

**KARIME ABDELNUR CHAMMA**

**OPÇÕES DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA ENTRESSAFRA PARA UMA USINA  
DE AÇÚCAR E ÁLCOOL**

São Paulo

2016

KARIME ABDELNUR CHAMMA

**OPÇÕES DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA ENTRESSAFRA PARA UMA USINA  
DE AÇÚCAR E ÁLCOOL**

Monografia apresentada como forma de avaliação final do curso de Especialização em Energias Renováveis do Programa de Educação Contínua da Escola Politécnica da USP.

Orientadora: Profa. Dra. Suani Teixeira Coelho  
Co-orientador: Prof. Dr. Cláudio Pacheco

São Paulo

2016

## Catalogação-na-publicação

Abdelnur Chamma, Karime

OPÇÕES DE GERAÇÃO DE ENERGIA NA ENTRESSAFRA PARA UMA  
USINA DE AÇÚCAR E ÁLCOOL / K. Abdelnur Chamma -- São Paulo, 2016.  
58 p.

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída  
e Eficiência Energética) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.  
PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Energia Renovável 2.Geração Distribuída 3.Energia Solar 4.Biogás de  
Vinhaça I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de  
Educação Continuada em Engenharia II.t.

## **AGRADECIMENTOS**

À Professora Suan Coelho e ao Professor Cláudio Pacheco pela orientação e estímulo durante o trabalho.

À Usina em estudo pelo fornecimento de informações para elaboração do trabalho e constante apoio.

A minha família e amigos estiveram ao meu lado e contribuíram direta ou indiretamente durante o projeto.

## **RESUMO**

Nesse trabalho foram investigadas algumas tecnologias já comercializadas no país de forma a suprir o consumo de uma usina de açúcar e álcool durante o período da entressafra. Para isso analisou-se a geração de energia elétrica através do biogás provido da vinhaça e de placas fotovoltaicas. Fez-se uso das Resoluções Normativas 482 e 687 da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) como guia para micro e minigeração distribuída. Levantaram-se informações da radiação e produção de vinhaça disponível na Indústria em estudo e realizaram-se cálculos para projetos básicos de geração. Essa monografia apresenta a análise de viabilidade econômica de tais projetos utilizando a legislação vigente bem como sugestões de aprimoramentos a fim de aumentar os incentivos da autoprodução, como o desconto da TUSD Fio.

**Palavras-chave:** Autoprodução. Biogás de vinhaça. Consumo entressafra. Energia renovável. Energia solar. Geração Distribuída.

## **ABSTRACT**

The objective of this study is to investigate alternative energy supply options to a sugar and ethanol plant during the intercrop period. The generation of electricity through vinasse biogas and solar panels were analyzed. In addition, the Normative Resolutions 482 and 678 published by the National Electric Energy Agency (Aneel) were used as a guide for on-site generation. The radiation and vinessse production data from the industry studied were collected and used for basic calculations. This monograph presents the economic feasibility analysis of such projects using current legislation as well as suggestions for improvements in order to increase the incentives for autoproduction.

Keywords: Renewable Energy. Solar Energy. On-site Generation. Intercrop consumption

## **LISTA DE FIGURAS**

Figura 1 – Média Anual da Incidência Solar Global do Estado de São Paulo. Fonte: Governo do Estado de São Paulo (2013).....	22
Figura 2 - Processamento da cana para a produção de açúcar e etanol. Fonte: Seabra (2008) .....	24
Figura 3 – Painel Solar Fotovoltaico Canadian. Fonte: Neosolar. ....	43
Figura 4 - Inversor Solar Fronius. Fonte: Neosolar .....	43
Figura 5 - Esquema do Sistema Fotovoltaico. Elaboração: Autor. ....	48

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Mix de produção de Açúcar e Etanol ao longo das Safras. Fonte: Nastari (2016).....	17
Gráfico 2 – Potencial técnico de oferta da bioeletricidade sucroenergética para a rede elétrica (TWh) Elaboração: ÚNICA (2016) .....	20
Gráfico 3 – Número de conexões de Geração Distribuída em 2015. Fonte: Aneel (2016).....	30
Gráfico 4 – Número de conexões acumulado até Setembro/16. Fonte: Aneel (2016) .....	30
Gráfico 5 – Potência Total Instalada (kW) de micro e minigeração distribuída. Fonte: Aneel (2016).....	31
Gráfico 6 - Distribuição por classe de consumo. Fonte: Aneel (2016).....	31
Gráfico 7 – Faixas de Potência (kW). Fonte: Aneel (2016) .....	32
Gráfico 8 – Produção de Vinhaça em 2015.....	35
Gráfico 9 – Média mensal de Irradiação Solar diária. Fonte: Sundata. Elaboração: Autor.....	42

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Produção mensal de Vinhaça no ano de 2015 .....	34
Tabela 2 – Produção média mensal de Vinhaça em m <sup>3</sup> /h.....	35
Tabela 3 – Cálculo do potencial de geração de Energia Elétrica a partir de toda a Vinhaça produzida na Safra. ....	38
Tabela 4 - Cálculo da Vinhaça necessária para geração da energia consumida na Entressafra.....	39
Tabela 5 - Cálculo da Vinhaça necessária para geração da energia consumida na Entressafra no Horário de Ponta. ....	40
Tabela 6 – Média Mensal de Irradiação Solar Diária. Fonte: Sundata. ....	41
Tabela 7 - Cálculo de geração de Energia Elétrica a partir da Irradiação disponível.	46
Tabela 8 - Cálculo de geração de Energia Elétrica a partir da Irradiação disponível para o horário de ponta. ....	47
Tabela 9 - Custo adotado de Equipamentos e Manutenção. ....	48
Tabela 10 – Custo do Sistema de Geração de Energia Elétrica através do Biodigestor. ....	49
Tabela 11 - Custos de Equipamentos. ....	49
Tabela 12 - Custos do sistema de geração de Energia Elétrica através de Placas Fotovoltaicas. ....	49
Tabela 13 - Tarifa de Uso de Distribuição. ....	50
Tabela 14 – Tarifa de Energia. ....	51
Tabela 15 – Fluxo de Caixa (Legislação Atual). ....	51
Tabela 16 - Fluxo de Caixa com Desconto na TUSD Fio.....	52
Tabela 17 - Retorno do Investimento com a Legislação Atual. ....	53
Tabela 18 - Retorno do Investimento com o Desconto na TUSD Fio.....	53

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	12
2. OBJETIVO.....	13
3. JUSTIFICATIVA.....	14
4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	15
4.1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	15
4.1.1. Setor Sucroenergético .....	15
4.1.2. Produção de Energia a partir da Biomassa de Cana-de-açúcar.....	18
4.2. FONTES RENOVAVEIS DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....	20
4.2.1. Energia Solar.....	20
4.2.2. Energia da Cana-de-Açúcar .....	23
4.2.2.1. Utilização eficiente do Bagaço .....	23
4.2.2.2. Utilização de Biogás de Vinhaça .....	25
4.3. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA.....	27
4.3.1. Geração Distribuída no Brasil.....	27
4.3.2. Micro e Minigeração Distribuída .....	28
5. ANÁLISE DE GERAÇÃO DE ENERGIA NO PERÍODO DE ENTRESSAFRA....	32
5.1. Indústria estudada.....	32
5.1.1. Energia consumida na Entressafra.....	33
5.2. Cenário 1: Geração de Energia a partir do Biogás de Vinhaça .....	34
5.2.1. Produção de Vinhaça .....	34
5.2.2. Metodologia para cálculo de Geração a partir do Biogás .....	36
5.3. Cenário 2: Geração de Energia a partir de painéis fotovoltaicos .....	41
5.3.1. Disponibilidade de Radiação .....	41
5.3.2. Painel Fotovoltaico e Inversor.....	42
5.3.3. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico.....	43
5.4. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA .....	48
5.4.1. Investimentos Iniciais.....	48
5.4.1.1. Cenário 1: Geração de Energia a partir do Biogás de Vinhaça .....	48
5.4.1.2. Cenário 2: Geração de Energia a partir de painéis fotovoltaicos.....	49
5.4.2. Fluxo de Caixa.....	50
5.4.2.1. Legislação Atual .....	50

5.4.2.2. Sugestão de Desconto na TUSD Fio .....	51
5.4.3. Retorno do Investimento.....	52
5.4.3.1. Legislação Atual .....	53
5.4.3.2. Sugestão de Desconto na TUSD Fio .....	53
6. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES .....	53
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	54

## 1. INTRODUÇÃO

Devido à capacidade de gerar energia renovável por meio de fontes alternativas, o Brasil hoje se destaca mundialmente por sua matriz energética limpa. Segundo o Banco de Informações de Geração da Aneel, em Setembro de 2016 aproximadamente 80% da potencia instalada no país provinha de fontes renováveis, incluindo fontes hídricas, solares, nucleares, eólicas, térmicas que utilizam resíduos renováveis, entre outras.

Concomitantemente aos investimentos em projetos de energias renováveis, o Brasil já investe em Geração Distribuída (GD), onde a geração de energia acontece próxima ao consumidor ou pelo próprio consumidor. Entre as diversas vantagens da GD, destacam-se a diminuição das perdas por transmissão (com a correspondente redução de custos) e a diversificação da matriz energética. As Resoluções Normativas 482 e 687, assim como o Módulo 3 do PRODIST, são formas de incentivo à GD, beneficiando o autoprodutor de energia elétrica a partir de fontes renováveis e geração qualificada de até 5MW (sendo 3MW para fonte hídrica).

O cenário descrito acima proporciona excelentes oportunidades para indústrias do setor sucroenergético que desejam diminuir os gastos com energia elétrica no período da entressafra e que se enquadram no consumo abaixo de 5 MW.

Atualmente o setor sucroenergético representa uma parcela de aproximadamente 2% do PIB brasileiro. O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar, exportador de açúcar e o segundo maior produtor de etanol do mundo. Por sua vez, a geração de energia a partir do bagaço provido da cana no período de safra, equivale a aproximadamente 7% da potência instalada de energia elétrica no país (ÚNICA, 2016)

Durante o período da entressafra, geralmente entre os meses de dezembro e março, as indústrias de açúcar e etanol consomem significativa quantidade de energia elétrica para que possam manter a manutenção de seus equipamentos, manter em funcionamento seus prédios corporativos e iniciar a planta. Tendo em vista que grande parte das indústrias está localizada no estado de São Paulo, estudam-se maneiras de suprir esse consumo através da geração distribuída.

As usinas produzem enorme quantidade de vinhaça (aproximadamente 10 litros do resíduo para cada 1 litro de álcool produzido), que atualmente são lançadas no campo em forma de adubo. No entanto, o biogás que pode ser obtido dessa fonte é rico em metano, tornando-se um combustível em potencial para a geração de energia. (BNDES; CGEE, 2008)

Em paralelo, índices de radiação significativos e elevadas temperaturas tornam o estado de São Paulo apropriado para a geração de energia solar. Placas fotovoltaicas que transformam a energia proveniente do sol em energia elétrica são fontes renováveis que vem ganhando força no país nos últimos anos e podem ser classificadas como alternativa para a diminuição do consumo da rede.

Dentre as diversas alternativas de geração de energia, o maior desafio ainda é torná-las viáveis economicamente devido ao elevado custo dos equipamentos, instalação e manutenção.

## **2. OBJETIVO**

Essa monografia tem como objetivo estudar projetos básicos de geração de energia a partir de fontes renováveis a fim de suprir o consumo de energia elétrica de usinas produtoras de açúcar e álcool durante o período da entressafra. Dentre as diversas opções de geração de energia renovável, estuda-se a energia solar e a geração a partir do biogás de vinhaça.

Além disso, é realizada a viabilidade econômica dos projetos estudados, tendo como base os montantes gastos nas contas de luz nos momentos em que a usina não gera a própria energia a partir da cogeração. Também serão propostas alterações na legislação a fim de aumentar os incentivos à micro e minigeração e diminuindo o tempo de retorno dos investimentos.

### **3. JUSTIFICATIVA**

Para a produção de açúcar e álcool uma usina necessita de vapor para diversas etapas do processo, entre elas o aquecimento do caldo provido da moagem da cana-de-açúcar.

Durante o período de Safra, o vapor é produzido através da queima de bagaço em caldeiras. Ao sair da caldeira em alta pressão, o vapor passa por uma turbina conectada a um gerador que produz energia elétrica e em seguida é direcionado para o processo. Parte da energia elétrica gerada é consumida pela própria indústria, enquanto o excedente é exportado.

Em contrapartida, durante a entressafra e sem produção de açúcar ou álcool, a usina deixa de exportar e passa a consumir energia elétrica da rede.

Tendo em vista que o consumo de energia elétrica provoca despesas para a indústria na entressafra, essa monografia visa estudar maneiras alternativas de geração de energia no período.

Entre as fontes estudadas encontram-se a energia provida de painéis fotovoltaicos e de biogás de vinhaça.

A escolha da energia solar para o estudo tem como guias o Atlas Solarimétrico do Brasil e o Levantamento do Potencial de Energia Solar Paulista. Nesses documentos é possível perceber que a região de Ribeirão Preto, onde está localizada a Usina em estudo, possui elevado potencial de geração de energia elétrica a partir do sol.

A vinhaça, resíduo proveniente da destilação do caldo da cana-de-açúcar, é altamente poluente e de difícil tratamento. A segunda vertente estudará a geração de energia através de um gerador movido a biogás proveniente do tratamento anaeróbico da vinhaça.

Por fim, será escolhida a alternativa para geração de energia elétrica no período da entressafra que melhor se adequa ao cenário apresentado.

Nas duas alternativas será levada em consideração a Regulação Normativa 687 que permite ao minigerador de até 5MW injetar sua produção na rede elétrica de

distribuição e acumular créditos a serem utilizados em até cinco anos. Dessa maneira, mesmo que energia seja gerada durante a Safra, poderá ser consumida também na entressafra.

## **4. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A Revisão Bibliográfica dessa monografia tem por objetivo apresentar os estudos realizados anteriormente ao início dos cálculos dos projetos de energia solar e energia do biogás de vinhaça para suprir o consumo da entressafra de uma usina de açúcar e etanol. Utilizam-se fontes consistentes a fim de apresentar a contextualização do setor sucroenergético no Brasil, a geração de energia a partir de fontes renováveis e o avanço da Geração Distribuída em nosso país.

### **4.1. CONTEXTUALIZAÇÃO**

A seguir é apresentado o contexto que esse trabalho está inserido, incluindo o setor sucroenergético e o impacto da geração a partir da biomassa de cana-de-açúcar na produção de energia elétrica do Brasil.

#### **4.1.1. Setor Sucroenergético**

A cultura do cultivo da cana-de-açúcar está presente no Brasil desde a época de colônia. Foi no Nordeste, principalmente nas Capitanias de Pernambuco e da Bahia, que os engenhos de açúcar se multiplicaram. O produto era comercializado por Portugal e Holanda, que obtinham elevada lucratividade (MACHADO, 2016).

Em 1857, D. Pedro II elaborou um programa de modernização da produção de açúcar no Brasil, cujo resultado foi o desenvolvimento de novos engenhos que moíam a cana e processavam o açúcar. Pouco depois foram fundadas pelos fornecedores de equipamentos de processamento de açúcar as chamadas “Usinas de Açúcar”, indústrias localizadas no Nordeste e em São Paulo.

Segundo Machado (2016) Após a 1<sup>a</sup> Guerra Mundial de 1914, a indústria Europeia de açúcar foi devastada, o que provocou elevação nos preços do açúcar e

maior atratividade na produção brasileira, principalmente em São Paulo, onde fazendeiros de café desejavam diversificar a sua produção.

A partir desse momento o setor apenas se desenvolveu, buscando maneiras de aumentar a proteção dos canaviais contra pragas e expandir a modernização da colheita e do processo.

Paralelamente, em 1931, foi lançado no Brasil o Decreto 19.717, que tinha como objetivo usar 5% do etanol anidro nacional adicionado à gasolina a fim de incentivar a produção no país (PODER EXECUTIVO, 1931).

Em 1973 o mundo vivenciou a primeira grande crise do petróleo, que quadriplicou os gastos do Brasil com a importação do produto. Dois anos depois, foi lançado no país por meio do Decreto 76.593/75, o Programa Nacional do Álcool (Proálcool), que representava um novo horizonte para a matriz energética Brasileira (UNICA; APEXBRASIL, 2012).

Segundo Michellon, Santos e Rodrigues (2008), entre 1979 e 1986, ocorreu a segunda fase do Proálcool, onde foi estabelecido que todos os postos deveriam vender Etanol a 65% do preço da gasolina, além de criar incentivos para carros movidos ao combustível como fixar em 20% de etanol à gasolina. No entanto, no final dos anos 80, a baixa no preço da gasolina e a alta inflação no Brasil, fez com que o governo cortasse os incentivos ao álcool.

Segundo a Única e ApexBrasil (2012), em 1994, com a diminuição das taxas de exportação e aumento da demanda mundial de açúcar, na Safra 1995/96 o Brasil se tornou o maior exportador de açúcar do mundo.

O desenvolvimento dos conceitos de sustentabilidade, preservação do meio ambiente, diminuição da emissão de CO<sub>2</sub> concomitantemente ao surgimento do carro flex em 2003, compilaram para o aumento da produção de etanol.

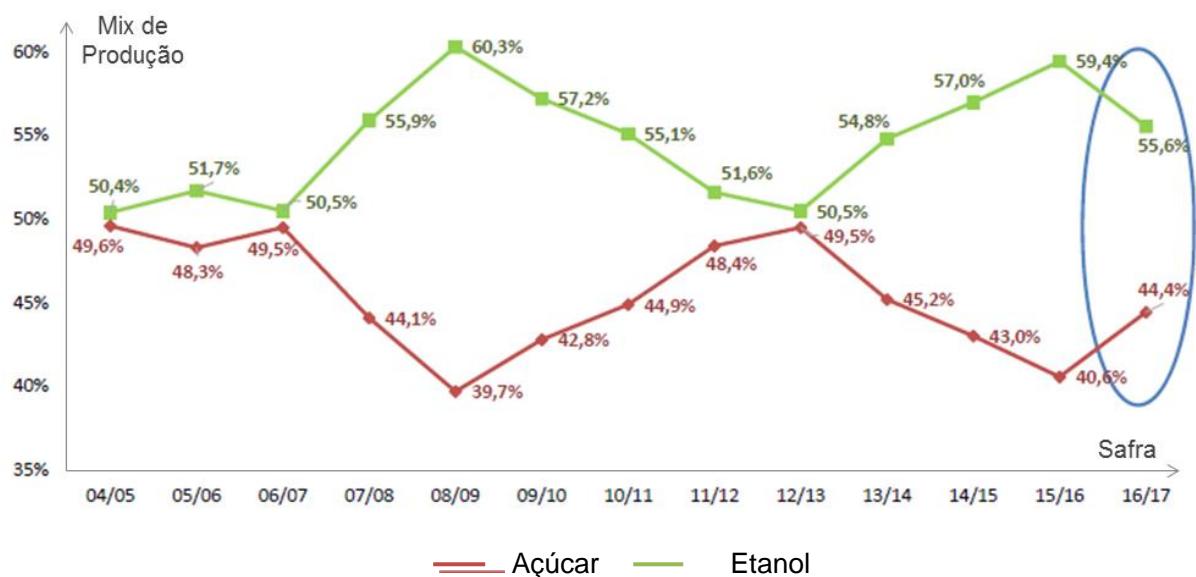
O consumo de etanol hidratado pelos automóveis flex, combinado à mistura obrigatória atual de 27% de etanol anidro na gasolina, reduziu a emissão de gases de efeito estufa (GEE) em mais de 300 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub>eq desde março de 2003, até maio de 2015 (UNICA, 2015).

Hoje, o Setor Sucroenergético representa no Brasil uma parcela significativa na economia. Segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA), em 2015 o valor bruto movimentado pela cadeia sucroenergética superou 100 bilhões de dólares, equivalente a aproximadamente 2% do PIB brasileiro.

O Brasil é o maior produtor de cana-de-açúcar e exportador de açúcar do mundo. Na safra 2015/2016 foram processadas 665,6 milhões de toneladas de cana-de-açúcar, e produzidas 33,5 milhões de toneladas de açúcar. (CONAB, 2016).

Além de ser destaque na exportação e açúcar, o Brasil também é ícone mundial na produção de etanol, sendo o segundo maior produtor, perdendo apenas para os Estados Unidos (UNICA, 2015). O volume produzido em bilhões de litros atingiu 30,5 na Safra 2015/2016 (CONAB, 2016).

A escolha das usinas entre a produção de açúcar e etanol pode variar de acordo com a Safra e a atratividade de cada produto. No Gráfico 1 elaborado por Nastari (2016), é possível acompanhar a variação no mix de produção ao longo das Safras e a previsão do aumento na produção de açúcar e diminuição de etanol para a Safra 16/17 ao comparado com a Safra anterior.



**Gráfico 1 - Mix de produção de Açúcar e Etanol ao longo das Safras. Fonte: Nastari (2016)**

#### **4.1.2.Produção de Energia a partir da Biomassa de Cana-de-açúcar**

O setor sucroalcooleiro gera grande quantidade de resíduos, que podem ser aproveitados na geração de eletricidade, principalmente em sistemas de cogeração. Ao contrário da produção de madeira, o cultivo e o beneficiamento da cana são realizados em grandes e contínuas extensões, e o aproveitamento de resíduos (bagaço, palha, vinhotto etc.) é facilitado pela centralização dos processos de produção (CCEE, 2016).

Dentro da produção de energia elétrica tendo como fonte a biomassa proveniente de cana-de-açúcar existem diversas vantagens. Entre elas destacam-se a geração próxima ao centro de carga, tendo em vista que a maioria das Usinas estão localizadas no estado de São Paulo, e a complementação da matriz hídrica devido ao regime de geração ser o oposto ao das hidrelétricas. (TOMBETA, 2015).

A maioria das usinas hidrelétricas viáveis para o horizonte decenal são enquadradas na categoria “fio d’água”, com baixa capacidade de armazenamento (usinas não possuem reservatório e portanto dependem do regime do rio em que estão instaladas). Esta configuração gera consequências diversas, dentre as quais ampliar o despacho térmico para atender as demandas sazonais de carga. Assim, a entrada acentuada de fontes intermitentes como a eólica, e sazonais, como a biomassa, são complementares à geração hídrica, diversificando a matriz, o que contribui para a segurança energética do Sistema Interligado Nacional (SIN). (MME; EPE, 2015)

Em 1987 foi assinado o primeiro contrato de venda de energia elétrica excedente da Usina São Francisco em Sertãozinho (SP) para a Companhia Elétrica de Força e Luz (CPFL) através do sistema de cogeração da indústria de cana-de-açúcar. Por sua vez, em 2006, o projeto de Cerradinho em Catanduva (SP), foi o primeiro do setor sucroenergético determinado pela ONU apto a receber os créditos de carbono no Brasil (UNICA; APEXBRASIL, 2016).

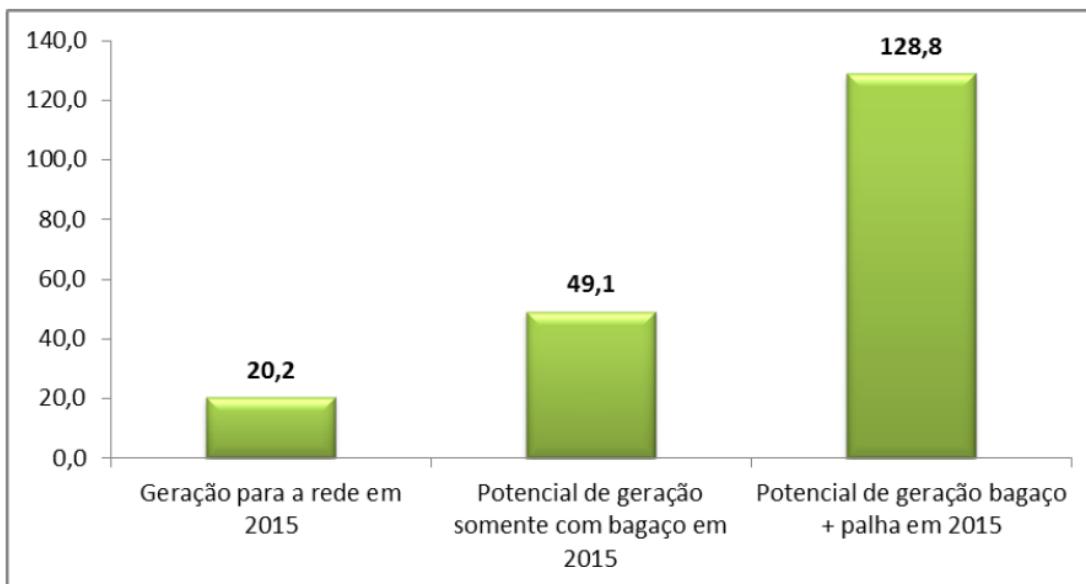
Em dezembro de 2005 foi realizado o primeiro Leilão de Energia Nova (LEN), que proporcionou novas oportunidades para a bioeletricidade a partir do processo de

produção de açúcar e álcool. Cinco anos depois essa fonte já era responsável por 2% do consumo de energia elétrica do país.

O Governo Federal vem adotando uma série de incentivos, visando o aumento da participação da bioeletricidade no panorama energético nacional, com destaque para os leilões de energia dedicados às fontes renováveis. Desde 2004, com a reestruturação ocorrida no setor elétrico nacional, a participação da biomassa de cana tem aumentado nesse segmento, uma vez que as políticas nacionais formuladas fomentaram a diversificação da geração elétrica, a adoção de um mercado competitivo descentralizado e a necessidade do uso mais racional da energia (diminuindo os impactos ambientais das fontes energéticas nacionais). (MME; EPE, 2015).

Os dados consolidados da CCEE de 2015 apontam que a capacidade instalada das plantas movidas à biomassa também atingiu marca expressiva no primeiro semestre de 2015, chegando a 10.793 MW em junho, o que significava uma representatividade de 7,7% na matriz energética brasileira. A expansão foi de 9,4% em relação ao mesmo período de 2014, quando a capacidade era de 9.868 MW. São Paulo foi o principal destaque com 5.056 MW em capacidade instalada, seguido por Mato Grosso do Sul (1.669 MW), Minas Gerais (1.110 MW) e Goiás (1.015 MW).

De acordo com o Ministério Minas e Energia – MME e a Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2015), o potencial técnico existente da biomassa nos canaviais (bagaço e palha) em 2015 tinha capacidade de atingir um volume aproximadamente seis vezes maior do que o exportado para a rede elétrica no período. É possível observar os valores em TWh no Gráfico 2 elaborado pela União da Indústria de Cana-de-açúcar – UNICA (2016).



**Gráfico 2 – Potencial técnico de oferta da bioeletrociade sucroenergética para a rede elétrica (TWh)** Fonte: ÚNICA (2016)

De acordo com o Banco de Informações da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), em Julho/16 o Brasil possuía aproximadamente 13.370 MW de capacidade instalada pela fonte biomassa, dos quais 80% eram derivados de bagaço de cana-de-açúcar.

## 4.2. FONTES RENOVAVEIS DE GERAÇÃO DE ENERGIA

A seguir são apresentadas referências sobre fontes renováveis incluindo Energia Solar e Energia proveniente da cana-de-açúcar, incluindo a utilização eficiente do Bagaço e do Biogás de Vinhaça.

### 4.2.1. Energia Solar

A utilização do sol como fonte de geração de energia tem vivenciado forte crescimento em função da maior conscientização mundial da necessidade do uso de fontes renováveis e da redução dos custos de produção global através da sustentabilidade. O Brasil e o estado de São Paulo podem ser beneficiados nesse cenário, pois apresentam condições favoráveis para o desenvolvimento da energia solar devido às condições climáticas, extensão territorial, características de seu

sistema elétrico, disponibilidade de recursos naturais e pela infraestrutura já existente (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2013).

O efeito fotovoltaico é o fenômeno físico que permite a conversão de luz em eletricidade. Esse fenômeno ocorre quando a luz, ou a radiação eletromagnética do Sol, incide sobre uma célula composta de materiais semicondutores com propriedades específicas (VILLALVA, GAZOLI; 2012).

Entre os materiais mais adequados para a conversão da radiação solar em energia elétrica, usualmente chamados de células solares ou fotovoltaicas, destaca-se o silício (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2012).

A corrente elétrica produzida pela célula fotovoltaica, quando exposta à luz pode ser usada numa infinidade de aplicações, alimentando aparelhos elétricos, carregando baterias ou fornecendo eletricidade para ruas, bairros e cidades nos sistemas conectados à rede elétrica (VILLALVA, GAZOLI; 2012).

No Brasil os primeiros sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica foram instalados no final dos anos 90 em concessionárias de energia elétrica, universidades e centros de pesquisa, incluindo a Companhia Hidroelétrica do São Francisco (Chesf), a Universidade de São Paulo (USP), Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), entre outros (PINHO; GOLDINO, 2014).

No entanto, foi apenas em outubro de 2014 que a energia solar fotovoltaica ganhou força como alternativa para o desenvolvimento da matriz elétrica do Brasil. Nesse ano ocorreu a primeira contratação da fonte em um leilão federal de energia elétrica no Ambiente de Contratação Regulada (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA, 2014).

Os valores de irradiação solar global incidente em qualquer região do território brasileiro são superiores aos da maioria dos países da União Europeia (como Alemanha, França e Espanha), onde projetos para aproveitamento de recursos solares, alguns contando com fortes incentivos governamentais, são amplamente disseminados.

Segundo Villalva e Gazoli (2012), a Alemanha é um dos países que mais incentiva a energia solar que representava 4% de toda a eletricidade produzida no

país em 2012. A maior parte do território alemão não possui mais do que 3,5 kWh/m<sup>2</sup> diários de energia solar. Em comparação, o Brasil apresenta valores de insolação diária entre 4,5 e 6,0 kWh/m<sup>2</sup>. Dadas as dimensões territoriais e as elevadas taxas de irradiação solar brasileiras, espera-se para o Brasil um potencial de geração fotovoltaica pelo menos dez vezes superior aos 20 GW instalados na Alemanha no ano de 2012. Assim, o Brasil tem potencial para se tornar um dos principais líderes mundiais no emprego de energias renováveis.

Segundo o Atlas Solarimétrico do Brasil (2000), o estado de São Paulo apresenta insolação diária média (h) e radiação solar global diária média (MJ/m<sup>2</sup>.dia) semelhante às encontradas em grandes áreas referenciais do nordeste brasileiro. Na Figura 1 é possível verificar a radiação anual no estado de São Paulo.



**Figura 1 – Média Anual da Incidência Solar Global do Estado de São Paulo. Fonte:**  
**Governo do Estado de São Paulo (2013)**

De acordo com o Governo do Estado de São Paulo (2012), a capacidade efetiva de geração de energia do estado de São Paulo a partir da radiação solar é equivalente a 512 TWh/ano. Trata-se de um considerável potencial a ser explorado, principalmente quando este é comparado ao consumo de eletricidade do estado da ordem de 135 TWh/ano em 2012, ano em que o estudo foi elaborado.

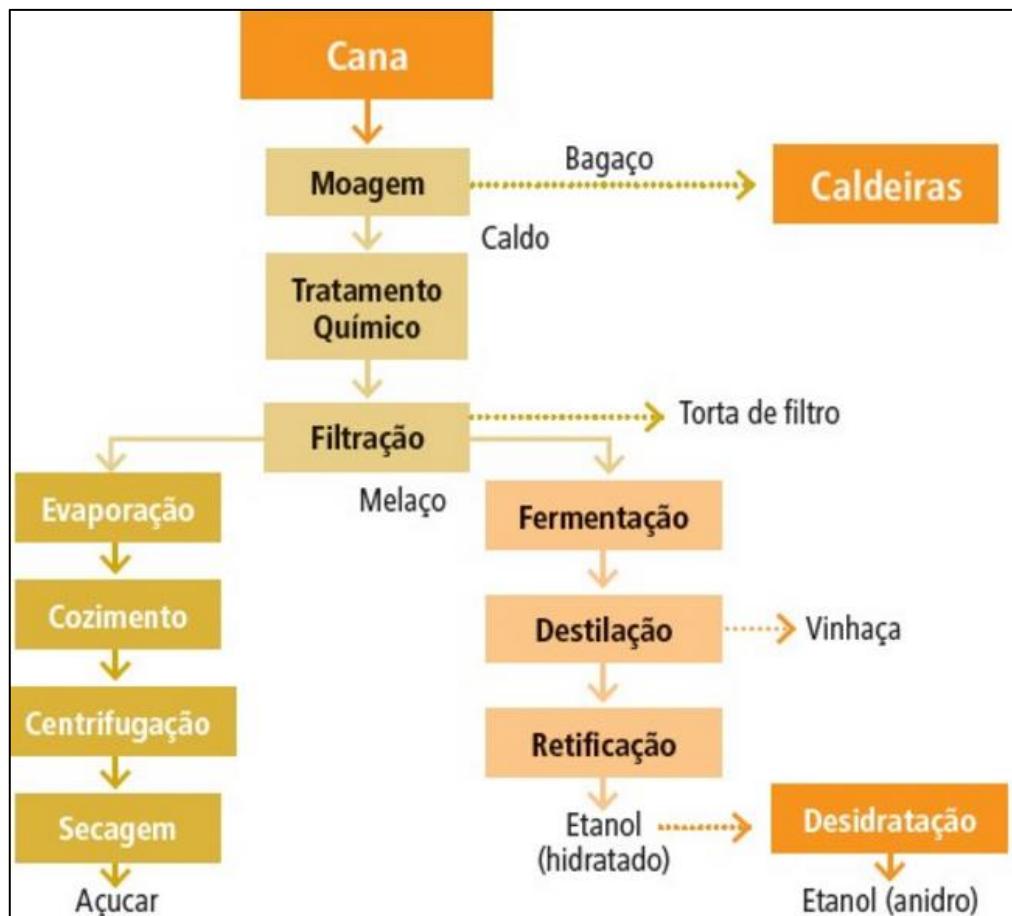
## **4.2.2. Energia da Cana-de-Açúcar**

Nesse item são discutidas duas vertentes de geração de Energia a partir de resíduos de processos que utilizam a cana-de-açúcar: a utilização eficiente do bagaço, que já é adotada em grande escala atualmente, e o uso de biogás de vinhaça, método ainda pouco visto em usinas de açúcar e etanol.

### **4.2.2.1. Utilização eficiente do Bagaço**

Atualmente, na maioria das usinas, o vapor sai das caldeiras em alta pressão e em seguida é expandido em turbinas de contrapressão até 2,5bar. As turbinas acionam os principais equipamentos mecânicos da usina (picadores, desfibradores, moendas, exaustores e bombas de água de alimentação das caldeiras), bem como os geradores de energia elétrica. O vapor a 2,5bar, denominado de vapor de escape, é ajustado para a condição de saturação e enviado para o processo, fornecendo toda a energia térmica necessária na produção de açúcar e etanol (NOVA CANA; 2016).

Na Figura 2 é apresentado o processamento da cana para a produção de açúcar e etanol de forma esquemática.



**Figura 2 - Processamento da cana para a produção de açúcar e etanol. Fonte: Seabra (2008)**

Dentre os diversos tipos de caldeira, os mais utilizados atualmente nas indústrias de açúcar e álcool são as de grelha. No entanto, a tecnologia da caldeira de Leito Fluidizado, possui diversas vantagens, incluindo a queima de combustíveis diversos, como resíduos de madeira, derivados de pneus, bagaço, palha de cana-de-açúcar, entre outros. (CGEE, 2009)

A tecnologia de caldeiras de Leito Fluidizado ou BFB (Bubbling fluidized-bed) teve início da Década de 50 com o primeiro combustor desenvolvido no centro de pesquisa de Alliance em Ohio. Atualmente, após o desenvolvimento de diversas unidades do produto, essa tecnologia permite que a tão visada “energia limpa” seja obtida por diversas fontes de combustível (B&W, 2008).

A combustão realizada em caldeiras com a tecnologia BFB é caracterizada pela injeção do combustível em um leito de areia, permanecendo retido até a sua queima total, o que representa uma eficiência de combustão superior a 99%. Com a

temperatura fixada na faixa de 850 °C, por meio do controle da relação entre o ar primário e o ar secundário, assim como pela recirculação de gases inertes, as caldeiras apresentam reduzidas emissões de particulados na atmosfera, óxidos de nitrogênio (NOx), assim como de CO (ZANINI, 2016).

Como dito anteriormente, depois de sair da caldeira o vapor passa por turbinas conectadas a geradores cuja energia produzida é consumida pela indústria ou exportada para a rede elétrica.

Os geradores podem ser classificados como de contrapressão ou condensação. Os equipamentos classificado como de contrapressão, são aqueles nos quais o vapor na saída da turbina apresenta condições de pressão e temperatura compatíveis com a necessidade do processo produtivo. Por outro lado os de condensação, normalmente utilizados para priorizar a geração de energia elétrica, fornecem na saída do equipamento um vapor já com alguma umidade, baixa pressão e temperatura e em geral com pouca utilidade para o processo. Na saída do gerador, esse vapor é enviado para um condensador e retorna para o sistema, fechando o ciclo (COMIN, 2010).

#### **4.2.2.2. Utilização de Biogás de Vinhaça**

O processo de produção de Etanol a partir da cana-de-açúcar resulta na geração de resíduos que podem ser reutilizados em outros processos ou receber tratamento antes da disposição final, para evitar danos ambientais. Dentre estes resíduos, a vinhaça se destaca devido à grande quantidade gerada e à elevada carga orgânica e concentração de sais, como o potássio (SILVA, 2011).

Segundo a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (2015), a vinhaça é o líquido derivado da destilação do vinho que é resultante da fermentação do caldo da cana de açúcar ou melaço. De acordo com FERRAZ (2000), o resíduo é caracterizado por ser um líquido de odor forte, coloração marrom-escuro, baixo pH, alto teor de potássio, com alta demanda química de oxigênio (DBO) e elevado teor de metano. O efluente contém grande quantidade de matéria orgânica e, caso seja descartado incorretamente, torna-se altamente poluidor de solos, águas superficiais e subterrâneas, entre outros.

Atualmente a vinhaça é frequentemente aplicada na forma de adubo orgânico pelas usinas produtoras de açúcar e álcool através da fertirrigação, no entanto, o resíduo também pode ser utilizado pra produzir biogás e gerar energia elétrica.

O biogás é um gás composto basicamente de metano e dióxido de carbono produzido pela biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos. Considerando o elevado impacto de metano no aquecimento global é importante a sua queima, convertendo-o em dióxido de carbono, com menor potencial de geração do efeito estufa. O biogás emitido a partir da degradação anaeróbica da matéria orgânica presente nos resíduos como a vinhaça, aterros sanitários e efluentes líquidos, contém de 50 a 80% de metano (GOLDEMBERG et al, 2008)

De acordo com SALOMON (2007), para geração de energia elétrica a partir da vinhaça, primeiramente o resíduo é colocado em um biodigestor onde acontece a biodigestão anaeróbica. O processo é realizado por diversos grupos de microrganismos que convertem a vinhaça em biogás, amônia, água e novas células bacterianas.

Segundo POVEDA (2014), existem diversos tipos de biodigestores de vinhaça, sendo o Internal Circulation Reactor (IC) e as lagoas anaeróbias boas alternativas para o processo. Um dos fatores para a escolha da tecnologia para digestão da vinhaça é a taxa de aplicação de DQO. O IC, por exemplo, admite uma taxa de 25 a 30 kgDQO/m<sup>3</sup>dia, enquanto a lagoa suporta apenas de 2 a 3 kgDQO/m<sup>3</sup>dia.

Posteriormente, o biogás é direcionado para um motor de combustão interna, um dos equipamentos mais utilizados para queimar biogás por sua flexibilidade. Os motores diesel e Otto são facilmente adaptados para biogás, mas atualmente já são preparados para queimar biogás com diferentes teores de metano, dióxido de carbono e ácido sulfídrico. Normalmente são aplicados para fornecer pequenas e médias potencias elétricas, da ordem de centenas de kW até dezenas de MW (POVEDA, 2014).

A geração de energia elétrica é realizada pelo gerador acoplado diretamente ao motor. Para motores ciclo Otto de grande porte, o custo de investimento do sistema de captação de biogás e geração de energia é de cerca de 1.200 U\$/kW instalado (SUZUKI et al., 2011).

## **4.3. GERAÇÃO DISTRIBUÍDA**

### **4.3.1. Geração Distribuída no Brasil**

A Geração Distribuída é caracterizada no Brasil como sendo a geração elétrica realizada junto ou próxima dos consumidores independente da potência, tecnologia e fonte de energia e têm evoluído para incluir potências cada vez menores. (INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA, 2016).

Dentre as vantagens apresentadas, destacam-se a postergação de investimentos em expansão nos sistemas de distribuição e transmissão, o baixo impacto ambiental, a melhoria do nível de tensão da rede no período de carga pesada e a diversificação da matriz energética (ANEEL;2016).

No Brasil o maior consumo ocorre na Região Sudeste, no entanto, em diversos períodos do ano é necessário que a região importe energia provida da geração de grandes hidrelétricas localizadas no Norte. Com o crescimento da Geração Distribuída, é cada vez menor a troca de energia entre os sub mercados, e como consequência, ocorre a diminuição de perdas na transmissão já que a energia é gerada próxima ao local de consumo.

Por outro lado, o aumento de geração próxima à carga, gera maiores custos para as distribuidoras devido à necessidade de aprimoramento da rede a fim de suportar maior quantidade de energia, aumento de manutenção e complexidade no controle de operação.

Segundo Evangelista (2016), presidente da Associação Brasileira de Geração Distribuída, a GD pode ser alinhada com os três pilares da Sustentabilidade: Ambiental, Social e Econômico. O primeiro está relacionado ao incentivo às fontes renováveis, o segundo à criação de novos empregos e benefício a todos os consumidores da rede, e o terceiro à diminuição de parte do custo do consumo de energia, apesar de ser mantida a tarifa do fio. Evangelista ainda cita um quarto pilar, o Tecnológico:

*A Geração Distribuída anda de mãos dadas como “SmartGrid”, e um país que deseja continuar à frente das economias mundiais (costumava ser 7º. na economia mundial), deve se manter na vanguarda tecnológica em todos os setores, inclusive e especialmente no setor elétrico. A Geração Distribuída reforça ainda mais esse quarto*

*pilar, com sua tecnologia de ponta, indústria de semicondutores, softwares de controle, monitoramento remoto, convertendo energia proveniente de diversas fontes renováveis (solar, biomassa, eólica, biogás, etc), com alta eficiência, em energia elétrica disponível, controlada, medida e de altíssima qualidade.* (EVANGELISTA;2016).

De acordo com o Ministério Minas Energia (2015), em Dezembro de 2015, foi lançado o Programa de Desenvolvimento da Geração Distribuída de Energia Elétrica (ProGD), para ampliar e aprofundar as ações de estímulo à geração de energia pelos próprios consumidores, com base nas fontes renováveis de energia. O programa visa que até 2030, 2,7 milhões de unidades consumidoras poderão ser aturprodutoras de energia, incluindo residências, comércios, indústrias e no setor agrícola, resultando em 23.500MW de potência instalada.

#### **4.3.2. Micro e Minigeração Distribuída**

A micro e a minigeração distribuída consistem na produção de energia elétrica a partir de pequenas centrais geradoras que utilizam fontes renováveis de energia elétrica hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada, conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades (ANEEL;2016).

Em Abril de 2012 foi lançada a Resolução Normativa 482 que tem como objetivo estabelecer as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuídas aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica. O acompanhamento da implantação da resolução fez com que a Aneel identificasse pontos de melhoria e, em Novembro de 2015, publicou a Resolução Normativa 687/2015, que revisou a REN 482/2012 e o Módulo 3 dos Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica – PRODIST, a fim de ampliar o número de conexões de micro e minigeradoras.

De acordo com as resoluções, o que diferencia micro e minigeração distribuída é a potência instalada. A primeira possui até 75 kW e a segunda entre 75 kW e 3 MW para fontes hídricas e entre 75 kW e 5 MW para demais fontes e cogeração qualificada.

As legislações atuais permitem que ocorra o Sistema de Compensação de Energia Elétrica, no qual a energia excedente gerada pela unidade consumidora com micro ou minigeração é injetada na rede da distribuidora, que funcionará como uma

“bateria”, armazenando esse excedente. Quando a energia injetada é maior que a consumida, o consumidor recebe um crédito de energia em kWh a ser utilizado em até 60 meses para abater o consumo futuro. Além disso, existe a possibilidade de utilizar os créditos para abater o consumo de outras unidades desde de que no mesmo CNPJ ou CPF e que pertençam à mesma rede de distribuição (Aneel, 2016).

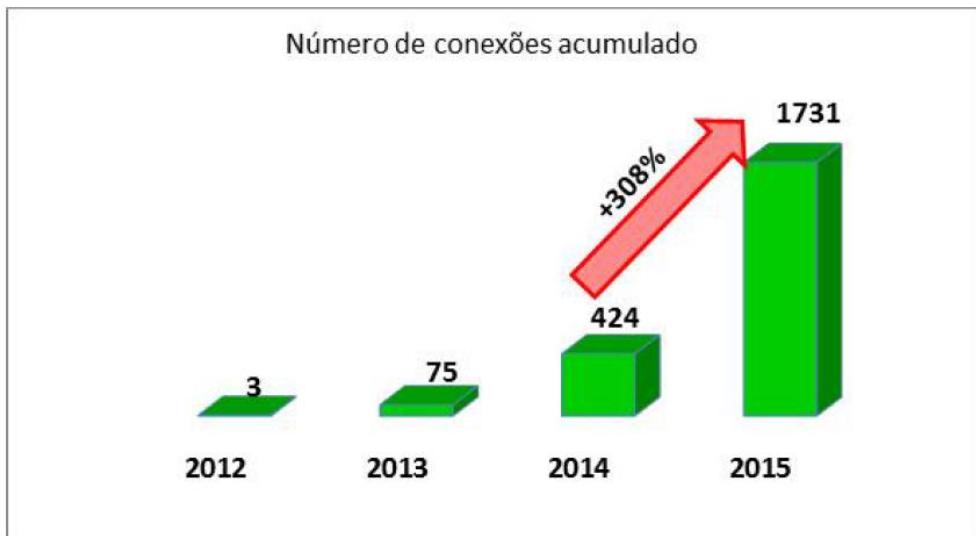
Juntamente com a revisão da Resolução 482, surge o incentivo por parte da Receita Federal do Brasil e das Secretarias de Fazenda Estaduais, instituições responsáveis por definir a cobrança de impostos. A grande revisão foi que até ano passado o Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) era cobrado sobre toda a energia importada ou exportada na distribuidora e, atualmente, o imposto é aplicado apenas sobre a energia consumida. Sendo o ICMS um imposto Estadual, cabe a cada estado decidir se irá aderir à nova regra (Aneel, 2016).

Quanto ao Programa de Integração Social (PIS) e a Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (COFINS), não existia até outubro de 2015 uma definição para incidência desses impostos na micro e minigeração distribuída. A partir dessa data foi acordado que o PIS/COFINS seria aplicado apenas para a diferença entre a energia consumida e a injetada.

A autoprodução parcial, total ou até mesmo superior à própria demanda energética por uma unidade consumidora, por meio de fontes renováveis, seja nos momentos do consumo ou de maneira a gerar créditos compensáveis pela injeção de excedentes momentâneos na rede, contribui diretamente para a uma matriz mais limpa, maior preservação dos recursos hídricos e postergação ou diminuição do uso de combustíveis fósseis (BRITO et al., 2015).

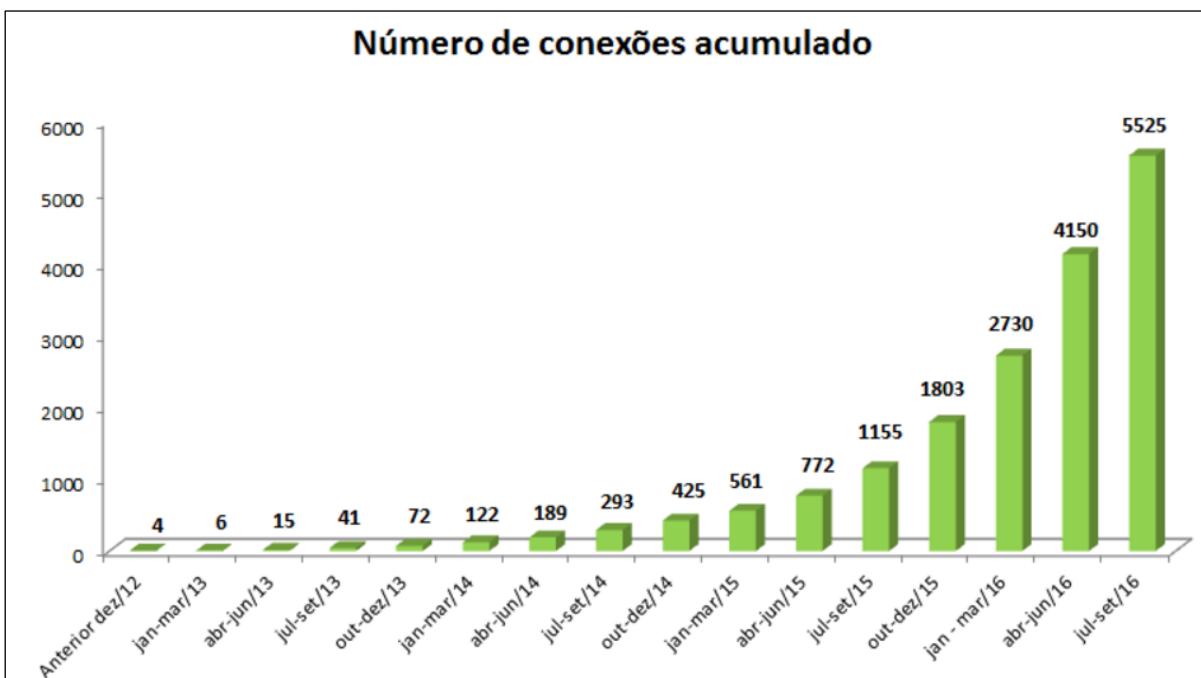
Em 2015, a geração distribuída alcançou resultados significativos. Em outubro de 2015 eram 1.000 adesões de consumidores e, em dois meses, esse número chegou a 1.731 conexões. Isso representava uma potência instalada de 16,5 megawatts (MW). A fonte mais utilizada pelos consumidores era a solar, com 1.675 adesões e 13,3 MW de potência instalada, seguida da eólica, com 33 instalações e 121 kW (ANEEL; 2016).

Segundo a Aneel, de 2014 para 2015 houve um aumento de 308% no número de conexões de micro e minigeradores, como é possível observar no Gráfico 3.



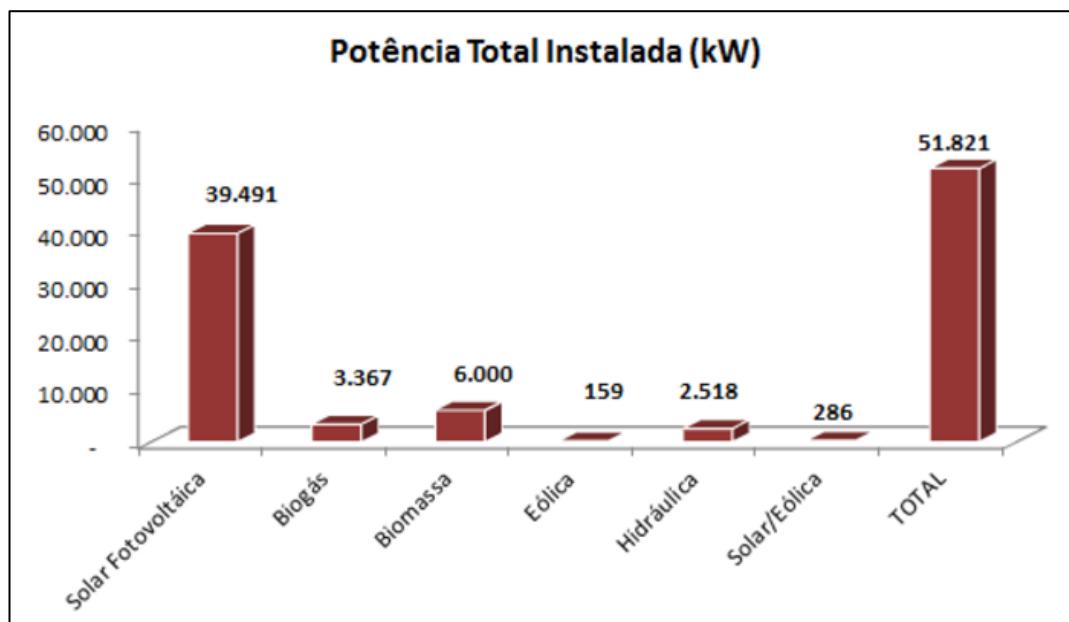
**Gráfico 3 – Número de conexões de Geração Distribuída em 2015. Fonte: Aneel (2016)**

Em Outubro de 2016 a Aneel atualizou as informações sobre conexões realizadas até Setembro de 2016 e, no Gráfico 4 é possível observar o aumento de expressivo em comparação a 2015. O crescimento acelerado do número de conexões é um reflexo dos incentivos que a Resolução 687 trouxe para os micro e minigeradores.



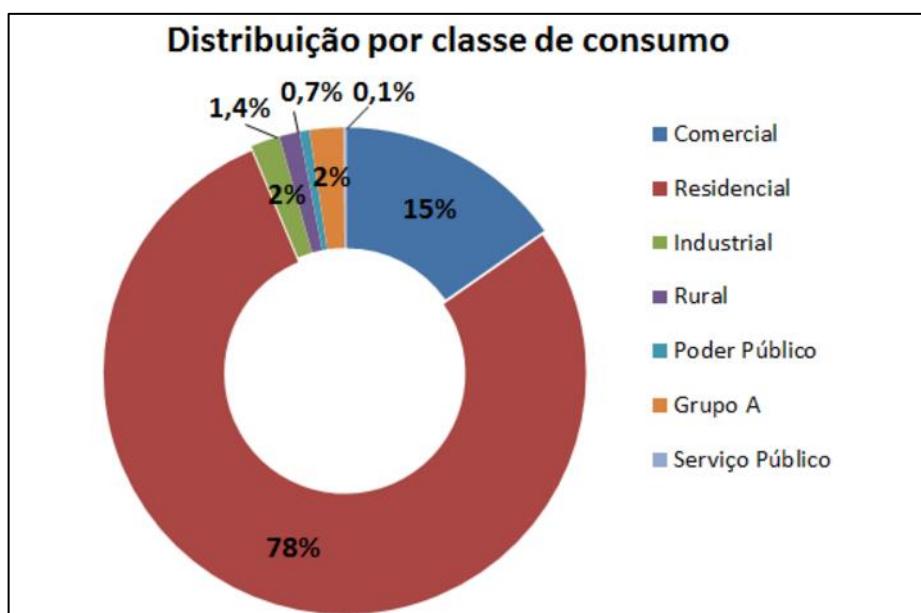
**Gráfico 4 – Número de conexões acumulado até Setembro/16. Fonte: Aneel (2016)**

Ainda segundo a Aneel (2016), atualmente existem 5.525 conexões de micro e minigeradores, que somam 51.821 kW de potência. Desses, 5.437 conexões, ou 39.491 kW, têm o sol como fonte de geração, como é possível verificar no Gráfico 5.



**Gráfico 5 – Potência Total Instalada (kW) de micro e minigeração distribuída. Fonte: Aneel (2016).**

Além disso, verifica-se no Gráfico 6 que 78% das conexões de geração distribuída possuem o perfil residencial, enquanto apenas 2% pertencem ao Grupo A (tensões maiores que 2,3V). Esse fato reflete a viabilidade dos projetos residenciais em comparação aos Industriais.



**Gráfico 6 - Distribuição por classe de consumo. Fonte: Aneel (2016)**

Por sua vez, a potência instalada em cada conexão em kW é apresentada no Gráfico 7, a partir do qual é possível concluir que mais de 60% das conexões se limita a 5kW.

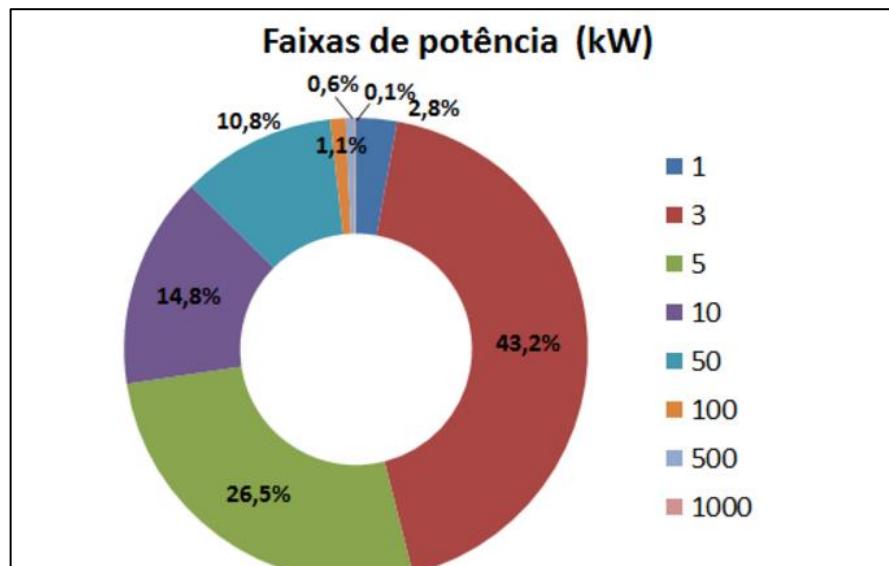


Gráfico 7 – Faixas de Potência (kW). Fonte: Aneel (2016)

## 5. ANÁLISE DE GERAÇÃO DE ENERGIA NO PERÍODO DE ENTRESSAFRA

Nesse item são analisadas formas de suprir o consumo de energia da Usina em estudo a partir de recursos já existentes no local, incluindo o sol e a vinhaça. São realizados cálculos básicos de projetos bem como o tempo de retorno do investimento a partir do gasto atual com a conta de luz.

### 5.1. Indústria estudada

A Indústria em estudo do setor Sucroenergético está localizada na região de Ribeirão Preto no interior de São Paulo e possui elevado índice de mecanização. Ao que se refere à produção de energia, pode ser dividida em duas seções.

A Seção 1 (matriz) é composta por quatro geradores de contrapressão que juntos têm capacidade de 33 MW de potência e o vapor utilizado para geração é posteriormente direcionado para o processo. Desses, aproximadamente 13MW são

consumidos pela Usina e 20MW exportados. Na entressafra, por não existir necessidade de vapor para o processo, não é gerada energia elétrica.

Ainda na Seção 1, existe um gerador de contrapressão de 40 MW de potência que é alimentado por uma caldeira de leito fluidizado. Nesse, o vapor e a energia elétrica são totalmente consumidos pelo processo.

O vapor excedente proveniente da caldeira de leito fluidizado é direcionado para a Seção 2, uma UTE composta por um gerador de condensação. A Seção 2 é mantida em funcionamento também durante a entressafra, quando a caldeira passa a trabalhar a meia carga, não produzindo vapor para o gerador da Seção 1 e é considerada uma empresa filial da Indústria.

No período de uma Safra, a Indústria em estudo produz aproximadamente 294.000m<sup>3</sup> de etanol, 748.000 toneladas de açúcar e 1.000.000 GWh de energia.

Já nos quatro meses de entressafra, a Usina consome energia da distribuidora local devido à manutenção dos equipamentos, prédios corporativos e ao fato da Seção 2 (filial) não poder fornecer Energia Elétrica para a matriz.

Será avaliada a proposta de instalação de placas fotovoltaicas a fim de suprir o consumo da Usina já que o potencial solar da região se mostra vantajoso.

### **5.1.1. Energia consumida na Entressafra**

Para avaliação do consumo de energia da Indústria no período da entressafra, foi levantado o consumo do ano de 2015 nas contas de luz. A análise desses valores resultou em um consumo de aproximadamente 4,70 GWh/ano considerando os horários de ponta e fora de ponta e 0,40 GWh/ano apenas para o horário de ponta, ou 530,66 e 42,57 kWméd de potência no ano respectivamente.

Esses valores são utilizados para os cálculos de geração de energia a partir de fontes renováveis nos próximos capítulos. Além disso, sua viabilidade é calculada tendo como base o montante que deixa de ser pago uma vez que a indústria produz a sua própria energia para consumo.

## **5.2. Cenário 1: Geração de Energia a partir do Biogás de Vinhaça**

### **5.2.1. Produção de Vinhaça**

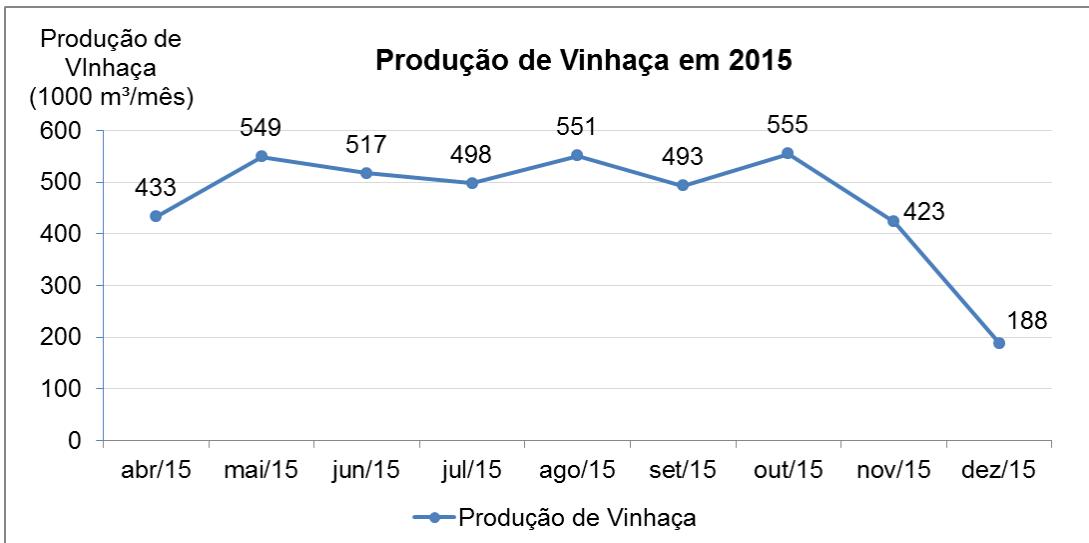
Para o cálculo de geração de energia elétrica a partir do biogás foram utilizados os dados da Indústria de produção mensal de vinhaça durante o período da Safra de 2015, apresentados na Tabela 1.

**Tabela 1 – Produção mensal de Vinhaça no ano de 2015**

Mês	Produção de Vinhaça
	(m <sup>3</sup> /mês)
abr/15	432692
mai/15	548991
jun/15	517155
jul/15	498403
ago/15	551151
set/15	492869
out/15	555085
nov/15	423347
dez/15	187835
Total	4.207.528

**Fonte: Indústria. Elaboração: Autora.**

Como é possível observar no Gráfico 8, o período de maior produção de vinhaça acontece entre maio e outubro, meses que correspondem ao pico de produção de etanol e açúcar na usina, chamado de pico da safra.



**Gráfico 8 – Produção de Vinhaça em 2015**

**Fonte:** Indústria. **Elaboração:** Autora.

A partir dos dados obtidos da Indústria calcula-se a produção média horária durante a safra, conforme Tabela 2.

**Tabela 2 – Produção média mensal de Vinhaça em m<sup>3</sup>/h**

Mês	Prod. Vinhaça (m <sup>3</sup> /h)
abr/15	600,96
mai/15	737,89
jun/15	718,27
jul/15	669,90
ago/15	740,79
set/15	684,54
out/15	746,08
nov/15	587,98
dez/15	252,47
Média Safra	637,65

**Elaboração:** Autora.

### **5.2.2. Metodologia para cálculo de Geração a partir do Biogás**

A partir dos estudos de POVEDA (2014), utiliza-se a metodologia abaixo para o cálculo de geração de energia elétrica a partir do sistema de reatores tipo IC para obtenção do biogás a partir da vinhaça. Para alguns valores de entrada optou-se por adotar parâmetros usados pela Indústria em estudos atuais.

#### Método de cálculo de Energia Elétrica a partir do Biogás

$$V_{biogás/Vvinhaça} = DQO \times E \times F \quad (1)$$

Onde:

$V_{biogás/Vvinhaça}$  é o volume de biogás presente na vinhaça em  $Nm^3_{biogás/m^3_{vinhaça}}$ ;

DQO é a quantidade de demanda química de oxigênio presente na vinhaça em  $kg\ DQO/m^3_{vinhaça}$ ;

E é a taxa de remoção de DQO do processo em porcentagem;

F é o fator de conversão de biogás por DQO removido em porcentagem.

$$V_{biogás/ano} = V_{biogás/Vvinhaça} \times V_{vinhaça} \quad (2)$$

Onde:

$V_{biogás/ano}$  é a produção de biogás por ano em  $Nm^3_{biogás/m^3_{vinhaça}}$ ;

$V_{vinhaça}$  é a produção de vinhaça por ano em  $m^3_{vinhaça/ano}$ .

$$Q_{biogás/ano} = V_{biogás/ano} \times (1-V\%vaz) \times PCl_{biogás} \quad (3)$$

Onde:

$Q_{biogás/ano}$  é a energia térmica produzida com biogás por ano em  $TJ/ano$ ;

$V\%vaz$  é a porcentagem de volume de biogás vazado no ano em porcentagem;

$PCl_{biogás}$  é o poder calorífico do biogás em  $KJ/Nm^3$ .

$$Ee/ano = (Qbiogás/ano \times Nmot) - Cbiod./ano \quad (4)$$

Onde:

Ee/ano é a energia elétrica exportada para a rede por ano em GWh;  
Nmot é o rendimento do motor em porcentagem;  
Cbiod./ano é a energia consumida pelo biodigestor em kWe.

$$Pot = (Qbiogás/ano \times Nmot) / Ts \quad (5)$$

Onde:

Pot é a potência elétrica de geração instalada em MW;  
Nmot é o rendimento do motor em porcentagem;  
Ts é o tempo de duração da safra em horas.

Primeiramente calcula-se o potencial de geração de energia elétrica que a usina possui a partir de toda a vinhaça produzida no ano. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 3.

**Tabela 3 – Cálculo do potencial de geração de Energia Elétrica a partir de toda a Vinhaça produzida na Safra.**

<b>Dados de Entrada</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Valor de entrada</b>	<b>Fonte</b>
DQO	Quantidade de DQO	27,63 kg DQO/m <sup>3</sup> vinhaça	Indústria
E	Taxa de remoção de DQO do processo	65%	Indústria
F	Fator de conversão de biogás por DQO removido	45%	Indústria
V <sub>vinhaça/ano</sub>	Produção de Vinhaça/ano	4.207.528 m <sup>3</sup> vinhaça/ano	Indústria
V <sub>%vaz</sub>	Porcentagem de volume de biogás vazado	5%	Poveda; 2014
PCI Biogás	Poder calorífico interno do biogás	17765 kJ/Nm <sup>3</sup>	Poveda; 2014
Nmot	Rendimento do motor	29%	Poveda; 2014
Cbiod./ano	Energia consumida pelo Biodigestor	102 Kwe	Indústria
Ts	Duração da Safra	5856 horas	Indústria

### **Resultados**

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Resultado</b>	<b>Equação</b>
V <sub>biogás/V<sub>vinhaça</sub></sub>	Volume de biogás presente na vinhaça	8,08 Nm <sup>3</sup> biogás/m <sup>3</sup> vinhaça	(1)
V <sub>biogás/ano</sub>	Produção de biogás por ano	34.004.295 Nm <sup>3</sup> /ano	(2)
Q <sub>biogás/ano</sub>	Energia térmica produzida com Biogás por ano	573,88 TJ/ano	(3)
E <sub>e/ano</sub>	Energia elétrica exportada por ano	45,63 GWh	(4)
Pot	Potência elétrica de Geração Instalada	7,89 MW	(5)

### **Elaboração: Autora**

Tendo em vista que a necessidade de energia elétrica para suprir o consumo da entressafra é de 4,7GWh, os cálculos são refeitos na Tabela 4 afim de verificar qual o volume de vinhaça necessário para tal demanda.

**Tabela 4 - Cálculo da Vinhaça necessária para geração da energia consumida na Entressafra.**

<b>Dados de Entrada</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Valor de entrada</b>	<b>Fonte</b>
DQO	Quantidade de DQO	27,63 kg DQO/m <sup>3</sup> vinhaça	Indústria
E	Taxa de remoção de DQO do processo	65%	Indústria
F	Fator de conversão de biogás por DQO removido	45%	Indústria
V <sub>vinhaça/ano</sub>	Produção de Vinhaça/ano	482.148 m <sup>3</sup> vinhaça/a no	Indústria
V <sub>%vaz</sub>	Porcentagem de volume de biogás vazado	5%	Poveda; 2014
PCI Biogás	Poder calorífico interno do biogás	17765 kJ/Nm <sup>3</sup>	Poveda; 2014
Nmot	Rendimento do motor	29%	Poveda; 2014
Cbiod./ano	Energia consumida pelo Biodigestor	102 Kwe	Indústria
Ts	Duração da Safra	5856 horas	Indústria

### **Resultados**

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Resultado</b>	<b>Equação</b>
V <sub>biogás/V<sub>vinhaça</sub></sub>	Volume de biogás presente na vinhaça	8,08 biogás/m <sup>3</sup> vinhaça	(1)
V <sub>biogás/ano</sub>	Produção de biogás por ano	3.896.610 Nm <sup>3</sup> /ano	(2)
Q <sub>biogás/ano</sub>	Energia térmica produzida com Biogás por ano	65,76 TJ/ano	(3)
E <sub>e/ano</sub>	Energia elétrica exportada por ano	4,70 GWh	(4)
Pot	Potência elétrica de Geração Instalada	0,90 MW	(5)

### **Elaboração: Autora**

Verifica-se também que para suprir o consumo da Usina em estudo apenas no horário de ponta o volume de vinhaça é menor, como apresentado na Tabela 5.

**Tabela 5 - Cálculo da Vinhaça necessária para geração da energia consumida na Entressafra no Horário de Ponta.**

<b>Dados de Entrada</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Valor de entrada</b>	<b>Fonte</b>
DQO	Quantidade de DQO	27,63 kg DQO/m <sup>3</sup> vinhaça	Indústria
E	Taxa de remoção de DQO do processo	65%	Indústria
F	Fator de conversão de biogás por DQO removido	45%	Indústria
V <sub>vinhaça/ano</sub>	Produção de Vinhaça/ano	90.773 m <sup>3</sup> vinhaça/ano	Indústria
V <sub>%vaz</sub>	Porcentagem de volume de biogás vazado	5%	Poveda; 2014
PCI Biogás	Poder calorífico interno do biogás	17765 kJ/Nm <sup>3</sup>	Poveda; 2014
Nmot	Rendimento do motor	29%	Poveda; 2014
Cbiod./ano	Energia consumida pelo Biodigestor	102 Kwe	Indústria
Ts	Duração da Safra	5856 horas	Indústria

<b>Resultados</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Resultado</b>	<b>Equação</b>
V <sub>biogás</sub> /V <sub>vinhaça</sub>	Volume de biogás presente na vinhaça	8,08 biogás/m <sup>3</sup> vinhaça	(1)
V <sub>biogás/ano</sub>	Produção de biogás por ano	733.605 Nm <sup>3</sup> /ano	(2)
Q <sub>biogás/ano</sub>	Energia térmica produzida com Biogás por ano	12,38 TJ/ano	(3)
E <sub>e/ano</sub>	Energia elétrica exportada por ano	0,40 GWh	(4)
Pot	Potência elétrica de Geração Instalada	0,17 MW	(5)

#### **Elaboração: Autora**

Analizando os números apresentados nas Tabelas 3 e 4, é possível concluir que atualmente apenas 11,46% da vinhaça produzida se faz necessária para suprir o consumo da Usina em estudo. Analogamente, como é possível verificar na Tabela 5, para suprir o consumo somente no horário de ponta é utilizada 2,16% da produção total de vinhaça.

### **5.3. Cenário 2: Geração de Energia a partir de painéis fotovoltaicos**

Como guia para os cálculos do projeto de Energia Solar utilizou-se o Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (2014) publicados pelos Cepel, DTE e Creseb.

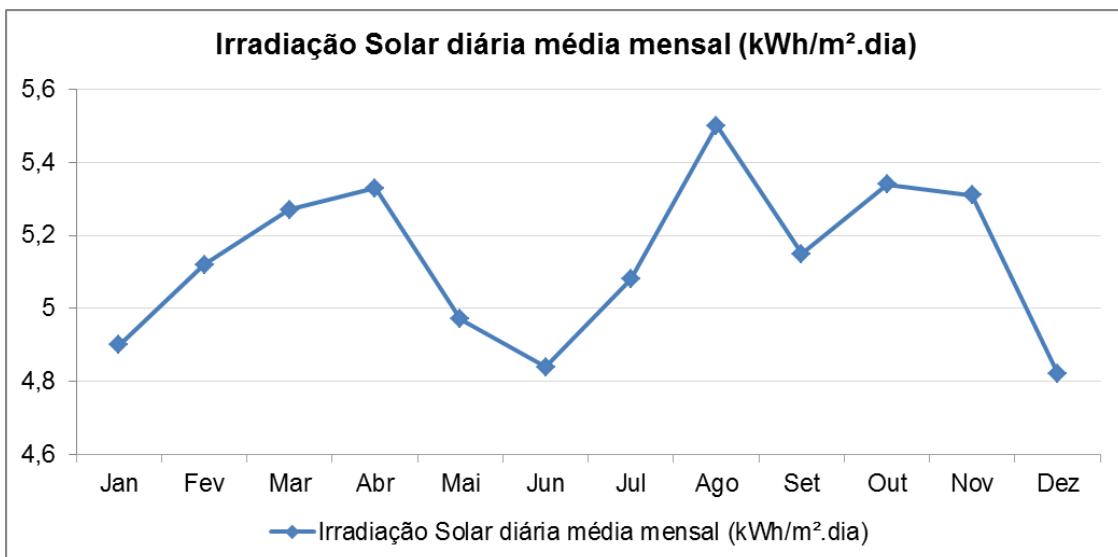
#### **5.3.1. Disponibilidade de Radiação**

As informações de Irradiação solar na região onde se encontra a usina foram retiradas do programa Sundata, que pode ser encontrado no site do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (Cresesb). Adicionando as coordenadas da Usina encontra-se a região mais próxima como sendo a de Ribeirão Preto, em São Paulo. Utilizando o Plano Inclinado (Ângulo igual à Latitude), obtém-se os valores de Irradiação Solar apresentados na Tabela 6 e ilustrados no Gráfico 9. Cabe ressaltar novamente que a energia gerada poderá ser consumida em qualquer horário do dia graças às Resoluções Normativas 482 e 687 que possibilitam a acumulação de créditos na distribuidora a ser utilizados em até cinco anos. Portanto, mesmo que a energia seja gerada no horário fora de ponta, poderá ser consumida no horário de ponta.

**Tabela 6 – Média Mensal de Irradiação Solar Diária. Fonte: Sundata.**

Mês	Irradiação Solar diária média mensal (kWh/m <sup>2</sup> .dia)
Jan	4,9
Fev	5,12
Mar	5,27
Abr	5,33
Mai	4,97
Jun	4,84
Jul	5,08
Ago	5,5
Set	5,15
Out	5,34
Nov	5,31
Dez	4,82

**Elaboração: Autora**



**Gráfico 9 – Média mensal de Irradiação Solar diária. Fonte: Sundata. Elaboração: Autora.**

Analizando o Gráfico 9 é possível perceber que os meses de maior irradiação são os de abril, agosto outubro e novembro, enquanto janeiro, junho e dezembro são os meses em que a irradiação é mais baixa.

### 5.3.2. Painel Fotovoltaico e Inversor

O custo-benefício foi o principal fator para a escolha das placas fotovoltaicas e inversores adotados. Seguem a seguir as especificações dos equipamentos (Figuras 3 e 4).

PAINEL SOLAR FOTOVOLTAICO	
Produtora	Canadian
Máxima Potência	265 W
Voltagem de Circuito Aberto (Voc)	37,7 Volts
Corrente de Curto-Círculo (Isc)	9,23 Amps
Eficiência do Painel	16,47%
Preço (R\$)	R\$ 899,00
Preço (\$)	R\$ 268,36

**Figura 3 – Painel Solar Fotovoltaico Canadian. Fonte: Neosolar (2016)**

INVERSOR	
Produtora	Fronius
Máxima Potência	15.000 W
Voltagem Máxima de Entrada	1000 Vcc
Corrente Máxima de Entrada	33 Amps
Número de entradas	3
Preço (R\$)	R\$ 22.490,00
Preço (\$)	R\$ 6.713,43

**Figura 4 - Inversor Solar Fronius. Fonte: Neosolar (2016)**

### 5.3.3. Dimensionamento do Sistema Fotovoltaico

A partir dos dados retirados do Sundata, seleciona-se a Irradiação mais desfavorável de 4,82 KWh/m<sup>2</sup>.dia, que ocorre no mês de Dezembro. No item 6.4 do Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos (MESFv), “Projeto de Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede”, encontram-se os cálculos abaixo utilizados para o dimensionamento do sistema a partir do consumo médio diário de 12.736 kWh/dia (530,66 kW x 24h/dia). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 7.

$$P_{FV} = (E/TD) / HSP \quad (6)$$

Onde:

$P_{FV}$  é a potência de pico do painel fotovoltaico em kW;

E é o consumo médio diário em kWh/dia;

TD é a taxa de desempenho do sistema em porcentagem;

HSP são as horas de sol pleno (mês crítico) em horas;

$$Nº_{Painéis} = P_{FV} / P_{Painel} \quad (7)$$

Onde:

$Nº_{Painéis}$  é o número de painéis;

$P_{Painel}$  é a potência de um painel em W.

$$Nº_{Inversores} = P_{Painel} \times Nº_{Painéis} \times FDI / P_{Inversor} \quad (8)$$

Onde:

$Nº_{Inversores}$  é o número de inversores;

$FDI$  é o fator de dimensionamento do inversor em porcentagem;

$P_{Inversor}$  é a potência de um inversor em W.

$$Nº_{P/I} = Nº_{Painéis} / Nº_{Inversores} \quad (9)$$

Onde:

$Nº_{P/I}$  é o número de painéis por inversor;

$$Nº_{Pentrada} = Nº_{Painéis} / Nº_{entradas} \quad (10)$$

Onde:

$Nº_{Pentrada}$  é o número de painéis por entrada de um inversor;

$Nº_{entradas}$  é o número de entradas de um inversor;

$$V_{Psérie} = V_{Painel} \times Nº_{Pentrada} < V_{MáxInv} \quad (11)$$

Onde:

$V_{Psérie}$  somatória da tensão dos painéis em série em volts;

$V_{Painel}$  é a tensão de um painel em volts;  
 $V_{MáxInv}$  é a tensão máxima admitida pelo inversor em volts.

$$I_{Paralelo} = N^o_{entradas} \times I_{Painel} < I_{MáxInv} \quad (12)$$

$I_{Paralelo}$  é somatória das correntes dos painéis em paralelo em amperes;  
 $I_{Painel}$  é a corrente de um painel em amperes;  
 $I_{MáxInv}$  é a corrente máxima admitida pelo inversor em ampares.

**Tabela 7 - Cálculo de geração de Energia Elétrica a partir da Irradiação disponível.**

<b>Dados de Entrada</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Valor de entrada</b>	<b>Fonte</b>
E	Consumo médio diário	12.736 kWh/dia	
TD	Taxa de Desempenho	70%	MESFv
HSP	Horas de Sol Pleno (mês crítico)	4,82 horas	Sundata
FDI	Fator de dimensionamento do inversor	75%	MESFv
P <sub>Painel</sub>	Potência Painel	265 W	Catálogo
P <sub>Inversor</sub>	Potência Inversor	15.000 W	Catálogo
n <sub>entradas</sub>	Número de entradas utilizadas do Inversor	3 entradas	Catálogo
V <sub>Painel</sub>	Tensão do painél	37,70 Volts	Catálogo
V <sub>máxInv</sub>	Máxima tensão admitida pelo Inversor	1.000 Volts	Catálogo
I <sub>sc</sub>	Corrente de circuito do painel	9,23 Amperes	Catálogo
I <sub>Máx</sub>	Máxima corrente admitida pelo Inversor	33 Amperes	Catálogo

<b>Resultados</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Resultado</b>	<b>Equação</b>
P <sub>FV</sub>	Potência de pico do painél FV	3.775 kW	(6)
n <sub>Painéis</sub>	Número de Painéis	14.245 painéis	(7)
n <sub>Inversores</sub>	Número de Inversores	189 inversores	(8)
n <sub>P/I</sub>	Número de painéis/inversor	75 painéis	(9)
n <sub>Psérie</sub>	Número de painéis em série	25 painéis	(10)
V <sub>Psérie</sub>	Somatória das Tensões dos painéis em série	942,50 ok	(11)
I <sub>Paralelo</sub>	Somatória das Correntes dos painéis em paralelo	27,69 ok	(12)

#### **Fonte: Autora**

Analogamente, realizam-se cálculos para suprir apenas a demanda de ponta de 1.021,68 kWh/dia (42,57 kW x 24h/dia), apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8 - Cálculo de geração de Energia Elétrica a partir da Irradiação disponível para o horário de ponta.**

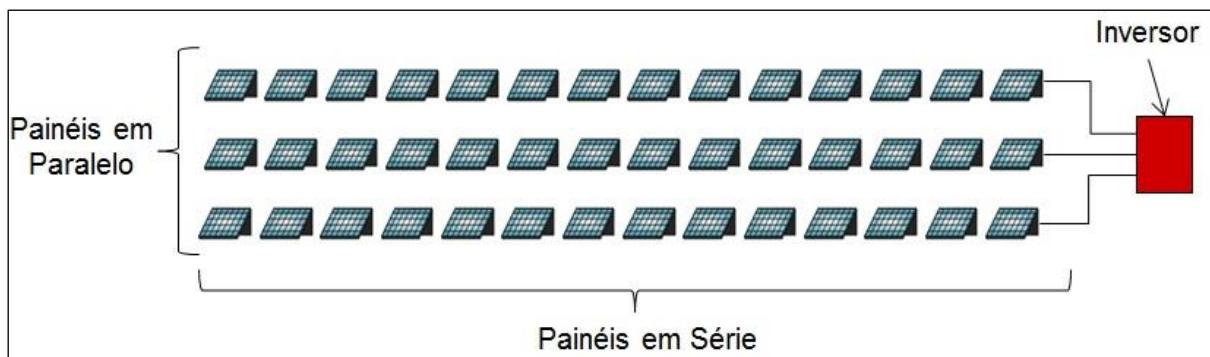
<b>Dados de Entrada</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Valor de entrada</b>	<b>Fonte</b>
E	Consumo médio diário	1.022 kWh/dia	
TD	Taxa de Desempenho	70%	MESFv
HSP	Horas de Sol Pleno (mês crítico)	4,82 horas	Sundata
FDI	Fator de dimensionamento do inversor	75%	MESFv
P <sub>Painel</sub>	Potência Painel	265 W	Catálogo
P <sub>Inversor</sub>	Potência Inversor	15.000 W	Catálogo
n <sub>entradas</sub>	Número de entradas utilizadas do Inversor	3 entradas	Catálogo
V <sub>Painel</sub>	Tensão do painél	37,70 Volts	Catálogo
V <sub>máxInv</sub>	Máxima tensão admitida pelo Inversor	1.000 Volts	Catálogo
I <sub>sc</sub>	Corrente de circuito do painel	9,23 Amperes	Catálogo
I <sub>Máx</sub>	Máxima corrente admitida pelo Inversor	33 Amperes	Catálogo

<b>Resultados</b>			
<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Resultado</b>	<b>Equação</b>
P <sub>FV</sub>	Potência de pico do painél FV	303 kW	(6)
n <sub>Painéis</sub>	Número de Painéis	1.143 painéis	(7)
n <sub>Inversores</sub>	Número de Inversores	16 inversores	(8)
n <sub>P/I</sub>	Número de painéis/inversor	71 painéis	(9)
n <sub>Psérie</sub>	Número de painéis em série	23 painéis	(10)
V <sub>Psérie</sub>	Somatória das Tensões dos painéis em série	867,10 ok	(11)
I <sub>Paralelo</sub>	Somatória das Correntes dos painéis em paralelo	27,69 ok	(12)

#### **Fonte: Autora**

A Figura 5 mostra um esquema que ilustra o Sistema Fotovoltaico composto pelas placas fotovoltaicas em série e paralelo conectadas ao inversor.



**Figura 5 - Esquema do Sistema Fotovoltaico.** Elaboração: Autora.

## 5.4. ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

A seguir são apresentados os estudos de viabilidade dos projetos calculados no item 5.3.

### 5.4.1. Investimentos Iniciais

Os Investimentos Iniciais englobam os custos necessários para implantação dos projetos e equipamentos, bem como possíveis custos anuais com manutenção dos sistemas.

#### 5.4.1.1. Cenário 1: Geração de Energia a partir do Biogás de Vinhaça

Para os cálculos do Biodigestor adotaram-se valores médios de custo fornecidos pela Usina, já considerando a purificação do biogás e para o Motorgerador utilizou-se valores apresentados por Poveda (2014), ajustados para os dias de hoje. Nas Tabelas 9 e 10 é possível verificar os montantes utilizados.

**Tabela 9 - Custo adotado de Equipamentos e Manutenção.**

Equipamento	Custo	
	Instalação	Manutenção
Biodigestor	R\$ 11.000,00 /Nm <sup>3</sup> /h Biogás	R\$ 80,00 /Nm <sup>3</sup> /h Biogás
Motorgerador	R\$ 2.500,00 /kW	R\$ 50,00 /MWh

**Elaboração: Autora.**

**Tabela 10 – Custo do Sistema de Geração de Energia Elétrica através do Biogestor.**

Consumo	Produção de Biogás (Nm <sup>3</sup> /ano)	Horas na Safra	Produção de Biogás (Nm <sup>3</sup> /h)	Pot. (kW)	Qbiogás /ano *Ne/t	Equipamento	Valor equipamento	Manutenção
Total	3.896.610	5.856	665,40	904,63	5,30	Biodigestor	R\$ 7.319.452,12	R\$ 53.232,38
						Motogerador	R\$ 2.261.570,92	R\$ 264.875,19
Ponta	733.605	5.856	125,27	170,31	1,00	Biodigestor	R\$ 1.378.015,38	R\$ 10.021,93
						Motogerador	R\$ 425.780,44	R\$ 49.867,40

**Elaboração:** Autora.

#### **5.4.1.2. Cenário 2: Geração de Energia a partir de painéis fotovoltaicos**

Para os cálculos do Sistema Fotovoltaico é verificado o custo dos painéis fotovoltaicos e inversores adotando o critério de que 25% do valor total do projeto será utilizado para cabeamentos e instalação dos equipamentos.

Nas Tabelas 11 e 12 é apresentado o cálculo do investimento inicial do Sistema Fotovoltaico.

**Tabela 11 - Custos de Equipamentos.**

Equipamento	Geração	Custo por equipamento	Quantidade	Custo Total
Painel Fotovoltaico	Total	R\$ 899,00	14.245	R\$ 12.806.255,00
	Ponta		1.143	R\$ 1.027.557,00
Inversor	Total	R\$ 22.490,00	189	R\$ 4.250.610,00
	Ponta		16	R\$ 359.840,00

**Elaboração:** Autora.

**Tabela 12 - Custos do sistema de geração de Energia Elétrica através de Placas Fotovoltaicas.**

Geração	Custo Painéis e Inversores	Custo cabeamento e Instalação	Custo Total
Total	R\$ 17.056.865,00	R\$ 5.685.621,67	R\$ 22.742.486,67
Ponta	R\$ 1.387.397,00	R\$ 462.465,67	R\$ 1.849.862,67

**Elaboração:** Autora.

## **5.4.2. Fluxo de Caixa**

Nesse item é avaliado o montante disponível para abatimento anual dos custos do projeto, uma vez que após a instalação a minigeração, como consequência, ocorre uma diminuição nos gastos da conta de luz

### **5.4.2.1. Legislação Atual**

O Fluxo de Caixa foi calculado com base nos custos da Energia economizados a partir da Minigeração Distribuída proveniente do Biodigestor e placas Fotovoltaicas e utilizando a base tarifária atual aplicada pela distribuidora da Usina nos horários de ponta e fora de ponta.

Primeiramente foram levantados os custos anuais de energia elétrica presentes na conta de luz. Verifica-se que a conta de luz pode ser separada em Tarifa de Energia (TE) e Tarifa de Uso dos Sistemas Elétricos de Distribuição (TUSD). A TE é medida em R\$/MWh e é utilizada para efetuar o faturamento mensal referente ao consumo de energia. Já a TUSD é dividida em duas parcelas, a TUSD Encargos e a TUSD Fio. A primeira é direcionada para o pagamento de pesquisa e desenvolvimento em eficiência energética, consumo de combustíveis, taxa de fiscalização de serviços, entre outros e é medida em R\$/kWh. Já a segunda é formada por custos do sistema de distribuição, operação e manutenção, entre outros e se dá em R\$/kW.

Nas Tabelas 13 e 14 é possível observar os gastos anuais com energia elétrica, separados por TE e TUSD Encargos/Fio, que somam aproximadamente dois milhões de reais.

**Tabela 13 - Tarifa de Uso de Distribuição.**

TUSD (R\$)						
Encargos			Fio			Encargos+Fio
Ponta	Fora de Ponta	Total	Ponta	Fora de Ponta	Total	Total
R\$ 25.328,25	R\$ 290.403,03	R\$ 315.731,28	R\$ 274.363,12	R\$ 170.659,17	R\$ 445.022,29	R\$ 760.753,57

**Elaboração: Autora com base nas informações cedidas pela Usina.**

**Tabela 14 – Tarifa de Energia.**

Custo Anual com Energia Elétrica				
TE (R\$)			TUSD (R\$)	Total (R\$)
Ponta	Fora de Ponta	Total		
R\$ 149.377,76	R\$ 1.111.629,62	R\$ 1.261.007,38	R\$ 760.753,57	R\$ 2.021.760,96

**Elaboração: Autora com base nas informações cedidas pela Usina.**

Para o Biogestor foi considerada a geração no período de Safra durante o horário de ponta e fora de ponta e pausa durante a Entressafra devido à ausência de produção de vinhaça.

Por outro lado, para a geração de energia por placas fotovoltaicas foi considerada a geração durante o ano inteiro apenas no horário fora de ponta, pois no horário de ponta não existe sol (das 18h às 21h).

No primeiro momento tendo como base a REN 482 e 687, adotou-se como fluxo de caixa o valor total gasto anualmente com a TE, uma vez que esse número se torna zero com a minigeração distribuída.

Foi considerado também um custo anual de manutenção para o projeto do Biogestor, apresentado anteriormente, na Tabela 9. Analogamente, para o Sistema Solar, adotou-se 0,12% do valor total dos gastos com inversor e painéis fotovoltaicos.

A partir das observações citadas acima, foi elaborada a Tabela 15.

**Tabela 15 – Fluxo de Caixa (Legislação Atual).**

Critério	Investimento Inicial		Manutenção		Fluxo de Caixa	
	Biodigestor	Solar	Biodigestor	Solar	Biodigestor	Solar
Total	R\$ 9.581.023,04	R\$ 22.742.486,67	R\$ 318.107,57	R\$ 20.468,24	R\$ 942.899,82	R\$ 1.240.539,15
Ponta	R\$ 1.803.795,82	R\$ 1.849.862,67	R\$ 59.889,33	R\$ 1.664,88	R\$ 89.488,43	R\$ 147.712,88

**Elaboração: Autora.**

#### **5.4.2.2. Sugestão de Desconto na TUSD Fio**

Em um segundo momento, ao verificar a inviabilidade no projeto, sugere-se uma alteração das Resoluções Normativas 482 e 687, a fim de incentivar a minigeração diminuindo o tempo de retorno dos projetos.

Atualmente, consumidores do Mercado Livre de Energia são beneficiados pelo desconto de 100% na parcela da TUSD Fio medida em kW ao comprar energia provida de biogás e 80% de placas fotovoltaicas. Do mesmo modo, geradores que produzem tal energia e estão presentes no Mercado Livre também recebem esse desconto.

Utilizando essa premissa, a Tabela 15 foi redesenhada utilizando o desconto de 100% na TUSD Fio quando existe geração de energia suficiente para suprir o consumo total da Usina. Além disso, foi verificado que o consumo no horário de ponta representa 8,51% do consumo total no ano. Dessa maneira, a fim de incentivar o uso da minigeração distribuída, criou-se um desconto de duas vezes essa porcentagem, resultando em 17,02% de desconto na TUSD Fio. Os resultados são apresentados na Tabela 16.

**Tabela 16 - Fluxo de Caixa com Desconto na TUSD Fio.**

Critério	TUSD Fio (R\$)	Desconto TUSD Fio (R\$)	Fluxo de Caixa com desconto	
			Biodigestor	Solar
Total	R\$ 445.022,29	R\$ 445.022,29	R\$ 1.387.922,11	R\$ 1.685.561,44
Ponta		R\$ 75.748,47	R\$ 165.236,90	R\$ 223.461,36

#### **Elaboração: Autora**

Por tanto, a seguir são apresentadas duas situações para o Retorno do Investimento: a primeira leva em consideração a legislação atual e a segunda assume o desconto na tarifa TUSD Fio.

#### **5.4.3. Retorno do Investimento**

Para a análise de viabilidade fez-se uso do método de Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR). Primeiramente calculou-se o investimento inicial a partir dos custos dos equipamentos e de manutenção. Em seguida adotou-se como fluxo de caixa a economia dos valores da conta de luz ao implantar os projetos de geração de energia como anteriormente. A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) adotada para o cálculo do Valor Presente Líquido (VPL) é de 12,65% e a Taxa Interna de Retorno (TIR) é analisada para 25 anos.

Utilizou-se também a premissa de que uma vez por ano a conta de energia passa por reajustes tarifários de 4,0%, como sendo uma média da variação entre diversas distribuidoras do Brasil.

### **5.4.3.1. Legislação Atual**

Primeiramente foi calculado o Retorno do Investimento utilizando as premissas das Resoluções Normativas 482 e 687, em que a geração de energia elétrica a partir da minigeração distribuída cria créditos para o consumidor, que podem ser utilizado em até 5 anos. Na Tabela 17 é possível verificar os resultados dessa análise.

**Tabela 17 - Retorno do Investimento com a Legislação Atual.**

Critério	Taxa de Atratividade	Reajuste Tarifário	TIR		Retorno do Investimento (anos)	
			Biodigestor	Solar	Biodigestor	Solar
Total	12,65%	4,00%	12,44%	6,01%	-	-
Ponta			5,46%	9,83%	-	-

**Elaboração: Autora**

É possível verificar que utilizando a Legislação atual e as premissas citadas anteriormente, o projeto não é viável.

### **5.4.3.2. Sugestão de Desconto na TUSD Fio**

Após a verificação da inviabilidade do projeto, os cálculos foram refeitos utilizando os descontos na TUSD citados no item 6.4.2.2., que são apresentados na Tabela 18.

**Tabela 18 - Retorno do Investimento com o Desconto na TUSD Fio.**

Critério	Taxa de Atratividade	Reajuste Tarifário	TIR		Retorno do Investimento (anos)	
			Biodigestor	Solar	Biodigestor	Solar
Total	12,65%	4,00%	17,85%	9,02%	12	-
Ponta			11,58%	15,00%	-	16

**Elaboração: Autora**

## **6. ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES**

Tendo em vista as informações apresentadas nesse trabalho é possível verificar que apesar dos incentivos atuais presentes nas Resoluções Normativas 482 e 687 incluindo o sistema de créditos de energia, a viabilidade econômica dos

projetos de geração a partir do biogás de vinhaça e placas fotovoltaicas ainda é baixa devido ao elevado custo dos equipamentos.

Para que os projetos se tornassem atraentes, nesse trabalho foi apresentada a sugestão de um desconto na TUSD Fio variando conforme a Energia gerada (item 5.4.3). Esse desconto já é utilizado para clientes do Mercado Livre geradores e consumidores de fontes renováveis.

Considerando o desconto na TUSD Fio, alguns projetos se tornam viáveis. A primeira opção, que visa a geração de energia elétrica a partir do biogás de vinhaça, se torna viável em 12 anos para atender ao consumo total de energia. Já a segunda opção, que engloba geração a partir de placas fotovoltaicas não se mostra vantajosa para atender todo consumo da planta, no entanto, é atraente para consumos no horário de ponta, sendo seu retorno de 16 anos.

Por tanto, é possível concluir que o projeto de Minigeração Distribuída se torna viável com a alteração das Resoluções Normativas 482 e 687, fazendo uso da diminuição da TUSD Fio, desconto já implantado no Sistema Elétrico Brasileiro e necessitando apenas ser aplicado a tal modalidade ou no caso da Indústria em estudo considerar uma taxa de atratividade de 12%. Dessa maneira é possível incentivar ainda mais a Geração Distribuída e consequentemente estender a diversificação de nossa Matriz Energética através de fontes renováveis que contribuam para a Sustentabilidade de nosso país.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Constituição (2012), de 17 de abril de 2012. **Resolução Normativa Nº 482.** p. 1-12.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **RESOLUÇÃO NORMATIVA 687:** Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST.. Brasília, 2015. 25 p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2016.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **BIG - Banco de Informações de Geração:** Matriz de Energia Elétrica - Biomassa. 2016. Disponível em:<<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBra sil.cfm>>. Acesso em: 16 jul. 2016.

**ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. RESOLUÇÃO NORMATIVA 687:** Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST.. Brasília, 2015. 25 p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2016

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Cadernos Temáticos Aneel **Micro e Minigeração Distribuída:** Sistema de Compensação de Energia Elétrica. 2. ed. Brasília - Df: Centro de Documentação - Cedoc, 2016. 34 p.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Geração distribuída amplia número de conexões em 2015.2016.** Disponível em: <[http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output\\_Noticias.cfm?Identidade=9044&id=\\_area](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=9044&id=_area)>. Acesso em: 30 out. 2016.

Associação brasileira de energia solar fotovoltaica. **Marco histórico para o setor fotovoltaico brasileiro.** 2014. Disponível em: <<http://www.absolar.org.br/noticia/artigos-da-absolar/marco-historico-para-o-setor-fotovoltaico-brasileiro.html>>. Acesso em: 11 set. 2016.

B&W BABCOCK & WILCOX POWER GENERATION GROUP. **Bubbling Fluidized-Bed Boilers:** Burning Biomass and Low-Cost Fuels, clean, efficient, reliable and easy to operate. Barberton, Ohio, 2008. Disponível em: <<http://www.babcock.com/library/Documents/e1013161.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

BRITO, Ricardo G. de Carvalho et al. Geração Distribuída no Brasil: panorama, barreiras e oportunidades. Brasil, p.1-7, 2015.

BNDES E CGEE (Rio de Janeiro) (Org.). **Bioetanol de Cana-de-Açúcar:** Energia para o Desenvolvimento Sustentável. Rio de Janeiro, 2008. 316 p.

CEPEL - DTE - CRESESB. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual\\_de\\_Engenharia\\_FV\\_2014.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Manual_de_Engenharia_FV_2014.pdf)>. Acesso em: 30 out. 2016.

CCEE CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA (São Paulo). **Fontes de Energia:** Biomassa. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/onde-atuamos/fontes?\\_adf.ctrl-state=18fkvj96f7\\_4&\\_afrLoop=580166330520994](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/fontes?_adf.ctrl-state=18fkvj96f7_4&_afrLoop=580166330520994)>. Acesso em: 17 ago. 2016.

CCEE - CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA. Geração das usinas à biomassa cresce 15% no primeiro semestre de 2015. **Ccee,** São Paulo, 02 set. 2015. Disponível em: <[http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/noticias-opiniao/noticias/noticialeitura?contentid=CCEE\\_357762&\\_afrLoop=58085183352085](http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/noticias-opiniao/noticias/noticialeitura?contentid=CCEE_357762&_afrLoop=58085183352085)>

5#%40%3Fcontentid%3DCCEE\_357762%26\_afrLoop%3D580851833520855%26\_a df.ctrl-state%3D18fkvj96f7\_150>. Acesso em: 17 ago. 2016.

CHIGUERU TIBA (Org.). **Atlas Solarimétrico do Brasil**. Recife: Universitária da UFPE, 2000. 116 p. Disponível em: <[http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas\\_Solarimetrico\\_do\\_Brasil\\_2000.pdf](http://www.cresesb.cepel.br/publicacoes/download/Atlas_Solarimetrico_do_Brasil_2000.pdf)>. Acesso em: 17 ago. 2016.

CGEE - CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS. **Projeto: Estudo sobre as Possibilidades e Impactos da Produção de Grandes Quantidades de Etanol visando à Substituição Parcial de Gasolina no Mundo: Fase 1**. Brasília, 2009. 335 p.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. **Norma Técnica: Vinhaça – Critérios e procedimentos para aplicação no solo agrícola**. 3. ed. São Paulo: Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, 2015. 15 p. Disponível em: <[http://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/11/2013/11/P4.231\\_Vinhaça\\_-Critérios-e-procedimentos-para-aplicação-no-solo-agrícola-3ª-Ed-2ª-VERSAO.pdf](http://www.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/11/2013/11/P4.231_Vinhaça_-Critérios-e-procedimentos-para-aplicação-no-solo-agrícola-3ª-Ed-2ª-VERSAO.pdf)>. Acesso em: 11 set. 2016.

COMIN, Márcio Rogério. **GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DO BAGAÇO DA CANA DE AÇÚCAR**. 2010. 48 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Gestão de Tecnologia Industrial Sucroenergética, Departamento de Tecnologia Agroindustrial e Sócioeconomia Rural do Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal de São Carlos, Araras, 2010. Disponível em: <<http://www.etanol.ufscar.br/trabalhos-mta/sertaozinho-i-c/trabalhos/monografia-marcio-rogerio-comin.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2016.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da Safra Brasileira: Cana-de-açúcar Safra 2015/2016**. Brasília: Estúdio Nous, Sumac e Gepin, 2016. v. (4). Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15\\_12\\_17\\_09\\_03\\_29\\_boletim\\_cana\\_portugues\\_-\\_3o\\_lev\\_-\\_15-16.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/15_12_17_09_03_29_boletim_cana_portugues_-_3o_lev_-_15-16.pdf)>. Acesso em: 17 ago. 2016.

EVANGELISTA, Carlos A. F.. **GD para todos: O Falso Dilema da Geração Distribuída no Brasil**. 2016. Elaborado por Associação Brasileira de Geração Distribuída. Disponível em: <<http://www.righetti.co/clientes/abgd/downloads/modelodecontrato/GD-para-todos.pdf>>. Acesso em: 05 nov. 2016.

FERRAZ, J. M. G; PRADA, L. DE S; PAIXÃO, M. Â. **Certificação socioambiental do setor sucroalcooleiro**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 195p.

GOLDEMBERG, José et al. **Bioenergia no Estado de São Paulo:** Situação atual, perspectivas e barreiras. São Paulo: Marli Santos de Jesus, 2008.

**GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Energia Solar Paulista:** Levantamento do Potencial. São Paulo: Secretaria de Energia, 2013. 28 p. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/455.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

**GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Plano Paulista de Energia:** PPE 2020. São Paulo: Secretaria da Educação do Estado de São Paulo, 2012. 210 p. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/491.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2016.

**INSTITUTO NACIONAL DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. GD e Cogeração.** 2016. Disponível em: <[http://www.inee.org.br/forum\\_ger\\_distrib.asp](http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp)>. Acesso em: 30 out. 2016.

MACHADO, Fúlvio de Barros Pinheiro. **Brasil, a doce terra:** História do Setor. Disponível em: <<http://www.udop.com.br/index.php?item=noticias&cod=993>>. Acesso em: 16 ago. 2016.

**MICHELLON E., SANTOS, A. A. L.; RODRIGUES, J. R. A. Breve descrição do Proálcool e perspectivas futuras para o Etanol produzido no Brasil.** In: XLVI Congresso Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural, 2008, Rio Branco. Anais da Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Brasilia: SOBER, 2008.

**MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Plano Decenal de Expansão de Energia 2024.** Brasília, 2015. 467 p. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/default.aspx?CategorialD=345>>. Acesso em: 11 set. 2016.

**MINISTÉRIO MINAS ENERGIA. Brasil lança Programa de Geração Distribuída com destaque para energia solar.** Brasilia, 2015. Disponível em: <[http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticas/-/asset\\_publisher/32hLrOzMKwWb/content/programa-de-geracao-distribuida-preve-movimentar-r-100-bi-em-investimentos-ate-2030](http://www.mme.gov.br/web/guest/pagina-inicial/outras-noticas/-/asset_publisher/32hLrOzMKwWb/content/programa-de-geracao-distribuida-preve-movimentar-r-100-bi-em-investimentos-ate-2030)>. Acesso em: 05 nov. 2016.

NASTARI, Plinio. Market Update on Sugar & Ethanol. In: ISO DATAGRO NEW YORK SUGAR & ETHANOL CONFERENCE, Não use números Romanos ou letras,

use somente números Arábicos., 2016, Nova York. **Market Update on Sugar & Ethanol.** Nova York: Datagro, 2016. p. 1 - 48.

**NOVA CANA. Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas.** Disponível em: <<https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar/>>. Acesso em: 11 set. 2016.

**PINHO, João Tavares; GOLDINO, Marco Antonio (Org.). Manual de Engenharia para os sistemas Fotovoltaicos.** Rio de Janeiro: Cepel - Cresesb, 2014. 530 p. Disponível em: <<http://www.portal-energia.com/downloads/livro-manual-de-engenharia-sistemas-fotovoltaicos-2014.pdf>>. Acesso em: 11 set. 2016.

**PODER EXECUTIVO.** Congresso. Câmara dos Deputados. **Decreto Nº 19.717.** Brasília, Disponível em: <<http://www2.camara.leg.br/legin/fed/decret/1930-1939/decreto-19717-20-fevereiro-1931-518991-publicac>>. Acesso em: 16 ago. 2016. União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA).

**POVEDA, Manuel Moreno Ruiz.** **Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético.** 2014. 160 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

**SALOMON, Karina Ribeiro.** **Avaliação Técnico-Econômica e Ambiental da Utilização do Biogás proveniente da Biodigestão da Vinhaça em Tecnologias para Geração de Eletricidade.** 2007. 247 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2007. Disponível em: <<http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/27/2014/01/salomon.pdf>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

**SEABRA, J. E. A.** **Análise de opções tecnológicas para uso integral da biomassa no setor de canade-açúcar e suas implicações.** Campinas: Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, 2008 (Tese de Doutoramento).

**SILVA, B. C. da.** **Avaliação do Processo de Digestão Anaeróbia da Vinhaça para a Geração de Biogás.** Centro de Ciências Exatas, Naturais e de Tecnologia - Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental. Universidade de Ribeirão Preto, Ribeirão Preto, 2011.

**SUZUKI, Ana Beatryz Prenzier et al.** Uso de biogás em motores de combustão interna. **Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias,** Guarapuava -pr, v. 4, n. 1, p.221-237, Não é um mês valido! 2011. Disponível em: <<http://revistas.unicentro.br/index.php/repaa/article/viewFile/1405/1487>>. Acesso em: 11 set. 2016.

TROMBETA, Natália de Campos. **Uma aplicação de modelos de localização ótima para fins energéticos:** uma aplicação de modelos de localização ótima para fins energéticos. 2015. 150 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Economia Aplicada, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2015. Disponível em: <file:///C:/Users/Karime/Documents/Pósgraduação/Monografia/Setor Sucroenergético/Natalia\_de\_Campos\_Trombeta\_versao\_revisada (1).pdf>. Acesso em: 17 ago. 2016.

UNICA; APEXBRASIL. **Indústria Brasileira de Cana-de-açúcar:** Uma Trajetória de Evolução. 2012. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/linhadotempo/index.html>>. Acesso em: 17 ago. 2016.

UNICA (São Paulo). **Fotografia do setor sucroenergético no brasil.** 2015. Disponível em: <file:///C:/Users/Karime/Downloads/2f253574533bf5841df311d0e1f2e58e (2).pdf>. Acesso em: 17 ago. 2016.

UNICA. **A BIOELETRICIDADE DA CANA EM NÚMEROS:** AGOSTO DE 2016. São Paulo, 2016. 6 p. Disponível em: <[www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=36562050](http://www.unica.com.br/download.php?idSecao=17&id=36562050)>. Acesso em: 11 set. 2016.

VILLALVA, Marcelo Gradella; GAZOLI, Jonas Rafael. **Energia Solar Fotovoltaica:** Conceitos e Aplicações. São Paulo: Érica Ltda, 2012.

ZANINI. **Produtos Bioenergia:** Leito Fluidizado. Sertãozinho, 2016. Disponível em: <<http://www.zanini.ind.br/produtos/caldeiras-de-leito-fluidizado-borbulhante/>>. Acesso em: 17 ago. 2016.