

## Uma Alternativa Energética Sustentável Viável para o Brasil

### *A Viable Sustainable Energetic Alternative for Brazil*

**Marcelo Menezes Morato**

marcelomnzm@gmail.com

**Paulo Renato da Costa Mendes**

paulorc@hotmail.com

**Julio Elias Normey-Rico**

julio.normey@ufsc.br

#### **Resumo**

O futuro da geração de energia deve ser discutido e os holofotes apontam para a indústria nacional da Cana-de-Açúcar, atividade chave para a produção de açúcar e etanol. Este trabalho tem como objetivo propor e analisar uma estrutura híbrida para a geração de energia limpa, de forma sustentável, a ser integrada a usinas de Cana-de-Açúcar, considerando o cenário energético do Brasil. Uma estrutura eficiente de *microrrede* é proposta como uma nova abordagem para geração híbrida de energia, integrando a reutilização dos resíduos da Cana-de-Açúcar (como a biomassa e o biogás) combinada com o uso de fontes renováveis externas, tais como painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, almejando reduzir impactos ambientais. A modelagem do sistema proposto segue a metodologia dos *Energy Hubs*, que permite a integração de diferentes transportadores, geradores e acumuladores de energia em um mesmo modelo. Em sequência, uma abordagem para a operação *ótima* é apresentada, seguindo a metodologia do *Controle Preditivo baseado em Modelo*. Os principais resultados deste trabalho se resumem em: *a)* resultados de simulação que provam a operação satisfatória da *microrrede* proposta, sua flexibilidade para cumprir diferentes cenários de demanda energética, como também os ganhos práticos em termos econômicos e de sustentabilidade; *b)* uma discussão e análise de custo e viabilidade econômica completa, através de cálculos de *payback*, apontando para a possibilidade de implementação em um futuro próximo.

**Palavras-chave:** Biomassa; Fontes Renováveis; Eficiência Energética; Desenvolvimento Sustentável; Brasil.



### **Abstract**

*The future of energy generation must be discussed and highlights are given to the national Sugarcane Industry, key activity for the production of ethanol and sugar. This work has the objective of proposing and analysing a hybrid scheme for clean energy generation to be integrated to such Sugarcane industries in Brazil. An efficient microgrid strategy is presented as a new approach toward hybrid generation, with the re-use of sugarcane residuals (such as biomass and bio-gas), combined with external renewable sources, such as PV panels and wind turbines. The system is modelled according to the Energy Hubs method. In the sequence, an approach for the optimal control of such plant is presented, using Model Predictive Control. The main results of this work are: a) simulation assessments that demonstrate the satisfactory operation of the proposed microgrid, as well as the practical gains in terms of profits and sustainability; b) a discussion and a cost analysis for this system, using payback analysis, point to a real possibility of this application in the future.*

**Keywords:** Biomass; Renewable Sources; Energy Efficiency; Sustainable Development; Brazil.

## 1. Introdução

O uso e a geração de energia de maneiras eficientes são peças chave para um futuro mais sustentável e ecologicamente amigável, como é discutido por Johansson et al. (2004), e também por Evans et al. (2009).

Muito é discutido sobre o uso de fontes renováveis, mas é importante ressaltar que, mesmo que estas sejam muito atrativas, elas são intermitentes, difíceis de prever e altamente dependentes das condições climáticas da região planta energética, como é colocado por Shafiee e Topal (2009).

De forma geral, o maior problema relacionado a sistemas de energia renovável é a falta de fiabilidade e a qualidade inconstante (sujeita a flutuações imprevisíveis) na energia produzida. Uma solução prática para tratar este problema é considerar a inclusão de sistemas intermediários de armazenamento de energia, como baterias, *super*-capacitores, e outros, ver a discussão de Dell e Rand (2001).

Este trabalho visa o caso da geração distribuída de energia. Isso refere-se a um conjunto de plantas de energia, localizadas perto do usuário final, que podem ser integradas a rede elétrica ou operadas de forma autônoma e que progressivamente tem sido chamadas de *microrredes* (Lassester e Piagi, 2004), (Barnes et al., 2007).

### 1.1 O Cenário Energético Brasileiro

O Brasil tem uma matriz energética imensamente diversificada (Mantovani et al., 2017), com uma parcela de 43,5% de renováveis. Desta parcela, o etanol e a biomassa da cana-de-açúcar correspondem a 40,1%.

A energia solar, por exemplo, pode ser considerada como uma das possíveis fontes de energia que podem aumentar a quantidade de geração renovável, pois o país tem um grande potencial solar em varias regiões. O investimento neste setor tem aumentado nos últimos anos e apresenta custos competitivos (Tiba et al, 2000).

O Brasil é o maior produtor de Cana-de-açúcar do mundo. A indústria da Cana-de-açúcar tem grande importância para este estudo, pois o tratamento da cana bruta tem uma grande quantidade de resíduos orgânicos que podem ser tratados como *bio*-fontes de energia. Existem três principais resíduos que podem ser usados para geração de energia: o bagaço, o palhico (palha) e a vinhaça.

O bagaço é o principal resíduo da cana. Ele é muito poluente se for descartado sem o devido tratamento e, por isso, ele é comumente usado como combustível de queima para caldeiras, como explica Alves (2006). Um estudo de diferentes tecnologias para o uso do bagaço é encontrado em (Dantas, Legey e Mazzone, 2013).

A palha da cana é composta de folhas secas, verdes e pela ponteira da cana-de-açúcar. Este resíduo é responsável por aproximadamente um terço da fonte primária de energia da cana, como detalha Leal et al. (2013). Porém, ainda não é explorado em toda sua plenitude. No Brasil, é muito comum a palha ser deixada no chão dos campos ou ser queimada no período de pré-colheita.

Finalmente, a vinhaça é um resíduo da destilação do caldo da cana-de-açúcar (garapa) que pode ser transformado em biogás, considerando digestão anaeróbica. A fiabilidade econômica, o potencial energético e as emissões de CO<sub>2</sub> evitadas com o uso de biogás proveniente da vinhaça são discutidas por Bernal et al. (2017).

Em termos de quantificação destes resíduos: para cada tonelada de cana-de-açúcar processada, aproximadamente 730 kg de garapa são obtidos e mais de 250 kg de bagaço. Em

outros termos: para cada litro de etanol produzido, 12 litros de vinhaça podem ser obtidos das sobras.

Uma discussão completa do uso de algumas dessas fontes como possíveis *biocombustíveis* e algumas projeções para o futuro foram traçadas por Demirbas (2008).

## 1.2 Síntese do Problema

O problema investigado neste trabalho é como adequadamente responder a seguinte pergunta (que atualmente está em aberto): **Como integrar o uso de fontes renováveis a matriz energética brasileira de forma factível e rentável?**

Este trabalho detalha a tecnologia presente na maioria das indústrias de Cana-de-açúcar, no Brasil, e, então, propõe uma nova solução de geração híbrida, considerando a reutilização dos resíduos da cana em conjunto com uso de fontes renováveis externas, como painéis fotovoltaicos e turbinas eólicas, visando prevenir e, se quando não for possível, atenuar as emissões e o impacto ambiental.

A solução proposta é uma *microrrede* baseada em uma usina de cana-de-açúcar real, com a adição de novos subsistemas de geração renovável. Esta solução é modelada de acordo com a metodologia dos *Energy Hubs*, definida por Geidl e Andersson (2007) como uma interface generalizada entre produtores, consumidores e linhas de transmissão de energia. Tal formalização permite alta flexibilidade em termos de detalhe de modelagem matemática e precisão. Em seguida, uma abordagem para o funcionamento ótimo desta *microrrede* é detalhada, seguindo a metodologia do *Controle Preditivo baseado em Modelo*.

Este documento é organizado da seguinte forma: primeiramente objetivos são apresentados; em seguida, métodos de modelagem e de controle são discutidos; resultados de simulação do sistema mostrados, e uma análise de custo detalhada é feita; por fim, conclusões são apresentadas.

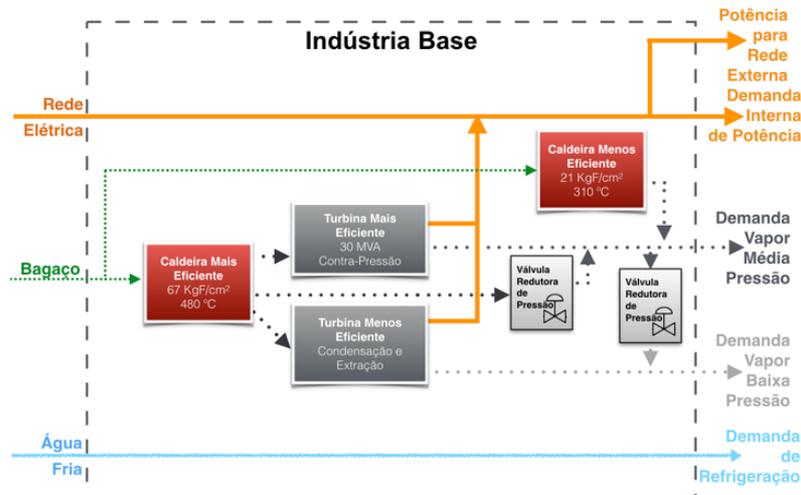
## 2. Objetivos

Como foi explicado, este trabalho propõe uma estrutura genérica para geração híbrida de energia, baseada em plantas de processamento de cana-de-açúcar, de forma a integrar o uso de fontes renováveis à matriz energética brasileira de forma factível.

### 2.1 A Indústria da Cana-de-Açúcar

A maioria das usinas que processam a Cana-de-açúcar, no Brasil, tem uma estrutura de funcionamento similar. Essas indústrias têm diversas demandas internas dado à produção de açúcar e etanol, tais como: produzir vapor a diferentes níveis de pressão, produzir água fria para resfriar equipamentos (tanques com óleo quente, entre outros) e produzir energia elétrica para manter a própria usina. Além disso, a energia elétrica excedente é costumeiramente vendida a um distribuidor local (rede externa).

Na Figura 1 é apresentado uma representação de uma comum indústria de processamento de cana-de-açúcar (chamada aqui de *Indústria Base*), com todos seus subsistemas, entradas e saídas. Vale ressaltar que uma prática comum nos canaviais é a estocagem de bagaço em pilhas, como retrata a Figura 2. Essas pilhas podem ter até 300 m de largura, 100 m de comprimento e 40 m de altura, como detalhado por Dos Santos et al. (2011), estocando mais de 100000 toneladas desta biomassa. Assim sendo, este trabalho considera que a *Indústria Base* tem sua própria área dedicada ao armazenamento de bagaço.



**Figura 1 – Indústria Base. Fonte: elaborada pelos autores.**



**Figura 2 – Estoque de Bagaço em um Canavial. Fonte: elaborada pelos autores.**

## 2.2 Mistura de Biomassa

Uma das principais mudanças na *Indústria Base* proposta neste trabalho é como as caldeiras devem ser movidas: com uma mistura apropriada de biomassas.

Como detalham Innocente (2011) e Maués (2007), uma maximização do poder calorífico do bagaço pode ser atingida se este é apropriadamente misturado com palhiço. Neste sentido, a Tabela 1 visa justificar porque deve-se usar uma mistura de bagaço com palhiço, ressaltando que um poder calorífico mais elevado acarreta em uma maior geração energética.

**Tabela 1 – Misturas de Biomassas.**

Amostra	Poder Calorífico Superior	Potencial Energético
100 % Bagaço	17.90 M.J/kg	1.40
90% Bag. 10% Palhiço	18.66 M.J/kg	1.42
80% Bag. 20% Palhiço	18.59 M.J/kg	1.49

70% Bag. 30% Palhiço	18.42 M.J/kg	1.54
60% Bag. 40% Palhiço	18.28 M.J/kg	1.50
50% Bag. 50% Palhiço	18.05 M.J/kg	1.65

Assim sendo, uma das propostas deste trabalho é escolher um fator de mistura de biomassa ótimo, tal que a produção de vapor pelas caldeiras sempre seja maximizada.

### 2.3 A Microrrede Proposta

Agora, esta subseção detalhará o sistema de geração híbrido proposto para o cenário energético brasileiro, composto de subsistemas a serem adicionados a *Indústria Base*.

A *microrrede* proposta (ver representação completa na Figura 3) é composta dos subsistemas listados a seguir: Duas caldeiras, com diferentes eficiências, já presentes na *Indústria Base*; Duas turbinas, de diferentes eficiências, também já presentes na *Indústria Base*; Duas válvulas redutoras de pressão, já presentes anteriormente; Um estoque de bagaço; Uma estrutura de geração de calor e potência combinada (chamada de *CHP*), a ser acionado à *Indústria Base*; Um resfriador de água, a ser acionado à *Indústria Base*; Um tanque armazenador de água quente, a ser acionado à *Indústria Base*; Painéis fotovoltaicos (FV), a serem acionados à *Indústria Base*; Painéis de aquecimento solar (AS), a serem acionados à *Indústria Base*; Uma turbina eólica, a ser acionada à *Indústria Base*; Um estoque de palhiço, a ser acionado à *Indústria Base*; Um trocador de calor (sistema que converte vapor a alta pressão em água quente), a ser acionado à *Indústria Base*; Um biodigestor de vinhaça, responsável pela produção de biogás, a ser acionado à *Indústria Base*; Um tanque para o estoque de biogás comprimido, a ser acionado à *Indústria Base*; Um banco de baterias, a ser acionado à *Indústria Base*.

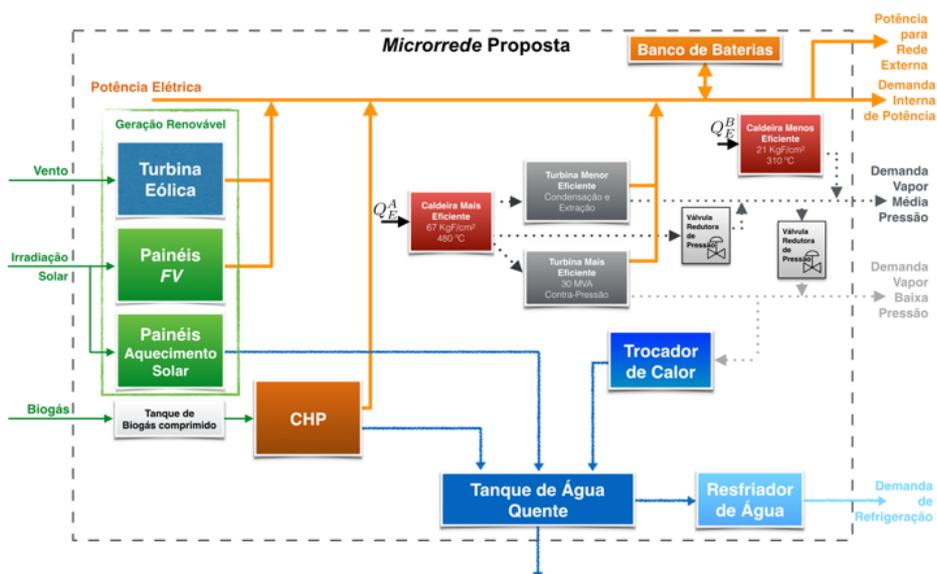


Figura 3 – Microrrede Generalizada Proposta. Fonte: elaborada pelos autores.

Esta *microrrede* generalizada é uma adaptação plausível de uma indústria de processamento de cana-de-açúcar que já produza sua própria energia. Ela é interessante, sob um olhar ecológico, pois propõe o uso de fontes renováveis e a reciclagem dos resíduos da cana-de-

açúcar.

Comparando a *Indústria Base* e a *microrrede* proposta, há um aumento na capacidade de geração de energia e, além disso, um aumento da eficiência e da sustentabilidade entre os sistemas. A *microrrede* visa usar a melhor tecnologia possível de tal forma a respeitar normas mínimas ambientais e o estado da arte em automatização de processos (com técnicas de controle e modelagem avançadas, a serem detalhadas na próxima seção).

É importante ressaltar que os subsistemas adicionais propostos são viáveis dentro do contexto brasileiro. Como exemplo: muitas das indústrias de cana-de-açúcar situam-se, no Brasil, em locais de alta insolação anual e grande disponibilidade de vento, onde painéis *FV* e turbinas eólicas encaixam-se perfeitamente.

Vale ressaltar que os símbolos  $Q_E^A$  e  $Q_E^B$ , na Figura 2, representam fluxos de misturas de biomassa (bagaço combinado com palhicho de forma ótima) que propulsionam as caldeiras.

Sobre os subsistemas da *microrrede*: as caldeiras devem operar de tal forma a produzir as demandas internas de vapor; já as turbinas e o CHP visam produzir energia elétrica que, junto com a geração renovável dos painéis *FV* e da turbina eólica, devem atender as demandas energéticas.

O *CHP* é um gerador de energia de altíssima eficiência, movido a gás. Com a combustão do gás de entrada, este sistema produz energia elétrica e, também, água quente. No caso deste estudo, o *CHP* é propulsionado com o uso de biogás, proveniente da digestão anaeróbica da vinhaça.

A proposta desta *microrrede* foi baseada em um estudo de uma planta real de processamento de cana-de-açúcar, localizada no estado do *Paraná*. É importante notar que este sistema de geração de energia híbrida é sujeito à diversas restrições de operação. Como tratar estas restrições é um problema de *Controle Ótimo*, detalhado na próxima seção.

### 3. Métodos

Nesta seção, serão mostrados os métodos utilizados para modelar e controlar a *microrrede* proposta. Modelagem, aqui, refere-se a como representar o sistema de um ponto de vista matemático, tal que este possa ser simulado (com uso de ferramentas adequadas) e analisado mais detalhadamente. Uma modelagem matemática eficiente permite que técnicas avançadas de Controle sejam aplicadas ao sistema proposto. Controle, por sua vez, diz respeito a como administrar um sistema de energia, tal que seja produzida a máxima quantidade possível de energia elétrica, dado as condições de operação.

#### 3.1 Os *Energy Hubs*

A modelagem seguida neste trabalho é a dos *Energy Hubs*. Um *Energy Hub* pode ser usado para modelar a interface entre produtores e consumidores de energia e a linha de transmissão. De um ponto de vista externo, um *Energy Hub* pode ser representado como um caixa-preta com os seguintes elementos: (1) entradas e saídas de potência elétrica; (2) conversão de energia; (3) armazenamento de energia. Isto é esquematizado na Figura 3, onde (a), (b) e (c) podem coexistir, mas isso não é condição imperativa. Como exemplo: um painel *FV* é composto unicamente de (b), entretanto um banco de baterias é representado somente por (c).

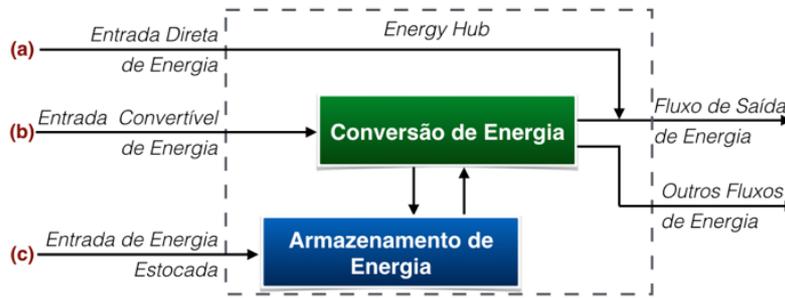


Figura 4 – Energy Hub

Seguindo a modelagem matemática dos *Energy Hub*, encontra-se uma representação final a variáveis de estados, colocada por Morato et al. (2018). Este tipo de representação permite que um sistema seja descrito relacionando a sua condição em um próximo instante de observação, dado a condição atual.

### 3.2 Controle Preditivo baseado em Modelo

Dado que a modelagem do sistema já foi devidamente apresentada, é necessário detalhar as técnicas de controle aplicadas a *microrrede*. Neste trabalho é seguida a metodologia do *Controle Preditivo baseado em Modelo (CPM)*, como foi outrora apresentado por Morato et al. (2017). Resumidamente, a metodologia do *CPM* permite escolher, a cada hora, as configurações que devem ser aplicadas ao sistema para que se atinja uma produção energética máxima. Isso se dá através da solução de um problema de otimização quadrático sobre restrições, como detalhado por Bordons e Camacho (2007).

## 4. Resultados e Discussão:

Visando demonstrar a operação da *microrrede* de geração híbrida proposta, esta seção expõe alguns resultados de simulação e uma análise de custo para uma possível implementação futura.

### 4.1 Resultados de Simulação

As simulações aqui mostradas foram obtidas usando os seguintes softwares: *MATLAB*, *Yalmip* e *CPLEX*.

Para um primeiro cenário, consideramos a geração de energia proveniente da *microrrede* proposta, dado um mês de disponibilidade média de sol e vento. Os respectivos resultados são colocados na Figura 5, onde observa-se a energia total vendida, a energia produzida pelas turbinas, pelo *CHP* e pelas fontes renováveis.

Já na Figura 6, observa-se um segundo cenário considerando apenas a produção pela *Indústria Base*. Neste cenário, considera-se que as caldeiras são propulsadas pelo uso de gás natural (sem a reutilização dos resíduos da cana), gastando aproximadamente 11.78 toneladas de gás.

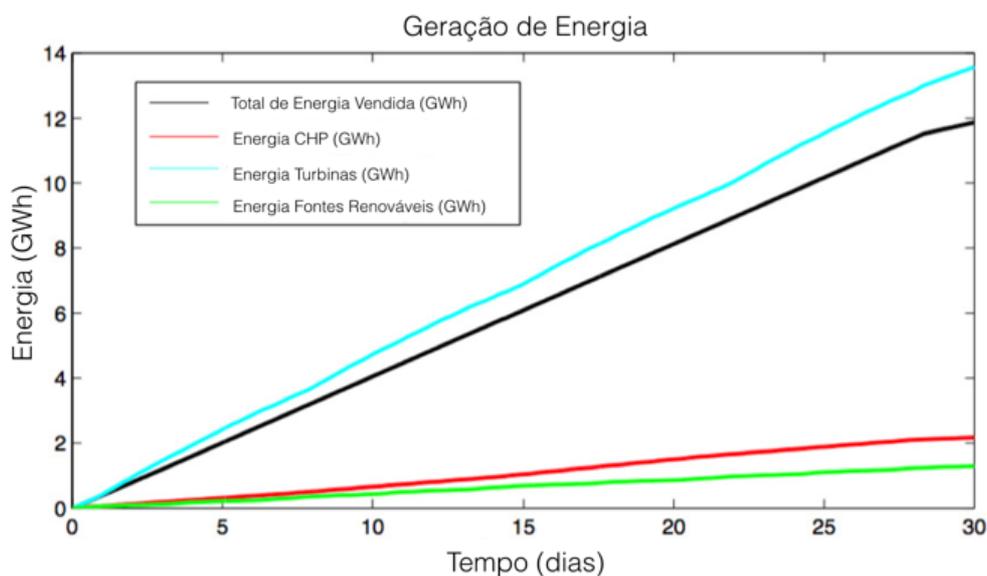


Figura 5 – Primeiro Cenário de Simulação. Fonte: elaborada pelos autores.

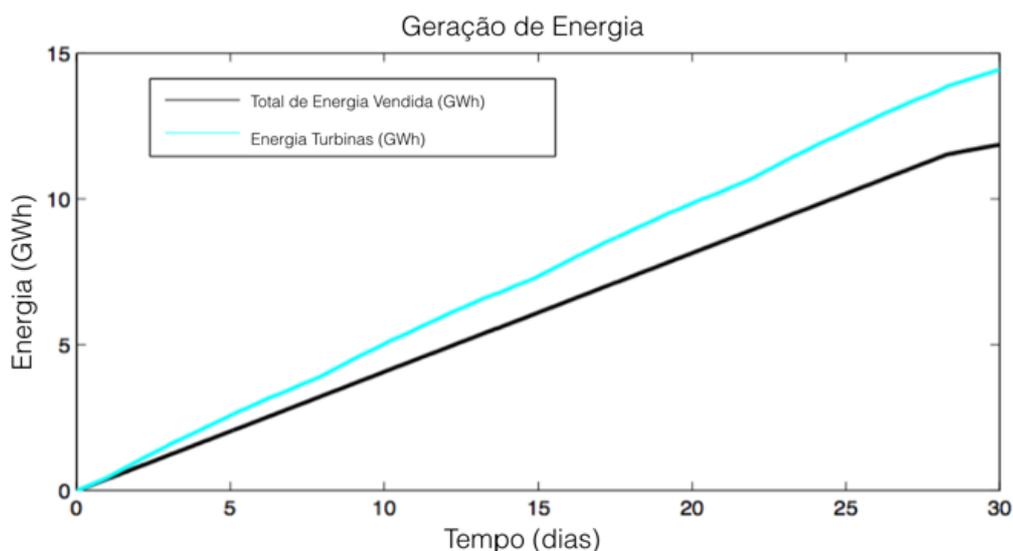


Figura 6 – Segundo Cenário de Simulação. Fonte: elaborada pelos autores.

Como pôde ser visto, o ganho em termos de produção de energia é muito grande se compararmos a *microrrede* proposta com a *Indústria Base*.

Já em termos de energia *limpa*, sustentável e lucro aproximado, em um mês de geração, o leitor deve observar a Tabela 2, que justifica ainda mais a importância da *microrrede* proposta.

Tabela 2 – Ganhos com a Microrrede.

Subsistema	Ganhos Energéticos	Lucro Aproximado
<b>CHP</b>	1920 MWh	\$ 89,376.00
<b>Painéis FV:</b>	-	-

Alta Insolação	228 MWh	\$10,613.40
Média Insolação	189 MWh	\$8,797.95
Baixa Insolação	123.6 MWh	\$ 5, 753.58
<b>Turbina Eólica:</b>	-	-
Muito Vento	1578 MWh	\$ 73, 455.90
Vento Médio	888 MWh	\$41,336.40
Pouco Vento	498 MWh	\$23,181.90

#### 4.2 Análise de Custo

Para explorar ainda mais a viabilidade do sistema de energia proposto, uma análise de custo através de técnicas de *payback* foi desenvolvida, com auxílio do software *HOMER Pro*. Os resultados obtidos mostram que o investimento neste sistema seria pago em até 5 anos e um mês. Estes dados são detalhados na Tabela 3.

**Tabela 3 – Análise de Payback.**

Custo de Capital	\$ 16,966,791.30
Operação Manutenção	\$513,446.55
Lucro Venda Energia	\$ 8,394,598.06
Lucro Líquido	\$ 3,312,477.72
Tempo de <i>Payback</i>	5.12 anos

#### 5. Conclusões

O planejamento da geração de energia está mudando bruscamente para países em desenvolvimento, como o Brasil. Este trabalho visou discutir como o paradigma da transição energética pode ocorrer no Brasil, de uma maneira viável. Para isso, uma possível estrutura de geração híbrida foi apresentada e analisada sob simulação.

#### Referências

- BARNES, Mike et al. Real-world microgrids-an overview. In: **2007 IEEE International Conference on System of Systems Engineering**. IEEE, 2007. p. 1-8.
- BERNAL, Andressa Picionieri et al. Vinasse biogas for energy generation in Brazil: An assessment of economic feasibility, energy potential and avoided CO<sub>2</sub> emissions. **Journal of cleaner production**, v. 151, p. 260-271, 2017.
- BORDONS, Carlos; CAMACHO, E. F. **Model predictive control**. Springer Verlag London Limited, 2007.
- DANTAS, Guilherme A.; LEGEY, Luiz FL; MAZZONE, Antonella. Energy from sugarcane bagasse in Brazil: An assessment of the productivity and cost of different technological routes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 21, p. 356-364, 2013.
- DELL, Ronald M.; RAND, David Anthony James. Energy storage—a key technology for global energy sustainability. **Journal of power sources**, v. 100, n. 1-2, p. 2-17, 2001.
- DEMIRBAS, Ayhan. Biofuels sources, biofuel policy, biofuel economy and global biofuel projections. **Energy conversion and management**, v. 49, n. 8, p. 2106-2116, 2008.
- DOS SANTOS, Moacyr L. et al. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. **Quim. Nova**, v. 34, n. 3, p. 507-511, 2011.
- EVANS, Annette; STREZOV, Vladimir; EVANS, Tim J. Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies. **Renewable and sustainable energy reviews**, v. 13, n. 5, p. 1082-1088, 2009.
- GEIDL, Martin; ANDERSSON, Göran. Optimal power flow of multiple energy carriers. **IEEE Transactions on power systems**, v. 22, n. 1, p. 145-155, 2007.
- INNOCENTE, Andréia Franco. Cogeração a partir da biomassa residual de cana-de-açúcar: estudo de caso. 2011.
- JOHANSSON, Thomas B. et al. **The potentials of renewable energy**. March, 2004.
- LASSETER, Robert H.; PIAGI, Paolo. Microgrid: A conceptual solution. In: **IEEE Power Electronics Specialists Conference**. 2004. p. 4285-4291.
- LEAL, Manoel Regis LV et al. Sugarcane straw availability, quality, recovery and energy use: a literature review. **Biomass and Bioenergy**, v. 53, p. 11-19, 2013.
- MANTOVANI, Paula Renata Albrecht; NEUMANN, Pamela Nicole; EDLER, Marco Antonio Ribeiro. Matriz energética brasileira: em busca de uma nova alternativa. **Revista Interdisciplinar de Ensino, Pesquisa e Extensão**, v. 4, n. 1, 2017.
- MAUÉS, J. ARONE. Maximização da geração elétrica a partir do bagaço e palha em usinas de açúcar e álcool. **Revista Engenharia**, v. 583, p. 88-98, 2007.
- MORATO, Marcelo Menezes et al. Optimal operation of hybrid power systems including renewable sources in the sugar cane industry. **IET Renewable Power Generation**, v. 11, n. 8, p. 1237-1245, 2017.
- MORATO, Marcelo Menezes et al. Future hybrid local energy generation paradigm for the Brazilian sugarcane industry scenario. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, v. 101, p. 139-150, 2018.
- SHAFIIE, Shahriar; TOPAL, Erkan. When will fossil fuel reserves be diminished?. **Energy policy**, v. 37, n. 1, p. 181-189, 2009.
- TIBA, Chigueru et al. Atlas Solarimétrico do Brasil: banco de dados terrestres. **Recife: Editora Universitária da UFPE**, p. 32, 2000.

### **Financiamento**

Os autores agradecem o *CNPq* e o *Ministerio de Economía y Competitividad de España* por financiarem, respectivamente, os projetos *CNPq401126/2014-5*, *CNPq303702/2011-7* e *DPI2016-78338-R*.