação (13):

$$f = \frac{q^k(q - 1)}{q^k - 1} \quad (13)$$

com  $q = 1 + \frac{i}{100}$

i: Taxa anual de juros [%]

k: Período de retorno de investimentos (Período de *Payback*) [anos]

Já o custo de investimento no MCI –  $I_{pMCI}$  [US\$] – é calculado utilizando a metodologia proposta por Boehm (1987), em que o custo de investimento na implantação do conjunto gerador pode ser estimado pela equação (14) :

$$C = C_R \cdot \left( \frac{S}{S_R} \right)^m \quad (14)$$

Onde:

C: Estimativa de custo de implantação do conjunto gerador especificado [US\$]

$C_R$ : Custo de referência de um equipamento [US\$]

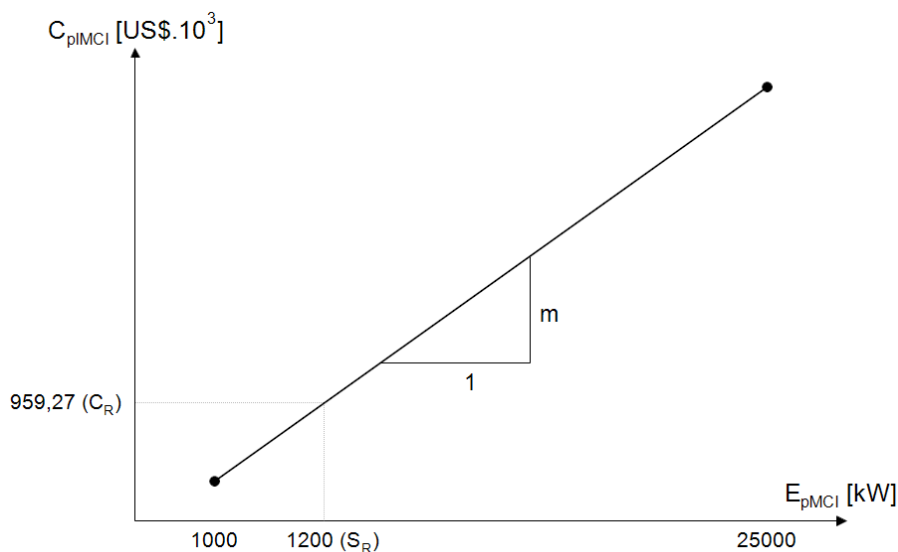
m: fator de correção para determinação do custo estimado, usualmente entre 0,5 e 1.

S: Especificação do conjunto gerador [kW]

$S_R$ : Especificação do conjunto gerador de referência [kW]

Os parâmetros utilizados na metodologia proposta são representados na Figura 30 – segundo Boehm (1987) e Xavier (2016) – e, a partir deles, pode-se estimar o custo de investimento da implantação do conjunto gerador –  $I_{pMCI}$  – a partir da equação (15), para a faixa de potência entre 1000 e 25000 kW.

Figura 30 – Estimativa do custo de investimento do MCI a partir da metodologia Boehm.



Fonte: Produção própria do autor.

$$I_{pMCI} = 959,27 \cdot 10^3 \cdot \left( E_{pMCI} / 1200 \right)^{0,95} \quad (15)$$

E, assim sendo, o custo de investimento estimado da planta será de US\$ 1.110.857,00.

O ganho anual com a produção de eletricidade, em US\$, é calculado pela equação (16):

$$R_{MCI} = E_{pMCI} \cdot H \cdot (c_{ele} - c_{elMCI}) \quad (16)$$

Onde:

$c_{ele}$ : Tarifa da eletricidade na rede [US\$/kWh]

Considerando os parâmetros sintetizados na Tabela 10 – segundo Xavier (2016) –, taxa cambial com cotação realizada em março de 2019 e taxa base de juros variando entre 4%, 8% e 12% ao ano, pode-se determinar o custo da bioeletricidade produzida –  $c_{elMCI}$  – e a receita anual esperada –  $R_{MCI}$  –, apresentadas nas Figuras 31 e 32, respectivamente.

Tabela 10 – Parâmetros utilizados para análise econômica de geração de bioeletricidade.

Descrição	Símbolo	Valor
Custo do Biogás	$c_{bio}$ [US\$/kWh]	0,019
Custo de manutenção MCI	$c_{mMCI}$ [US\$/kWh]	0,015
Horas de funcionamento da planta	H [h/ano]	7300
Tarifa da eletricidade	$c_{ele}$ [US\$/kWh]	0,154
Taxa cambial	[R\$/US\$]	3,84

Fonte: Adaptado de Xavier (2016)

Figura 31 – Custo da bioeletricidade produzida ao longo dos anos – Cenário 1.

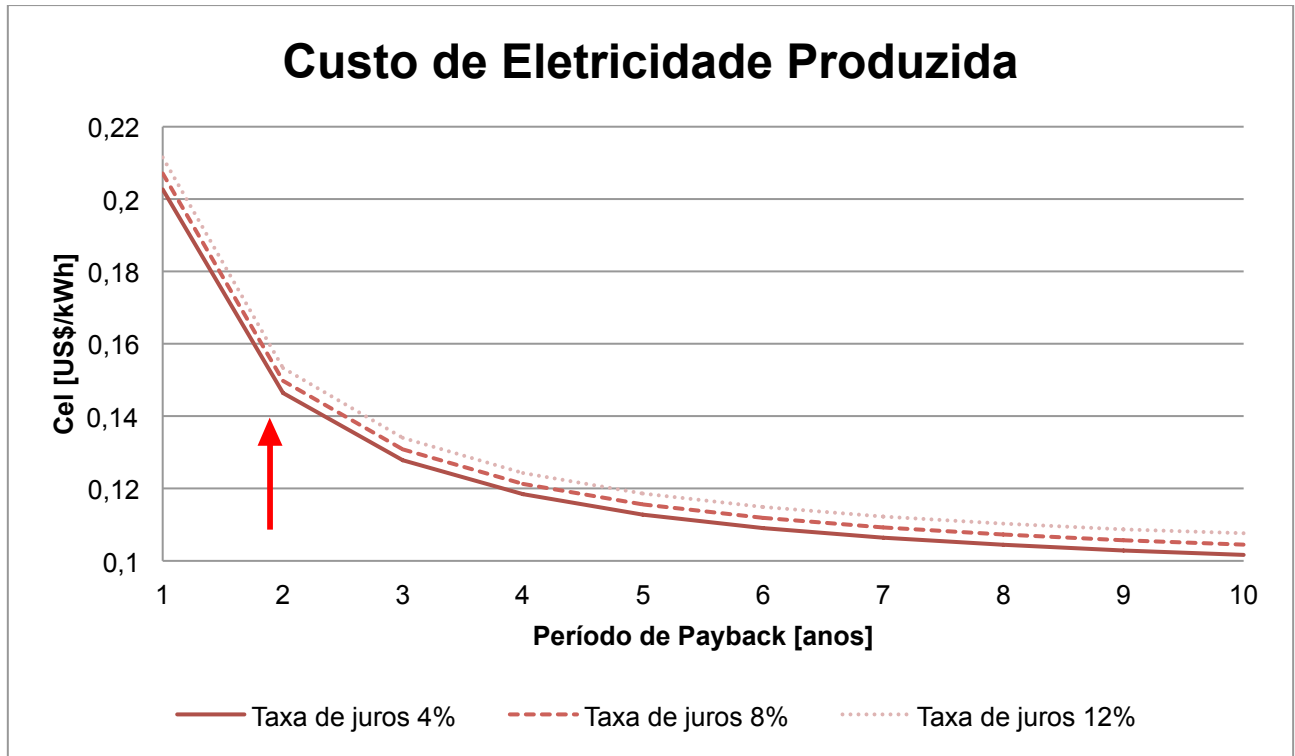
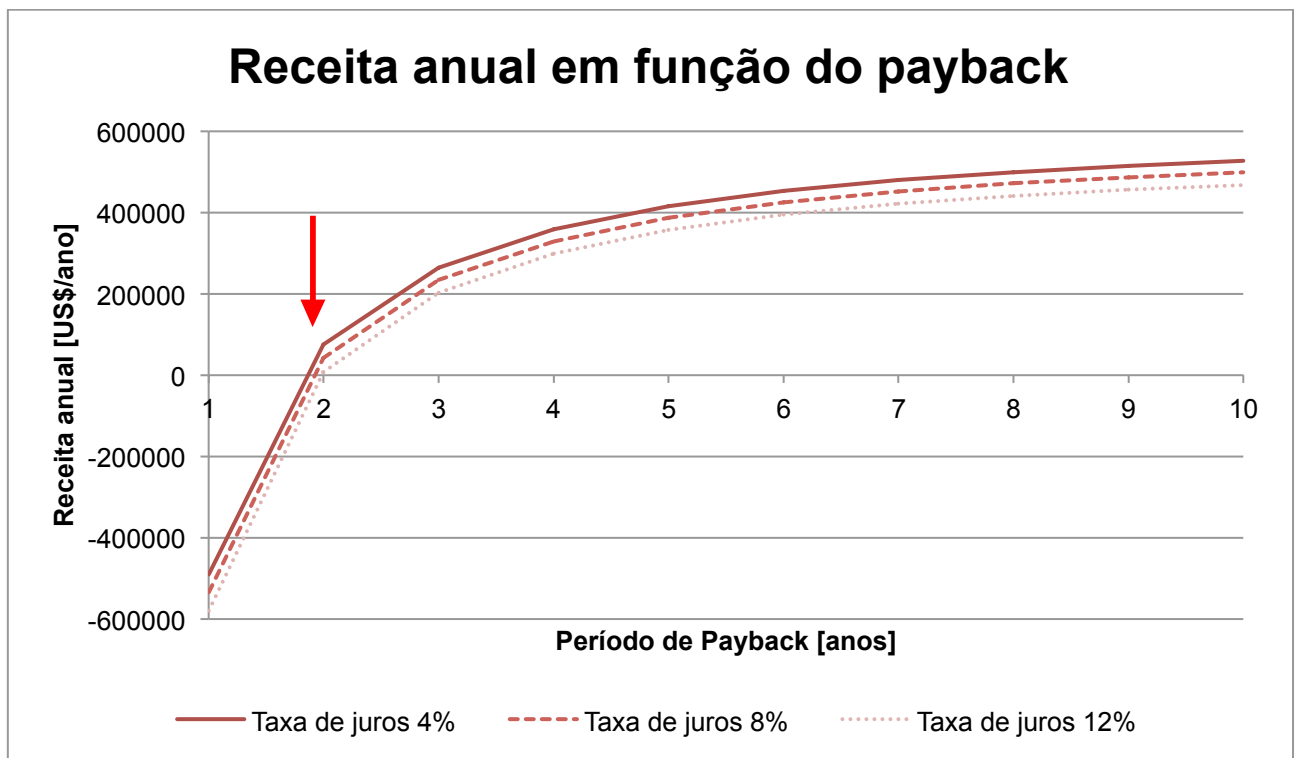


Figura 32 – Receita anual em função do *payback* do sistema – Cenário 1.

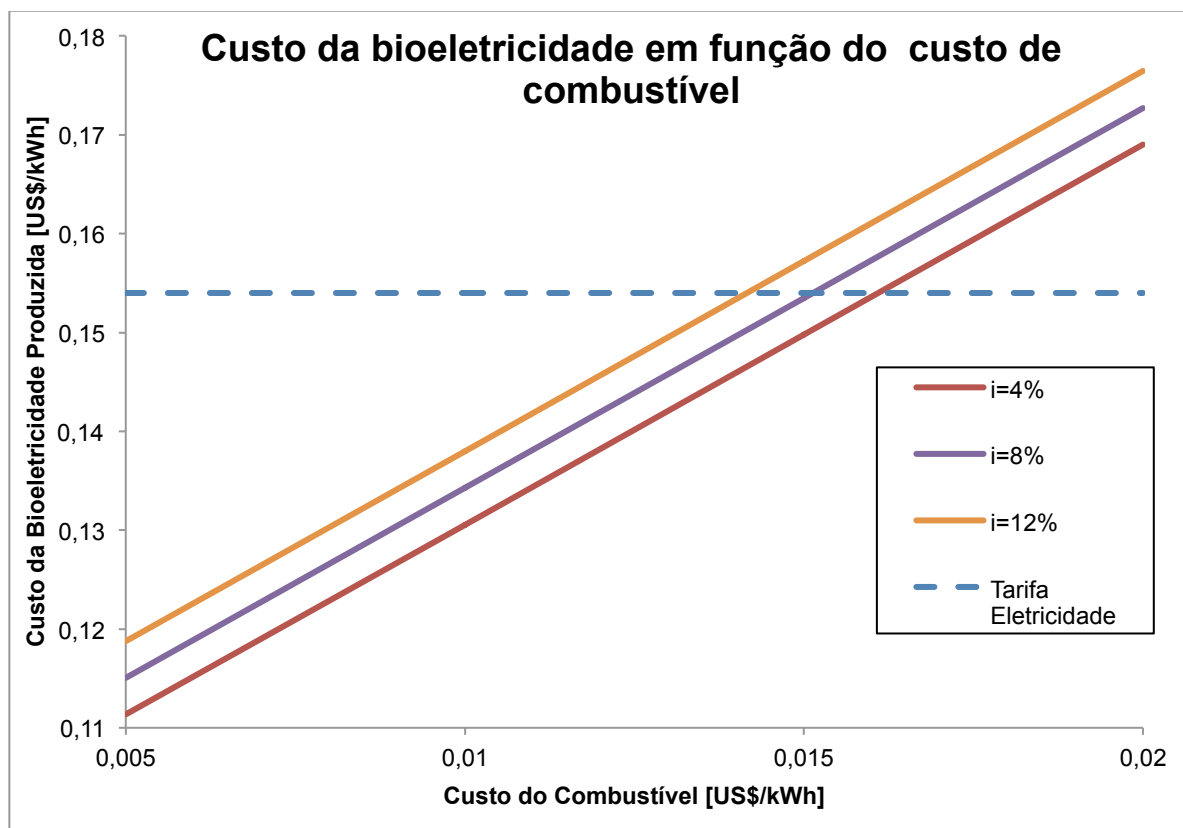




Pode-se observar, das Figuras 31 e 32, que o valor para o período de amotização de capital investido é próximo de 2 anos. Nesse valor, existe receita anual esperada.

Considerando, ainda, variações do custo do combustível, pode-se observar, pela Figura 33, que o custo de produção de bioeletricidade também varia, tendo relação direta com a taxa de juros aplicada. O gráfico apresenta apenas a variação no custo, considerando o segundo ano de geração no fator de anuidade, pois é o ponto em que há receita anual.

Figura 33 – Variação do custo da bioeletricidade produzida no primeiro ano em relação à flutuação do custo do combustível ( $k = 2$ ).



Fonte: Produção própria do autor.

Na Figura 33, pode-se observar, pela variação do custo do combustível, que, enquanto o custo da eletricidade produzida estiver abaixo da tarifa de eletricidade, o sistema demonstra-se viável e passa a dar lucro, pois há receita. Caso o custo da eletricidade produzida seja maior que o do combustível, o sistema teria seu período de *payback* maior do que 2 anos.

## 5.2 ANÁLISE ECONÔMICA PARA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA – CENÁRIO 2

Reto (2002) e Laranci et al. (2009) descrevem as equações necessárias para a análise econômica da geração de um sistema fotovoltaico, considerando custo de implantação, manutenção e operação da planta, além das taxas de juros e o subsídio governamental para instalação.

A equação (17) apresenta o cálculo do custo de produção de eletricidade fotovoltaica –  $c_{el}$  – em US\$/kWh:

$$c_{elFV} = \frac{I_{pFV} \cdot \left(1 - \frac{S_{ub}}{100}\right)}{E_{pFV}} \cdot f + c_{opFV} + c_{manFV} \quad (17)$$

Onde:

$c_{manFV}$ : Custo de manutenção da planta [US\$/kW]

$c_{opFV}$ : Custo de operação da planta [US\$/kW]

$E_{pFV}$ : Energia anual produzida [kWh/ano]

$f$ : Fator de anuidade [1/ano]

$I_{pFV}$ : Investimento na planta Fotovoltaica [US\$]

$S_{ub}$ : Subsídio governamental para a instalação [%]

O fator de anuidade pode ser calculado pela equação (18):

$$f = \frac{q^k(q - 1)}{q^k - 1} \quad (18)$$

$$\text{com } q = 1 + \frac{i}{100}$$

$i$ : Taxa anual de juros [%]

$k$ : Período de retorno de investimentos (Período de *Payback*) [anos]

A energia anual produzida –  $E_{pFV}$  –, em kWh/ano, pode ser calculada pela equação (19):

$$E_{pFV} = \eta_{FV} \cdot H_{TOT} \cdot A_T \quad (19)$$

Onde:

$A_T$ : Área total dos painéis fotovoltaicos [ $m^2$ ]

$\eta_M$ : Eficiência do painel fotovoltaico [%]

E a energia mensal produzida –  $E_{pFVm}$  –, em kWh/mês, pode ser calculada pela equação (20):

$$E_{pFVm} = 0,083 \cdot E_{pFV} \quad (20)$$

Já o custo de investimento na planta fotovoltaica –  $I_{pFV}$  –, em US\$, é calculado pela equação (21):

$$I_{pFV} = C_{FV} \cdot N_{FV} + C_d + C_b \quad (21)$$

Onde:

$C_b$ : Custo do sistema de armazenamento – bateria [US\$], que, nesse caso, é zero, pois o sistema não trabalha com armazenamento do excedente da energia gerada

$C_d$ : Custo de aquisição e instalação de componentes periféricos [US\$] – considerados cerca de 20% do custo dos painéis fotovoltaicos (LARANCI et al., 2009)

$C_{FV}$ : Custo de cada painel fotovoltaico [US\$]

O custo de operação da planta fotovoltaica –  $C_{op}$  –, em US\$, é calculado pela equação (22):

$$C_{opFV} = \frac{n_{tec} \cdot S_{al} \cdot n_w}{12 \cdot E_{pFVm}} \quad (22)$$

Onde:

$n_{tec}$ : Número de técnicos necessários para a operação do sistema

$n_w$ : Número de meses de trabalho, usualmente 13 contabilizando os 12 meses de trabalhos acrescidos do 13º salário, segundo a legislação trabalhista brasileira vigente

$S_{al}$ : Salário mensal dos técnicos [US\$/mês]

Para a determinação de  $n_{tec}$ , Laranci et al. (2009) apresenta recomendações, que foram

apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 – Determinação de  $n_{tec}$  no sistema fotovoltaico.

Recomendação	Condição	Observação
$n_{tec} = 0$	$P \leq 2kW$	
$n_{tec} = 1$	$P > 2kW$	sistemas stand-alone <sup>3</sup>
$n_{tec} = 1$	$2 < P \leq 4kW$	sistemas conectados à rede elétrica
$n_{tec} = 2$	$P > 4kW$	sistemas conectados à rede elétrica

Fonte: Adaptado de Laranci et al. (2009).

O custo de manutenção da planta fotovoltaica –  $C_{man}$  –, em US\$, é calculado pela equação (23):

$$C_{manFV} = \frac{10\% \cdot I_{pLFV}}{12 \cdot E_{pFVm}} \quad (23)$$

Finalmente, o ganho anual com a produção de eletricidade –  $R$  –, em US\$, pode ser calculado pela equação (24):

$$R_{FV} = 12 \cdot E_{pFVm} \cdot (c_{ele} - c_{elFV}) \quad (24)$$

Onde:

$c_{ele}$ : Tarifa da eletricidade na rede [US\$/kWh]

Considerando os dados do sistema fotovoltaico proposto, apresentados na Tabela 12, com taxa cambial 3,84 R\$/US\$ (cotação realizada em março de 2019), preço da eletricidade na rede 0,154 US\$/kWh, com taxas anuais de juros variando entre 4%, 8% e 12%, e variando o subsídio governamental para implantação do sistema entre 0%, 25% e 50%, pode-se projetar o custo da eletricidade produzida ao longo dos anos (Figura 34) e receita anual (Figura 35), a partir dos parâmetros do sistema dimensionado, já calculados, através das equações propostas, e sintetizados na Tabela 12.

666666

<sup>3</sup> Sistemas fotovoltaicos stand-alone: sistemas não conectados à rede elétrica. Utilizam sistemas de armazenamento de energia, como banco de baterias.

Tabela 12 – Parâmetros utilizados para análise econômica de geração fotovoltaica.

Descrição	Símbolo	Valor
Tarifa da eletricidade	$c_{ele}$ [US\$/kWh]	0,154
Custo de investimento da planta	$I_{plFV}$ [US\$]	1.506.960,00
Custo de Operação da Planta <sup>4</sup>	$c_{opFV}$ [US\$/kWh]	0,0058
Custo de Manutenção da Planta	$C_{manFV}$ [US\$/kWh]	0,0499
Número de painéis fotovoltaicos	$N_{FV}$	4186
Modelo do painel fotovoltaico	<i>Sunpower X21-335-BL</i>	
Rendimento dos painéis fotovoltaicos	$\eta_{FV}$ [%]	21,2
Custo de cada painel fotovoltaico <sup>5</sup>	$C_{FV}$ [US\$]	300,00
Irradiação anual incidente <sup>6</sup>	$H_{TOT}$ [kWh/m <sup>2</sup> .ano]	2098,75
Área total dos painéis fotovoltaicos	$A_T$ [m <sup>2</sup> ]	6816,67
Energia produzida em um ano	$E_{pFV}$ [kWh/ano]	3.032.975,00

Fonte: Produção própria do autor.

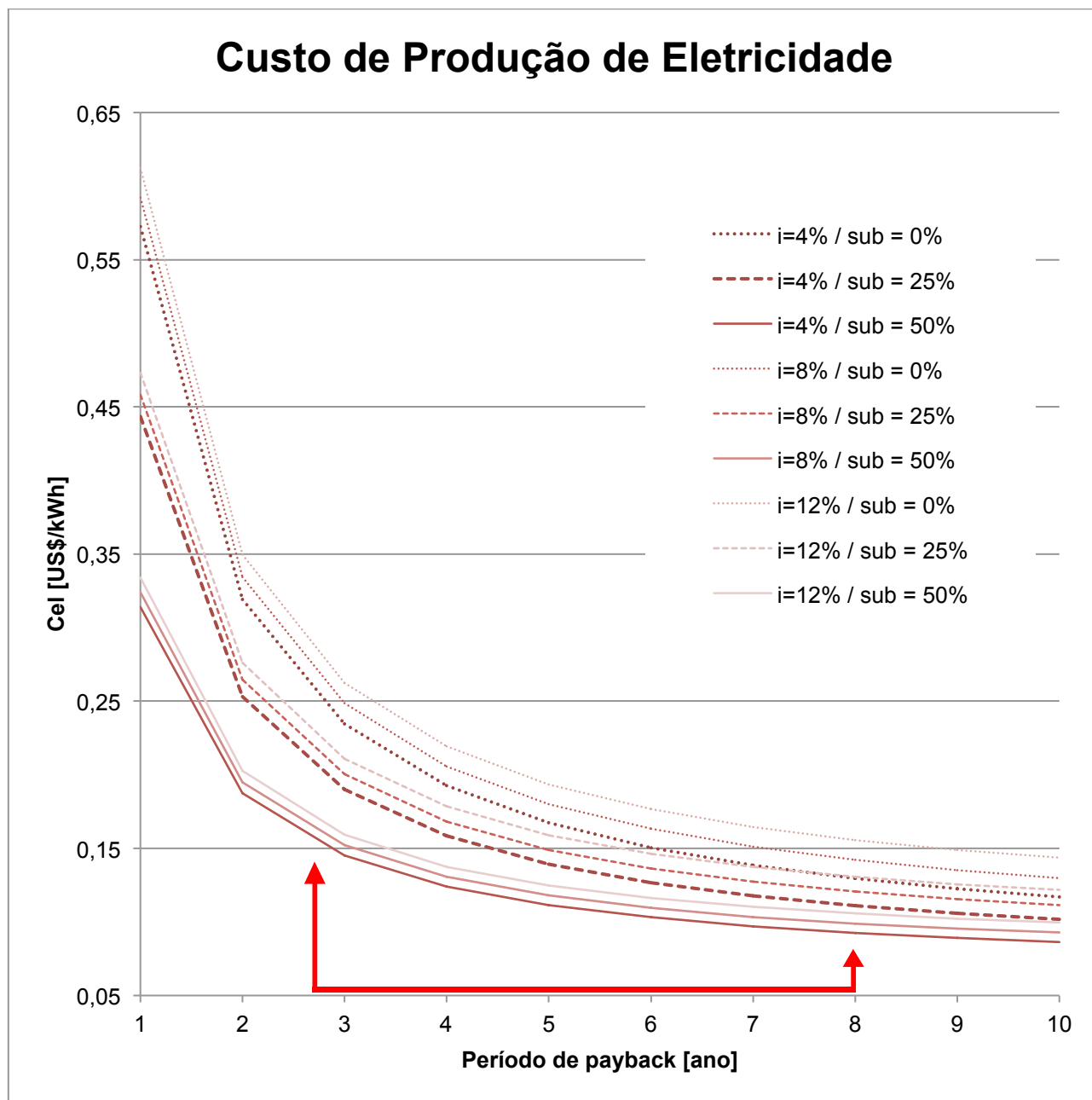
676767

<sup>4</sup> Considerando salário do técnico / piso para técnico em elétrica no estado de São Paulo (R\$2.612,13), convertido em dólar, segundo cotação realizada em março de 2019.

<sup>5</sup> Preço estimado, realizado a partir de cotações realizadas pela internet em março de 2019.

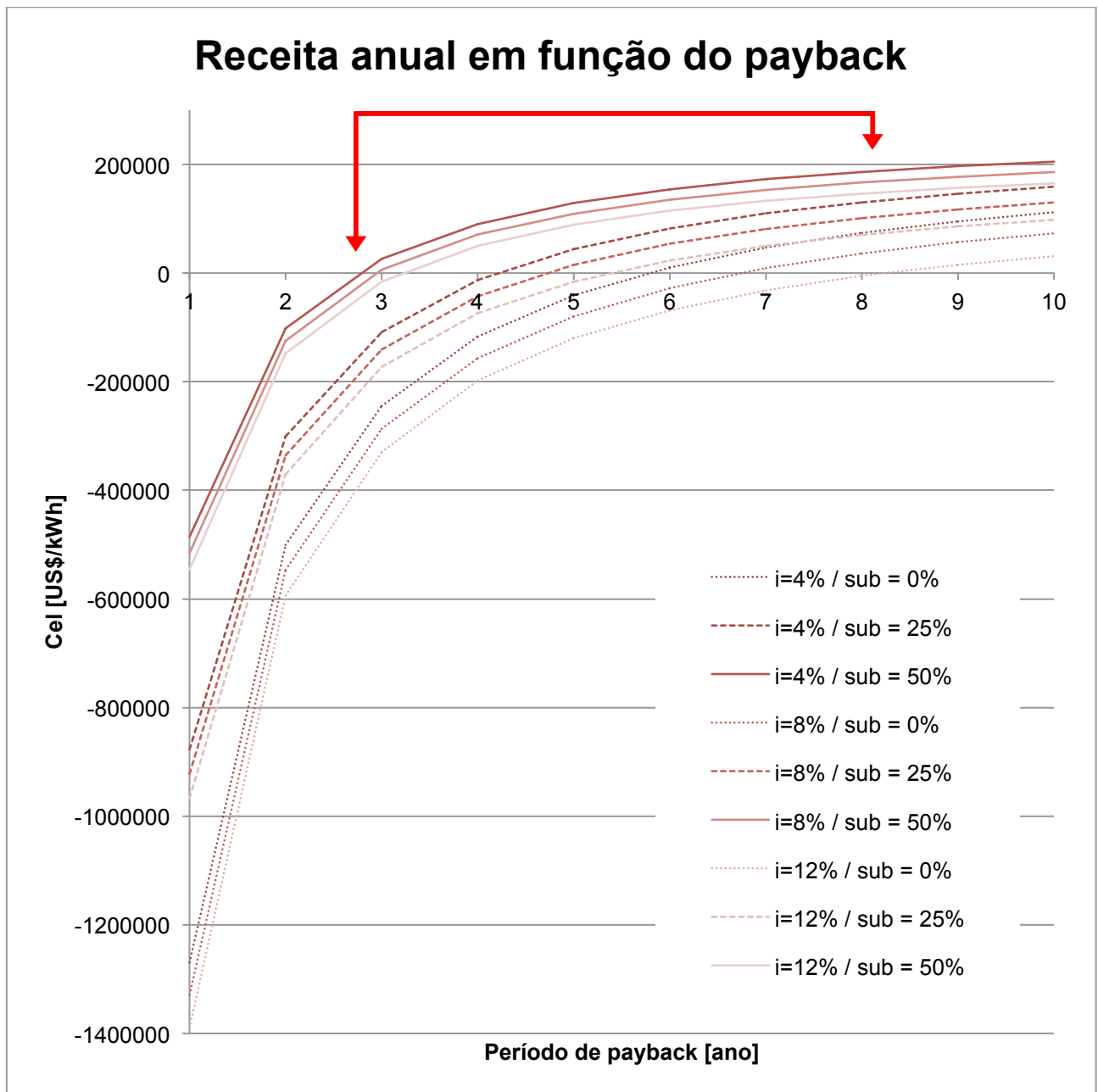
<sup>6</sup> Considerando um ano com 365 dias.

Figura 34 – Custo de produção de eletricidade ao longo dos anos em função da variação de taxas de juros e subsídios governamentais – Cenário 2.



Fonte: Produção própria do autor.

Figura 35 – Receita anual em função do *payback*, variando taxa de juros e subsídios governamentais – Cenário 2.



Fonte: Produção própria do autor.

Pode-se observar, das Figuras 34 e 35, valores para o período de amortização de capital investido entre 2,8 e 8 anos. Nesse intervalo existe receita anual esperada. A partir dessas figuras, verifica-se que a sensibilidade desse tipo de sistema ao subsídio governamental, corroborando com o que afirmam Hongxia et al. (2017), pois esse subsídio tem um impacto muito grande no tempo de retorno do investimento, assim como o custo tecnológico, que também influencia a receita do sistema, pois aumenta muito o valor do investimento para

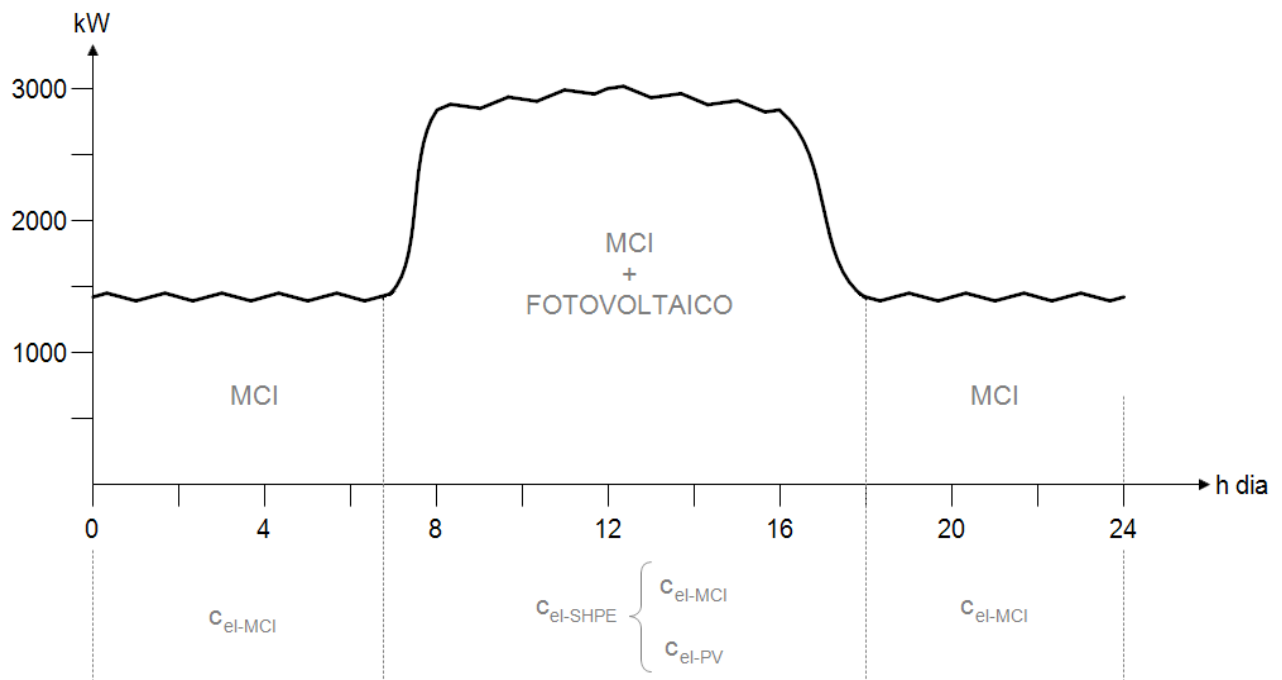
implementação da planta e atrasa o retorno do capital investido.

### 5.3 ANÁLISE ECONÔMICA PARA GERAÇÃO HÍBRIDA – CENÁRIO 3

Para a realização da análise econômica do Sistema Híbrido de Produção de Eletricidade – SHPE –, é necessário realizar uma média ponderada dos custos de geração de eletricidade e da receita anual esperada dos Cenários 1 e 2, a partir da proporção de energia gerada por cada um dos geradores do sistema.

A Figura 36 apresenta um gráfico ilustrativo, que representa a estimativa de geração de cada um dos geradores do Cenário 3. Pode-se observar que, no período de tempo em que o Sistema Fotovoltaico está em funcionamento, tem-se o dobro de potência disponível no sistema, porém, apenas durante um intervalo de horas úteis de incidência solar – que já é considerada no mapa de incidência de radiação solar (Figura 24).

Figura 36 – Gráfico da estimativa de atuação de cada forma de geração do SHPE.



Fonte: Produção própria do autor.

Como consequência da combinação das formas de geração de energia, o custo da eletricidade produzida no SHPE –  $c_{elSHPE}$  – e a receita anual esperada –  $R_{SHPE}$  – são calculados segundo a proporção da energia gerada por cada uma das fontes.

A equação (25) apresenta a forma proposta nesse trabalho para o cálculo do custo da



eletricidade produzida –  $c_{elSHPE}$  – no Cenário 3:

$$c_{elSHPE} = \frac{E_{pMCI} \cdot H \cdot c_{elMCI} + E_{pFV} \cdot c_{elFV}}{E_{pMCI} \cdot H + E_{pFV}} \quad (25)$$

Onde:

$c_{elFV}$ : Custo de produção de eletricidade fotovoltaica [US\$/kWh]

$c_{elMCI}$ : Custo de produção de bioeletricidade [US\$/kWh]

$E_{pFV}$ : Energia anual produzida pelo Sistema Fotovoltaico [kWh/ano]

$E_{pMCI}$ : Eletricidade produzida pelo conjunto Motor/ Gerador [kW]

H: Período equivalente de utilização do equipamento [h/ano]

Já a equação (26) apresenta o cálculo da receita anual esperada –  $R_{SHPE}$  – para o mesmo cenário:

$$R_{SHPE} = (E_{pMCI} \cdot H + E_{pFV}) \cdot (c_{ele} - c_{elSHPE}) \quad (26)$$

Onde:

$c_{ele}$ : Tarifa da eletricidade na rede [US\$/kWh]

$c_{elSHPE}$ : Custo de produção de eletricidade do SHPE [US\$/kWh]

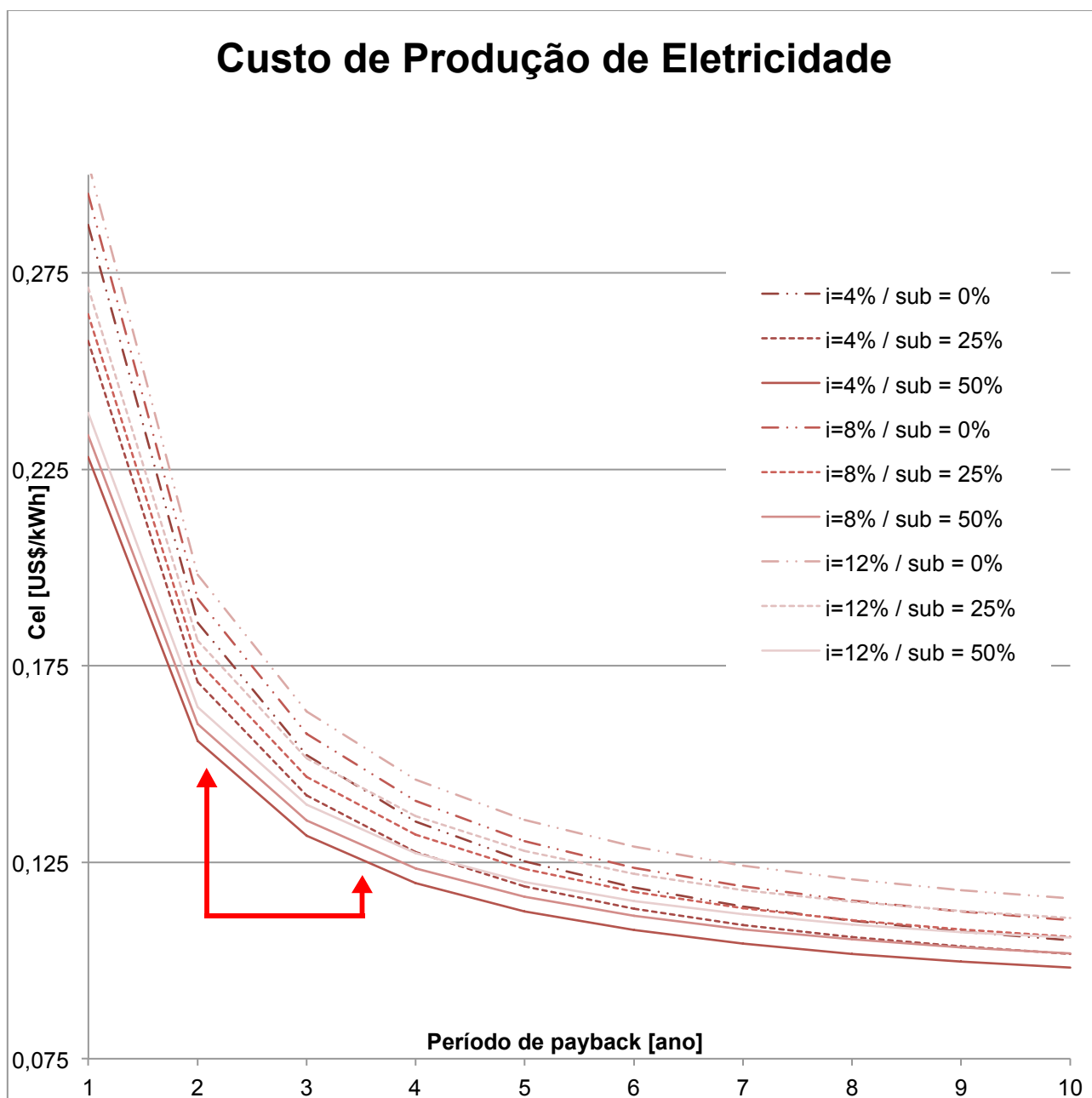
$E_{pFV}$ : Energia anual produzida pelo Sistema Fotovoltaico [kWh/ano]

$E_{pMCI}$ : Eletricidade produzida pelo conjunto Motor /Gerador [kW]

H: Período equivalente de utilização do equipamento [h/ano]

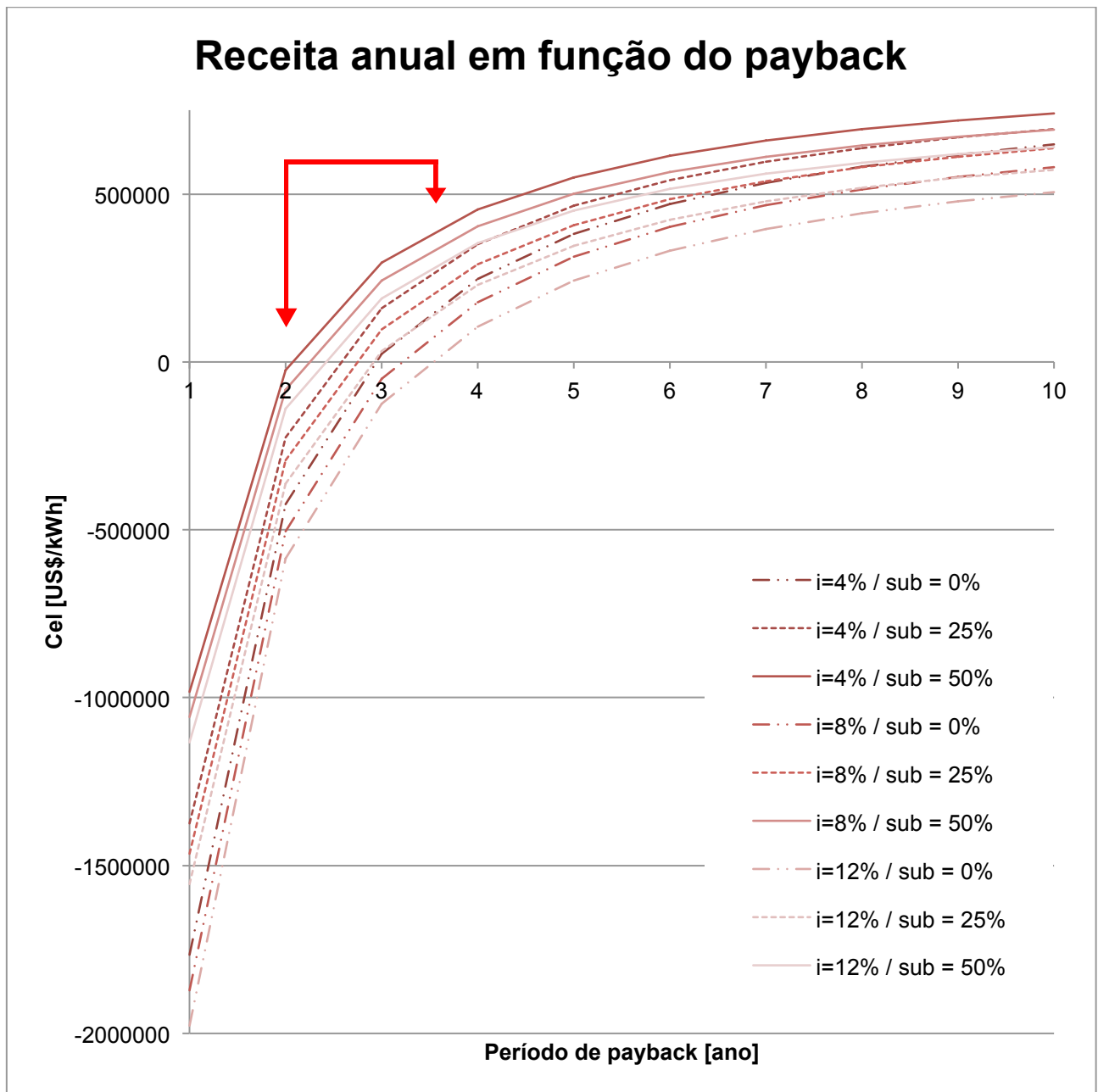
Utilizando as equações (25) e (26), os dados de custo de eletricidade e receita anual esperada, calculados nos Cenários 1 e 2, obtém-se, na Figura 37, o gráfico do custo de produção de eletricidade e, na Figura 38, o gráfico da receita anual esperada, ambos para o Cenário 3.

Figura 37 – Gráfico do custo de produção de eletricidade ao longo dos anos em função da variação de taxas de juros e subsídios governamentais para o SHPE – Cenário 3.



Fonte: Produção própria do autor.

Figura 38 – Receita anual em função do *payback*, variando taxa de juros e subsídios governamentais para o SHPE – Cenário 3.



Fonte: Produção própria do autor.

Pode-se observar, das Figuras 37 e 38, valores para o período de amortização de capital investido entre 2 e 3,5 anos. Nesse intervalo existe receita anual esperada.

## 6 CONCLUSÕES

Foram avaliadas as implementações das duas formas de energia propostas: a partir do biogás de vinhaça e da geração fotovoltaica, dos pontos de vista energético e econômico. Os sistemas propostos foram especificados a partir de dados de equipamentos comerciais, buscando o mesmo potencial de geração entre eles, visto que o objetivo do trabalho é realizar uma comparação entre a operação das duas formas de energia, de forma exclusiva e, posteriormente, combinada. O dimensionamento dos sistemas partiu do potencial de geração de bioeletricidade da usina utilizada no trabalho, que serviu como ponto de partida para todas as análises.

A partir dos resultados apresentados, pôde-se realizar a comparação na esfera econômica dos três cenários propostos, em que a geração de bioeletricidade, a partir do biogás de vinhaça – Cenário 1 – se apresenta como a forma economicamente mais viável entre esses cenários, visto que seu custo de implantação é menor e o retorno do investimento se dá antes dos 2 anos.

Como essa forma de geração – Cenário 1 – realiza a tarefa de utilizar um subproduto do processo de fabricação do etanol, que contém alto nível de nocividade para o meio-ambiente, a sua utilização torna-se uma alternativa viável para a empresa em questão. Além disso, verificou-se a sensibilidade desse sistema em relação à variação do custo de combustível, o que pode deslocar o período de retorno do investimento.

Em relação ao Sistema Fotovoltaico – Cenário 2 –, pôde-se observar que o retorno do investimento varia entre 2,8 e 8 anos, dependendo diretamente do subsídio governamental para sua implantação, evidenciando, deste modo, o impacto direto de políticas governamentais para minimizar, principalmente, o custo tecnológico de sua implementação.

Quando se analisa o Sistema Híbrido de Produção de Eletricidade – Cenário 3 –, que também demonstra alta sensibilidade ao valor do subsídio governamental (devido o fato do Sistema Fotovoltaico também compor esse sistema), do ponto de vista econômico, o retorno do investimento ocorre entre 2 e 3,5 anos, demonstrando que a implementação desse sistema é mais viável do que a exclusiva do Sistema Fotovoltaico.

Em suma, do ponto de vista econômico, os sistemas são ranqueados, em ordem crescente de viabilidade, como: operação exclusiva com biogás de vinhaça – Cenário 1 –, seguido da produção híbrida de eletricidade – Cenário 3 – e, por último, a implantação exclusiva fotovoltaica – Cenário 2.

É importante ressaltar que as análises econômicas visam a apresentar tendências e

estimativas tanto dos custos de produção de eletricidade quanto do retorno de investimento dos sistemas, visto que os valores indicados podem possuir variações, a partir de flutuações cambiais, de taxas de juros base e de variabilidade da precificação das tecnologias envolvidas.

Como trabalhos futuros, sugere-se a análise energética e econômica, utilizando-se a técnica de cogeração no Sistema de Geração de Bioeletricidade, combinada aos cenários propostos. Para uma análise mais profunda da viabilidade de implantação, propõe-se a análise ambiental, que pode ser discutida a partir da eficiência ecológica dos cenários propostos. Nesse caso, seriam consideradas a eficiência global do sistema e as emissões de gases nocivos para a atmosfera, buscando mensurar os impactos ambientais das plantas em relação à quantidade de energia por elas gerada.

## REFERÊNCIAS

- ABB. **PVS800 Central Inverters**. 2019. Disponível em: <https://new.abb.com/power-converters-inverters/solar/central/pvs800> . Acesso em: 10 maio 2019.
- ABB. **Technical application papers n. 10 photovoltaic plants**. Zurique, 2014.
- ABB. **Treinamento sistema fotovoltaico conceitos e aplicações sobre o sistema fotovoltaico**. São Paulo, 2017.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. **Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências**. Brasília, DF, 2012.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaicos no horizonte 2017-2024**. Brasília, 2017. p. 26.
- APARECIDO, H.; DRUM, L. Estimativa de geração de energia elétrica a partir de biogás de vinhaça. *In: SEMANA ACADÊMICA DO CURSO DE AGRONOMIA*, 10., 2014, Cascavel. **Anais [...]**. Cascavel: FAG, 2014. p. 111–114.
- BALDACIN, A. C. S.; PINTO, G. M. F. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás. **Revista Eletrônica FACP**, v. 3, n. 7, p. 1–47, 2015. Disponível em: <http://revista.facp.com.br/index.php/reFACP/article/view/35>. Acesso em: 30 jun. 2018.
- CAMILO, H. F.; UDAETA, M. E. M.; VEIGA GIMENES, A. L.; GRIMONI, J. A. B. Assessment of photovoltaic distributed generation: issues of grid connected systems through the consumer side applied to a case study of Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 71, n. sept. 2015, p. 712–719, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.099>. Acesso em: 08 dez. 2017.
- CATERPILLAR. **Gas generator set product ratings summary**. 2019a. Disponível em: <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20180601-30390-17734>. Acesso em: 08 set. 2019.
- CATERPILLAR. **CG260-12**. 2019b. Disponível em: [https://www.cat.com/en\\_ZA/products/new/power-systems/electric-power-generation/gas-generator-sets/2661581332381461.html](https://www.cat.com/en_ZA/products/new/power-systems/electric-power-generation/gas-generator-sets/2661581332381461.html). Acesso em: 08 set. 2019.
- CARVALHO, D. M. S. **Análise e caracterização energética de sistemas fotovoltaicos de baixa potência com ligação à rede eléctrica**. 2011. 91 f. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores) - Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - FEUP, Universidade do Porto, Porto, 2011.
- CHAKRABORTY, C.; HO-CHING IU, H.; DAH-CHUAN LU, D. Power converters, control, and energy management for distributed generation. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Liverpool, v. 62, n. 7, p. 4466–4470, 2015. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=7109223>. Liverpool:

Liverpool John Moores University, 2011.

CHEN, W.; SONG, H. Optimal subsidies for distributed photovoltaic generation: maximizing net policy benefits. **Mitigation and adaptation strategies for global change**, Basileia, v. 22, n. 3, p. 503–518, 2017.

CHEN, X.; HU, S. Distributed generation placement for power distribution networks. **Journal of Circuits, Systems and Computers**, Singapura, v. 24, n. 01, p. 1550009, 2015. Disponível em: <http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218126615500097>. Acesso em: 10. dez. 2017.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C.; ABREU, F. C. Geração de energia elétrica a partir do biogás proveniente do tratamento de esgoto utilizando um grupo gerador de 18 kW. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, 5., 2006, Brasília. **Anais [...]**. Brasília: UnB, 2006. p. 1–12.

CORONADO, C. R.; YOSHIOKA, J. T.; SILVEIRA, J. L. Electricity, hot water and cold water production from biomass. Energetic and economical analysis of the compact system of cogeneration run with woodgas from a small downdraft gasifier. **Renewable Energy**, Amsterdã, v. 36, n. 6, p. 1861–1868, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2010.11.021>. Acesso em: 20 fev. 2019.

COSTA, R. F. S. **Produção de biogás a partir de vinhaça**. 2014. 62 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Química) - Instituto Municipal de Ensino Superior de Assis, Fundação Educacional do Município de Assis, Assis, 2014.

FARIA, H.; TRIGOSO, F. B. M.; CAVALCANTI, J. A. M. Review of distributed generation with photovoltaic grid connected systems in Brazil: challenges and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 75, n. sept. 2015, p. 469–475, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.076>. Acesso em: 08 dez. 2017.

FAPESP - FUNDAÇÃO DE AMPARO À PESQUISA DO ESTADO DE SÃO PAULO (São Paulo). **Vinhaça para gerar energia**. 2015. Disponível em: [http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2015/12/068-071\\_Vinhaca\\_238.pdf](http://revistapesquisa.fapesp.br/wp-content/uploads/2015/12/068-071_Vinhaca_238.pdf). Acesso em: 14 maio 2017.

GLOBO RURAL. **Usina do grupo Santa Adélia e Pioneiros Bioenergia unem operações**. 2011. Disponível em: <http://revistagloborural.globo.com/Revista/Common/0,,ERT235049-18077,00.html>. Acesso em: 27 fev. 2019.

GROSSMANN, W.; GROSSMANN, I.; STEININGER, K. W. Solar electricity supply isolines of generation capacity and storage. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, Washington, v. 112, n. 12, p. 3663–3668, 2015. Disponível em: <http://www.pnas.org/lookup/doi/10.1073/pnas.1316781112>. Acesso em: 08 dez. 2017.

GUERRERO-RODRÍGUEZ, N. F.; REY-BOUÉ, A. B.; HERRERO-DE LUCAS, L. C.; MARTINEZ-RODRIGO, F. Control and synchronization algorithms for a grid-connected photovoltaic system under harmonic distortions, frequency variations and unbalances. **Renewable Energy**, Amsterdã, v. 80, p. 380–395, 2015.

HONGXIA, Z.; YUQING, T.; DEYING, C. Application of solar photovoltaic generation in the world. *In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL, AERONAUTICAL AND AUTOMOTIVE ENGINEERING*, 2017, Malacca. **Proceedings** [...]. Malacca: MATEC Web of Conferences, 2017. p. 8–11.

IEA. **IEA sees great potential for solar, providing up to a quarter of world electricity by 2050**. Disponível em: <http://www.iea.org/newsroom/news/2010/may/2010-05-11-.html>. Acesso em: 20 dez. 2017.

JO, J. H.; CROSS, J.; ROSE, Z.; DAEBEL, E.; VERDERBER, A.; LOOMIS, D. G.. Financing options and economic impact: distributed generation using solar photovoltaic systems in Normal. **AIMS Energy**, Illinois, v. 4, n. 3, p. 504–516, 2016. Disponível em: <http://www.aimspress.com/journal/energy>. Acesso em: 09 dez. 2017.

ALVEZ, J. S. **Especial trator: entenda os ciclos de operação dos motores de combustão. Máquinas Agrícolas & Inovações**. 2020. Disponível em: <http://portalmaquinasagricolas.com.br/especial-trator-entenda-os-ciclos-de-operacao-dos-motores-de-combustao/>. Acesso em: 07 mar. 2020.

LARANCI, P.; SILVEIRA, J. L.; LAMAS, W. Q. Solar 1.1: development of software for selecting commercially available photovoltaic panels, including the economic analysis. **Revista de Engenharia Térmica**, Curitiba, v. 8, n. 2, p. 13, 2009.

LEITE, L.; BOAVENTURA, W.; ERRICO, L.; CARDOSO, E.; DUTRA, R.; LOPES, B. Integrated voltage regulation in distribution grids with photovoltaic distribution generation assisted by telecommunication infrastructure. **Electric Power Systems Research**, Amsterdã, v. 136, p. 110–124, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.epsr.2016.02.016>. Acesso em: 09 dez. 2017.

LUNA, A.; ROCABERT, J.; CANDELA, J. I.; HERMOSO, J. R.; TEODORESCU, R.; BLAABJERG, F.; RODRÍGUEZ, P. Grid voltage synchronization for distributed generation systems under grid fault conditions. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Liverpool, v. 51, n. 4, p. 3414–3425, 2015.

MACHIN, E. B. **Análise Técnica, Econômica e Ecológica da Incorporação de Sistemas de Gaseificação de Bagaço de Cana-de-Açúcar no Setor Sucroalcooleiro: uso de ciclos combinados para o aumento da oferta de eletricidade**. 2015. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2015.

MARIANO, M.; SANTOS, D.; COSTA, H. K. M.; MOUTINHO, E.; MIURA, F. Biogás produzido a partir de vinhaça: estudo técnico e normativo. *In: CONGRESSO SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL*, 10., 2015, São Paulo. **Anais** [...]. São Paulo: USP, 2015.

MARTINS, E. B. P. F. R.; COSTA, A. R. G. R. S.; RÜTHER, F. J. L. DE L. R.; ABREU, S. L.; PEREIRA, G. M. T. S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 88 p.



MORALES, D. S. **Maximum power point tracking (MPPT) algorithms for photovoltaic systems**, 2010. 73 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia) - Faculty of Electronics, Communications and Automation, Aalto University School of Science and Technology, Otaniemi, 2010.

NOGUEIRA, M. A. F. S.; GARCIA, M. S. Gestão dos resíduos do setor industrial sucroenergético: estudo de caso de uma usina no município de Rio Brillhante, Mato Grosso do Sul. **Revista Eletronica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**: REGET, Santa Maria, v. 17, n. 17, p.3275-3283, dez. 2013. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/10444/pdf>. Acesso em: 10 maio 2017.

PARSAEE, M.; KIANI, M. K. D.; KARIMI, K. A review of biogas production from sugarcane vinasse. **Biomass and Bioenergy**, v. 122, n. may 2018, p. 117–125, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.01.034>. Acesso em: 15 jul. 2018.

PATRAO, I.; FIGUERES, E.; GARCERÁ, G.; GONZÁLEZ-MEDINA, R. Microgrid architectures for low voltage distributed generation. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 43, p. 415–424, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.11.054>. Acesso em: 9 dez. 2017.

PAULINO, R. F. S. **Uso do biogás para produção de biohidrogênio**: eletrólise versus reforma a vapor. 2017. 111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2017.

RETO, A. B. A. **Análise da performance de um sistema solar fotovoltaico de 2kW**, 2002. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2002.

RODRIGUES, A.; SANTOS, R. F.; AVACI, A. B.; ROSA, H. A.; CHAVES, L. I.; GASPARIN, E. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica a partir da vinhaça. **Acta Iguazu**, Cascavel, v. 1, n. 2, p. 80–93, 2012.

RUIZ, J. M. A. **Aspectos técnicos, econômicos e ambientais da implementação de energia eólica e solar fotovoltaica em edifícios**, 2016. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2016.

RUIZ, J. M. A.; SILVEIRA, J. L.; VOROBIEF, C. L. TUNA, C. E. Análise de eficiência ambiental de um sistema híbrido solar fotovoltaico – eólico. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR, 6., 2016, Belo Horizonte. **Anais [...]**. Belo Horizonte: ABENS, 2016.

SADEGHI, M.; KALANTAR, M. Economic, environmental and technical effects of photovoltaic modules in distribution networks in comparison with the conventional units. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdã, v. 118, p. 4–18, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.01.040>. Acesso em: 10 dez. 2017.

SILVA, E. N. M.; RODRIGUES, A. B.; GUIA DA SILVA, M. Stochastic assessment of the impact of photovoltaic distributed generation on the power quality indices of distribution networks. **Electric Power Systems Research**, Amsterdã, v. 135, p. 59–67, 2016. Disponível

em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779616300530>. Acesso em: 10 dez. 2017.

SILVEIRA, J. L.; LAMAS, W. D. Q.; TUNA, C. E.; VILLELA, I. A. D. C.; MIRO, L. S. Ecological efficiency and thermoeconomic analysis of a cogeneration system at a hospital. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Amsterdã, v. 16, n. 5, p. 2894–2906, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.007>. Acesso em: 15 jul. 2018.

SILVIA, M.; SZYMANSKI, E.; BALBINOT, R.; SCHIRMER, W. N. Biodigestão anaeróbia da vinhaça : aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono: estudo de caso. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 31, n. 4, p. 901–912, 2010.

SOLSTÍCIO ENERGIA. **Benefícios da energia solar**. 2017. Disponível em: <http://www.solsticioenergia.com>. Acesso em: 23 out. 2017.

SOUZA, S. N. M. **Manual de geração de energia elétrica a partir do biogás no meio rural**. Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2016. 47 p.

SUZUKI, A. B. P.; FERNANDES, D. M.; FARIA, R. A. P.; VIDAL, T. C. M. Uso de biogás em motores de combustão interna. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias**, Guarapuava, v. 4, n. 1, p. 221–237, 2012.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (São Paulo). **Estado da arte da vinhaça**. 2016. Disponível em: <http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=35414851>. Acesso em: 14 maio 2017.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (São Paulo). **Centro-Sul fecha a safra 2016/2017 com retração de 1,71% na moagem de cana**. 2017a. Disponível em: <http://www.unica.com.br/na-midia/44504457920324775593/centro-sul-fecha-a-safra-2016-por-cento2F2017-com-retracao-de-1-por-cento2C71-por-cento-na-moagem-de-cana/>. Acesso em: 14 maio 2017.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (São Paulo). **Boletim: a bioeletricidade da cana em números**. 2017b. Disponível em: <http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=15670056>. Acesso em: 14 maio 2017.

USINA SANTA ADÉLIA (São Paulo). **Produtos: energia elétrica**. 2019. Disponível em: <http://site.usinasantaadelia.com.br/>. Acesso em: 26 fev. 2019.

WYLEN, G. J. V.; SONNTAG, R. E.; BORGNÄKKE, C. **Fundamentos da termodinâmica**. 6. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

VANE, L. F. **Análise energética, exergética e ecológica da incorporação da produção de hidrogênio ao setor sucroalcooleiro**. 2012. 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2012.

WENDLING JÚNIOR, J. M. A. **Proposta de controlador de carga com MPPT utilizando**

**LabVIEW**. 2016. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2016.

**WILDNER, F. D. Estudo experimental da variação de velocidade de combustão para diferentes combustíveis, relações de mistura e relações de compressão em um motor ASTM CFR**. 2006. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2006.

**XAVIER, B. H. Aspectos termodinâmicos, ecológicos e econômicos de sistemas de cogeração com motores de combustão interna operando com gás natural, biogás e gás de síntese**. 2016. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Guaratinguetá, 2016.

WU, Y.-K.; LIN, J.-H.; LIN, H.-J. Standards and guidelines for grid-connected photovoltaic generation systems: a review and comparison. **IEEE Transactions on Industry Applications**, Liverpool, v. 53, n. 4, p. 3205-3216, 2017.