

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CÂMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

LEONARDO SANTINI NOGAROTO

**USO DA ENERGIA DE COGERAÇÃO EM USINA
SUCROALCOOLEIRA PARA IRRIGAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

**Ilha Solteira
2023**

LEONARDO SANTINI NOGAROTO

**USO DA ENERGIA DE COGERAÇÃO EM USINA
SUCROALCOOLEIRA PARA IRRIGAÇÃO DA CANA-DE-AÇÚCAR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à
Faculdade de Engenharia Unesp, como parte
dos requisitos para obtenção do título de
Engenheiro Agrônomo

Orientador: Prof. Dr. João Luis Zocoler

ILHA SOLTEIRA

2023

FICHA CATALOGráfICA

Desenvolvida pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

M775a
Mogarofo, Leonardo Santini.
Uso da energia de cogeração em usinas sucroalcooleiras para irrigação de
cana-de-açúcar / Leonardo Santini Mogarofo. -- Ilha Solteira: [jun.], 2023.
50 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso [Graduação em Engenharia Agrônoma] -
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2023

Orientador: João Luis Zocoler

Inclui bibliografia

1. Energia renovável. 2. Pivô central. 3. Irrigação de cana.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
FACULDADE DE ENGENHARIA - CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA

CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRONÔMICA

ATA DA DEFESA – TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: Uso da energia de cogeração em usina sucroalcooleira para irrigação da cana-de-açúcar

ALUNO: *Leonardo Santini Nogaroto* RA:

ORIENTADOR: João Luís Zocoler

Aprovado ☒ - Reprovado () pela Comissão Examinadora com Nota: 7,5

Comissão Examinadora:



Prof. Dr. João Luís Zocoler
Presidente (Orientador)



Prof. Dr. Ricardo Antônio Ferreira Rodrigues



Prof. Dr. Fernando Braz Tangerino Hernandez



Leonardo Santini Nogaroto

Ilha Solteira, 05 de julho de 2023.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por sempre estar comigo em todos os momentos, do começo da vida até o presente momento.

À minha família que me sustentaram, apoiaram em todas as decisões e foram a minha base em todos os momentos, principalmente nos difíceis, sem eles nada disso seria possível.

Ao amor da minha vida, Luma Helena Ponte, que me apoiou e me auxiliou em tudo, que esteve comigo em todas as decisões, que me acalmava e acalentava mesmo nos momentos que pareciam impossíveis.

Aos meus avós, Luis Santini e Holanda Guerreiro, sem eles, não seria possível estar aonde estou hoje e muito menos dar continuidade ao legado deles, minha eterna gratidão aqueles que nunca saíram do meu coração e das minhas inspirações.

Aos meus amigos, Vinicius Catalani, Giovanna Carvalho, Gabriela Boldrini, Larissa de Carli, Leticia Schenaide, Renan Sant'Anna, e principalmente, a melhor dupla e melhor amiga que a Unesp me deu, Isabela Oliveira, quem me ajudou em diversas madrugadas estudando e nunca mediu esforços para me ajudar.

Ao meu orientador, João Luis Zocoler, quem me mostrou, me ensinou e me motivou a continuar aprendendo sobre hidráulica e irrigação. Além de toda a paciência como orientador.

E à João Bevilacqua e aos funcionários da Pérola Insumos pela oportunidade de estágio com ensinamentos e conhecimentos ao longo de todo o período na revenda.

RESUMO

A utilização de fontes de energia alternativas e renováveis nas mais variadas atividades humanas está cada vez mais difundida e necessária na atualidade, considerando a questão da sustentabilidade e previsão não distante do esgotamento das fontes não renováveis, especialmente o petróleo. O bagaço da cana de açúcar em uma usina de açúcar e álcool é, na maioria das vezes, utilizado para gerar energia elétrica para consumo próprio no processo industrial da usina, havendo um excedente que frequentemente é vendido para a concessionária de energia elétrica mais próxima, trazendo um algum retorno para o usineiro, considerando se tratar de um subproduto. Contudo, há a possibilidade de parte desse excedente gerado ser utilizado para irrigar também parte do canavial produzindo maior quantidade de açúcar (ou etanol). Sendo assim, o presente trabalho teve como objetivo quantificar a necessidade de queima do bagaço em cogeração para funcionamento de um pivô central utilizado para irrigação da cana e avaliar o custo benefício da adoção dessa prática. No trabalho foi considerada uma área irrigada de 100,66 hectares por equipamento pivô central no município de Pereira Barreto sob três cenários de expectativa de acréscimo de produtividade (35, 70 e 100%) e três diâmetros propostos para a tubulação de recalque do sistema de bombeamento, que resultaram em três diferentes demandas de energia elétrica e, conseqüentemente, quantidade de bagaço utilizado na geração. Os resultados demonstraram nos três cenários a viabilidade da irrigação ao invés da venda da energia para a concessionária de energia elétrica. Em todos os cenários a quantidade de bagaço produzido na área irrigada foi suficiente para gerar a própria energia elétrica consumida. Nos cenários 2 e 3 (70 e 100% de acréscimo na produtividade) a quantidade de bagaço produzida apenas pelo acréscimo devido à irrigação já foi suficiente para alimentação do sistema elétrico do pivô central. Além dos benefícios diretos, a irrigação da cana traz benefícios indiretos, como maior longevidade do canavial e otimização das áreas de produção.

Palavras-chave: Energia renovável; pivô central; bagaço de cana

ABSTRACT

The use of alternative and renewable energy sources in various human activities is increasingly widespread and necessary nowadays, considering the issue of sustainability and future not distant exhaustion of non-renewable sources, especially oil. The sugarcane bagasse in a sugar and ethanol plant is often used to generate electricity for internal consumption in the industrial process. However, there is an excess that is sold to the nearest electric utility company, providing some return for the plant owner, considering it as a byproduct. But, there is the possibility of using part of this excess to also irrigate a portion of the sugarcane fields, resulting in increased sugar (or ethanol) production. Therefore, this study aimed to quantify the burning requirement of bagasse in cogeneration for the operation of a central pivot used for irrigating the sugarcane and evaluate the cost-benefit of adopting this practice. The study considered an irrigated area of 100.66 hectares using a central pivot system in the municipality of Pereira Barreto under three scenarios of expected productivity increase (35%, 70%, and 100%) and three proposed diameters for the discharge pipeline of the pumping system, resulting in three different electricity demands and, consequently, the amount of bagasse used in generation. The results showed the viability of irrigation instead of selling electricity to the utility company in all three scenarios. In all scenarios, the amount of bagasse produced in the irrigated area was sufficient to generate the electricity consumed. In scenarios 2 and 3 (70% and 100% productivity increase), the amount of bagasse produced solely due to irrigation was already sufficient to power the central pivot's electrical system. In addition to the direct benefits, sugarcane irrigation brings indirect benefits, such as increased longevity of the sugarcane fields and optimization of production areas.

Keywords: Renewable energy; central pivot; sugarcane bagasse.

Sumário

1	INTRODUÇÃO	9
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	10
2.1	Fontes de energia explorada pelo homem	10
2.1.1	Fontes não renováveis	10
2.1.2	Fontes renováveis.....	13
2.2	Uso do bagaço de cana na produção de energia elétrica.....	17
2.2.1	Outras fontes de biomassa disponíveis	19
2.2.2	Produção e demanda de energia elétrica numa usina de açúcar e álcool	20
2.2.3	Cogeração e venda de energia excedente numa usina de açúcar e álcool	23
2.3	Aspectos gerais sobre a cana-de-açúcar	24
2.3.1	Efeitos da irrigação e da fertirrigação na produtividade da cana de açúcar... ..	28
2.3.2	Métodos de irrigação de canaviais	32
3	MATERIAL E MÉTODOS	34
3.1	Locação do sistema de irrigação	34
3.2	Estimativa da necessidade de irrigação da cana e estabelecimento da lâmina de irrigação de projeto do sistema pivô central.....	34
3.3	Seleção dos componentes básicos do sistema de bombeamento	38
3.4	Consumo de energia elétrica do sistema de irrigação e quantidade de bagaço de cana para geração da energia do sistema de bombeamento e de movimentação das torres do pivô central	40
3.5	Avaliação econômica do uso da energia da cogeração para irrigação da cana ..	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5	CONCLUSÕES.....	49
	REFERÊNCIAS.....	50

1 INTRODUÇÃO

A utilização de fontes de energia alternativas e renováveis nas mais variadas atividades humanas está cada vez mais difundida no mundo atual. E são várias as razões para tal, entre elas temos: i) Previsibilidade do esgotamento das reservas petrolíferas mundiais em um prazo estimado de 50 anos, sendo que o petróleo é ainda a matriz energética mundial; ii) Disponibilidade tecnológica atual para uso de dispositivos que permitem o aproveitamento das fontes alternativas com melhor rendimento e com custos compatíveis; iii) Necessidade de evoluir para um desenvolvimento sustentável, pautado em legislação ambiental cada vez mais rigorosa; iv) Versatilidade de tecnologias e dispositivos que possibilitam explorar as fontes de energia com maior potencial em cada região do planeta; v) Consciência de que fontes como carvão mineral e gás natural também são finitas e poluentes, tendendo a escassez.

Por sua vez, a agricultura irrigada também é uma atividade que demanda muita água e energia para o bombeamento, sendo responsável por contribuir com cerca de 40% dos alimentos consumidos. A maioria das culturas responde intensamente em produtividade quando se pratica a irrigação.

A tendência é de que a agricultura irrigada atinja patamares extraordinários, visto que o gasto de água e energia é suprido pela alta produtividade e manejo da área. E a conscientização e aplicação correta do sistema, garante disponibilidade de alimento e água para toda a população.

No caso da cana-de-açúcar, embora seja uma cultura relativamente tolerante à escassez hídrica e, na maioria das áreas de produção a água aplicada artificialmente é essencialmente para distribuição da vinhaça, sua produtividade quando irrigada pode dobrar, além de possibilitar maior longevidade do canavial.

As usinas sucroalcooleiras, cada vez mais estão aproveitando o resíduo da moagem, o bagaço, para usá-lo em caldeiras que, por sua vez, movem turbinas que transformam em energia elétrica. De um modo geral, além de atender a demanda de eletricidade na usina, há um excedente que é comercializado com a concessionária de energia elétrica local, gerando uma renda extra. Contudo, o excedente pode ser utilizado para outra finalidade da usina, ou seja, aumentar a produtividade da cana por meio da irrigação.

Sendo assim, este trabalho teve como objetivo quantificar a necessidade de queima do bagaço em cogeração para funcionamento de um pivô central utilizado para irrigação da cana e avaliar o custo-benefício da adoção desta prática.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Fontes de energia explorada pelo homem

Diversas são as fontes de energia de energia exploradas pelo homem, podendo ser divididas em renováveis e não renováveis. As não renováveis representam a grande maioria, sendo o petróleo a mais usada (35%), seguido pelo carvão (23%), gás natural (22%) e por fim, a energia nuclear (7%), havendo apenas uma pequena parcela para as formas renováveis (13%).

Devido ao uso abrupto do petróleo, as reservas estão esgotando, e a busca por novos combustíveis é incansável, reservas de gás natural e de carvão tenderão ao esgotamento com o passar dos anos e sobrarão somente aquela chamada de “renovável”. Até então pouco explorada, mas com alto potencial energético e ecológico, graças aos expressivos avanços na tecnologia e pesquisa (GOLDEMBERG; 2006).

As energias renováveis são oriundas de fontes que não se esgotam, ou seja, que mesmo com a sua utilização e extração, elas se renovam e estão disponíveis constantemente, são elas: hidráulica, fotovoltaica, eólica e de biomassa.

A exploração do tipo de energia é relativa a cada país e com a disponibilidade de recursos para tal, no Brasil, por exemplo, as energias renováveis tomam um grande destaque, isso porque as grandes hidroelétricas estão presentes no continente. Outros países, como os Estados Unidos, utilizam os combustíveis fósseis para gerar energia, principalmente o carvão e o gás natural. (Energy Information Administration – IEA, 2021).

2.1.1 Fontes não renováveis

O petróleo é uma matéria prima formada há milhões de anos, a partir de animais e vegetais que foram decompostos por um longo período, podendo ser encontrado tanto no fundo do mar quanto em superfícies. Ele não atua só no formato de combustível, mas também para a indústria em geral, como cosmético, lubrificantes e plásticos. A formação do petróleo se dá por um complexo aglomerado de hidrocarbonetos e diferentes tipos de compostos químicos que sofreram constantes reações químicas, podendo ser originados de diferentes materiais ao longo do tempo (MARTINS *et al.*, 2015).

O consumo dessa riqueza se dá principalmente por gigantes do desenvolvimento, como Estados Unidos da América, com 18.684 mil barris por dia, e China, logo atrás, com 15.442 mil barris por dia, indicando que apenas esses países são os responsáveis por mais de 1/3 da demanda mundial de petróleo. O consumo brasileiro está bem longe dessa quantidade,

chegando a 2.252 mil barris por dia, mostrando que a dependência brasileira por esse tipo de produto é bem baixa (INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS – IBP, 2022).

Sabe-se que a preocupação está além do uso desse material, o refinamento do petróleo é de fato um importante passo para a classificação correta de cada derivado originado da matéria prima, podendo ser, óleos combustíveis, diesel, óleos lubrificantes, querosene, nafta, além de resíduos pesados (Grupo VISION, s.d.). Entretanto, essa produção de resíduos caso não seja descartada corretamente, acarretará diretamente na vida e em todo o sistema global. O descarte desses resíduos em solos gera degradação da paisagem, poluição e liberação de gases tóxicos, poluição de rios e afluentes, além de produção de maus odores (MARIANO, 2001).

O Brasil conta com uma alta reserva de petróleo, abaixo de uma camada de sal, na região das bacias do Sul e do Sudeste, possuindo cerca de 800 quilômetros de extensão e 200 quilômetros de largura. A exploração dessa camada é de difícil acesso a grande extensão de camadas que separam o mar do petróleo, estando a mais de sete mil metros abaixo da superfície do mar. A exploração do pré-sal não está apenas ligada as políticas econômicas, e sim políticas partidárias. No ano de 2016, completou-se 12 anos da exploração do pré-sal, entretanto, o seu aproveitamento está caminhando a passos curtos, empresas do exterior não conseguem acordos para explorar, e o estímulo para a Petrobras está bem baixo nos últimos tempos (BRASIL DE FATO, 2018; SENADO, s.d.).

Outro combustível fóssil que tem destaque no mercado, é o gás natural, formado das mesmas moléculas que o petróleo (hidrocarbonetos), entretanto são moléculas mais leves e que estão no estado gasoso. Assim como o petróleo, o material de origem e os processos sofridos podem influenciar na composição do gás, mas na maioria dos casos, são compostos por metano, propano e etano e outros hidrocarbonetos de alto peso molecular. Esses gases têm seu principal uso em sistemas de combustível, além de serem usados como matéria prima em petroquímica e siderúrgica (SANTOS; 2002).

Por mais que seja um combustível fóssil, o nível de poluição dele é bem menor quando comparado ao petróleo, já que é formado por hidrocarbonetos leves, não possuem a capacidade de poluir de forma exagerada. Entretanto, é uma fonte finita de combustível, que não consegue ser renovada com o tempo e que pode ser de grande risco para a população, já que há um elevado grau de toxicidade e inflamável. A produção mundial desse produto pertence aos Estados Unidos, seguido de Rússia e Irã. A produção brasileira vem aumentando com o tempo, entretanto, não são valores expressivos para se destacar dentre os principais (UOL – Mundo Educação, s.d.; Revista FAPESP; 1998).

O carvão mineral é primordialmente diferente do petróleo e o do gás natural, formado principalmente por cadeias carbônicas e cinzas de vegetais, decompostas a milhares de anos, e hoje em dia, busca o posto de principal combustível fóssil no mundo. O uso de máquinas a vapor criadas na primeira revolução industrial intensificou sua importância e como é visto, além de ser altamente comercializado em países com invernos rigorosos, para ser queimado e aquecer a população (GOMES *et al*, 1998).

As reservas desse mineral estão concentradas nos maiores polos industriais do globo, Estados Unidos e China são quem dominam o mercado produtor, concentrando mais de 60% nas extensões territoriais. No Brasil, a região sul é a principal produtora, possuindo mais de 90% das reservas brasileiras, entretanto, o consumo é baixíssimo devido ao uso de outros tipos de energia, como as hidrelétricas (Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM, 2014).

A extração do carvão pode ser realizada de duas maneiras, subterrânea ou na superfície. Na subterrânea, é possível criar túneis verticais que serão explodidos e extraído o carvão, ou então o uso de máquinas que extraem o carvão e o coloca numa correia, transportando até a superfície. No método em superfície, não há a criação de um tubo, mas a retirada de terra vegetal para extração do carvão naquela área. A terra vegetal depois é utilizada para recuperar o ambiente. Após a extração, o carvão será beneficiado para a comercialização. (COSMO *et al*, 2020).

A principal função do carvão na economia é na geração de energia elétrica por meio de usinas termoeletricas, entretanto também é utilizado em aplicações de produção industrial, como a secagem de cerâmica, fabricação de vidros, entre outros. Nas caldeiras, o calor liberado pelo carvão é transformado em vapor e transferido para a água que circula nos tubos que envolvem a fornalha, dando origem a energia das termoeletricas (ANEEL, 2016).

Entretanto, a restrição do uso desgovernado do carvão se dá pelo alto impacto ambiental que ele causa, desde a sua extração até o consumo. A extração do carvão causa a degradação das áreas de mineração, e a sua queima libera altos níveis de dióxido de carbono na atmosfera.

O carvão vegetal é classificado como renovável, entretanto será abordado neste tópico para evitar confusão e risco de repetição.

A produção de carvão vegetal é de suma importância na diminuição da degradação ambiental, porém, como possui poder calorífico muito inferior ao mineral, não possui atrativos. Composto de muita impureza e baixa qualidade calorífica, o carvão vegetal é muito difundido no Brasil, chegando ao consumo de quase toda produção brasileira, cerca de 80% do que produzimos, nós consumimos (BRITO, 1990; ANEEL, 2016).

Estimativas apontam que a produção e queima do carvão são responsáveis por mais de 30% dos gases do efeito estufa, e mesmo diante desses patamares, a COP 27 realizada no ano de 2022 não impediu o uso excessivo e não sugeriu a troca do combustível, entretanto, algumas indústrias buscando diminuir a quantidade de CO₂ expelida, mudaram a forma como é feito o processo de combustão, utilizando métodos como a combustão pulverizada, leito fluidizado e gaseificação integrada, a tendência é a redução de até 90% na quantidade de enxofre e de 70 a 80% na quantidade de nitrogênio (G1, 2022; ANEEL 2016).

Para obtenção de um mercado consumidor de carvão vegetal, é necessário criar novas formas de produzi-lo, já que as áreas destinadas a produção são ineficientes, e a queima de vegetação nativa não é mais uma opção. Na maioria dos locais de produção do carvão, é utilizado um forno que queima a vegetação, aproveitando apenas 40% de todo o material, o restante é lançado na atmosfera. Atualmente há novas formas que aproveitam de 60 a 70%, e os resíduos produzidos também são utilizados, entretanto, são métodos mais caros e poucos atrativos para a maioria dos produtores de carvão vegetal (MANZONI; BARROS, 2021).

Finalizando as energias não renováveis temos as de origem nuclear, que está presente em diversos continentes, mas principalmente nos Estados Unidos, com 104 usinas, França com 58 e Japão, com 50. As produções advindas dessas usinas são consideradas mais limpas do que as fósseis, isso porque não emite gases do efeito estufa para a atmosfera, entretanto, não são renováveis. Assim como as demais energias, é preciso precaução na hora de descartar os resíduos da produção, haja vista que a radioatividade é algo que pode levar décadas para ser dissipada (ESFERA ENERGIA, s.d.).

Os minerais radioativos guardam uma energia muito mais eficiente do que as de combustíveis fósseis, por exemplo, meio quilo de urânio pode fornecer o equivalente a 1.360 toneladas de carvão (CESTGEN, s.d.).

No Brasil, há duas usinas nucleares, que nos anos iniciais tiveram problemas com a sua construção e as políticas envolvidas, dessa forma, a expansão nuclear é algo que tende a crescer mais lentamente devido aos traumas do passado. A construção de uma terceira usina nuclear mostra o avanço industrial brasileiro que se dedicará a criação de energia limpa, e não as armas nucleares. (ESFERA ENERGIA, s.d.; CARVALHO 2012.).

2.1.2 Fontes renováveis

A energia hidráulica é aquela produzida por usinas que utilizam da força da água para gerar energia, dependendo de fatores externos, como vazão do rio, quantidade de água disponível para uso, topografia, alterações antrópicas ou artificiais. O aumento da demanda

elétrica fez com que os países inovassem na tecnologia de geração elétrica, assim, os países que possuem grandes cursos e constantes chuvas, se adaptou gerando uma energia limpa e duradoura. Pela extensão territorial e disponibilidade hídrica, o Brasil é o terceiro colocado como maiores produtores de energia desse tipo, ficando atrás somente do Canadá e da China (QUEIROZ *et al*, 2013).

No Brasil, a disponibilidade de áreas adequadas com terreno e água abundantes são altamente significativas, sendo esse, um dos fatores de que 75% de toda a energia brasileira seja produzida por usinas desse tipo. A produção energética pode ser por usinas de grande porte, que conseguem armazenar e estocar águas ou pelas chamadas pequenas centrais hidrelétricas, que contem menor capacidade de geração, mas são menos onerosas e danosa ao meio ambiente (JUNIOR *et al*, 2013).

A operação elétrica da usina são recursos flexíveis e que podem promover uma série de benefícios para a região como o controle dos afluentes dos rios, transferência de água de períodos úmidos para secos e ainda podem controlar as cheias, disponibilizar água de acesso para sistemas de irrigações, processamento industrial, navegação e recreação e ainda suprir a necessidade humana de água. A diminuição de hidrelétricas no Brasil veio em face das novas dificuldades para construção dessas usinas e dos reservatórios (Empresa de Pesquisa Energética – EPE, s.d.).

A tendência de países em desenvolvimento é fazer a construção das pequenas centrais hidrelétricas, isso porque não dependem de um reservatório constante e não sofrem com o assoreamento dos rios, além de mobilizar muito menos terra e área, consequentemente, reduzem os danos ambientais no local de implantação. Certamente as pequenas centrais não conseguem dar conta de grandes cidades, principalmente pela quantidade de energia que produzem, entretanto, centros menores poderiam ser abastecidos com essa ferramenta. (JUNIOR *et al*, 2013).

Com a expansão das energias limpas e a tendência da globalização de mudar a forma como se produz energia, surge aquela que pode ser aproveitada das fontes solares, a energia fotovoltaica. Células solares convertem a luz solar diretamente em energia podendo ser aproveitado para consumo próprio ou ainda comercializado. Ao contrário do que se pensa, a energia solar é mais direcionada para os países mais próximos a linha do equador, isso acontece porque há mais horas luz por dia nesses países, consequentemente, maiores raios solares e energia produzida (BEZERRA, 2021).

Esse tipo de equipamento tem se tornado cada vez mais acessível aos consumidores, e o apoio do governo em reduzir as taxas sobre os painéis solares, incentiva ainda mais em

produzir energia limpa e barata. Sabe-se que durante a noite ou em dias nublados a produção cai substancialmente, entretanto, nesses casos, utiliza-se a energia produzida pela companhia de energia, já que a compra de baterias vai na contramão da sustentabilidade e economia, pois é muito onerosa e utiliza de matérias que não são sustentáveis, possuindo elementos altamente tóxicos a saúde (MACHADO; MIRANDA, 2014).

A eficiência dos painéis ainda não é tão alta quanto a energia gerada pela queima de combustíveis fósseis. O seu aproveitamento pode ser alcançado até 30%, entretanto, o comercial seria de 13 a 19% devido ao custo e disponibilidade de materiais. Mesmo com baixo aproveitamento, a energia fotovoltaica se destaca por ser totalmente limpa e renovável, o que já é uma vantagem para um futuro sustentável. Mesmo com tão baixa eficiência, os painéis solares evitam uma liberação de 70 milhões de toneladas de CO₂ para a atmosfera todos os anos (ALMEIDA *et al*, 2015).

Há instalação de painéis por todo o Brasil, porém, como mostra o Atlas Brasileiro de Energia Solar, publicado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, a região nordestina é quem possui os melhores parâmetros de irradiação solar, indicando que toda essa porção tem maior aproveitamento dos painéis instalados. Por esse motivo, leilões públicos são feitos destinando as áreas do Nordeste para produção de energia. Mais de 75% dos projetos vendidos são destinados a essa região (BEZERRA, 2021).

Com as pressões políticas em busca de sustentabilidade, diversos países decidiram investir em desenvolvimento fotovoltaico, com incentivos governamentais e construção em massa dos painéis. A China é quem detém a maior parte de painéis solares, seguida pelo Japão e depois pelos Estados Unidos. O Brasil ainda está atrás no ranking mundial, porém há projetos de expansão desse tipo de energia por todo o continente (MACHADO; MIRANDA, 2014).

O futuro pede que as energias produzidas sejam limpas, e a tendência é que até 2050, metade de toda a energia do globo seja oriunda de fontes solares e eólicas. Assim como a solar, a energia eólica tem obtido seu espaço de forma limpa e sustentável, utilizando-se do movimento cinético gerado pelos ventos, convertendo toda a força mecânica acionada pelas hélices em eletricidade. (INSOL ENERGIA, 2022; PORTAL SOLAR, s.d.).

A maior importância dessa energia é a sua não emissão de gases poluentes, como o metano, dióxido de carbono entre outros. Todo o cuidado com a sustentabilidade pode diminuir consideravelmente os níveis do efeito estufa no mundo, afinal de contas, o vento é um recurso abundante e renovável, usinas desse tipo não necessitam de grandes espaços, é uma energia nova e que tem muito a ser desenvolvida, principalmente nas regiões com muito vento, como o nordeste brasileiro (TERCIOTE, 2002).

No mundo, a energia eólica tem obtido crescimento significativo e grandes líderes mundiais serão os principais polos desse tipo de eletricidade. China, Estados Unidos e Alemanha são os principais países com maior quantidade de energia eólica produzida no mundo. Os Estados Unidos possuem seis dos dez maiores parques de energia eólica e até 2030 a tendência é aumentar ainda mais a produção (NOCTULA, 2021).

Assim como as grandes potências mundiais, o Brasil segue na mão da sustentabilidade, ficando em oitavo nessa lista, contando com a maior capacidade eólica da América do Sul. Dentro do Brasil, a região que teve seu maior destaque foi no Nordeste: Rio Grande do Norte, Bahia e Ceará foram os principais estados com o maior índice de produção de energia eólica. No melhor cenário possível, o Brasil passará a ter mais de 20% da energia nacional advinda das turbinas eólicas (CUNHA *et al*, 2019).

Atualmente, a última, mas não menos importante, opção de energia renovável oriunda da biomassa. Essa forma produção energética é feita a partir da queima de material orgânico, e essa queima vai gerar energia ou evaporar água para alimentar turbinas que geraram demandas energéticas (ESFERA ENERGIA, 2021).

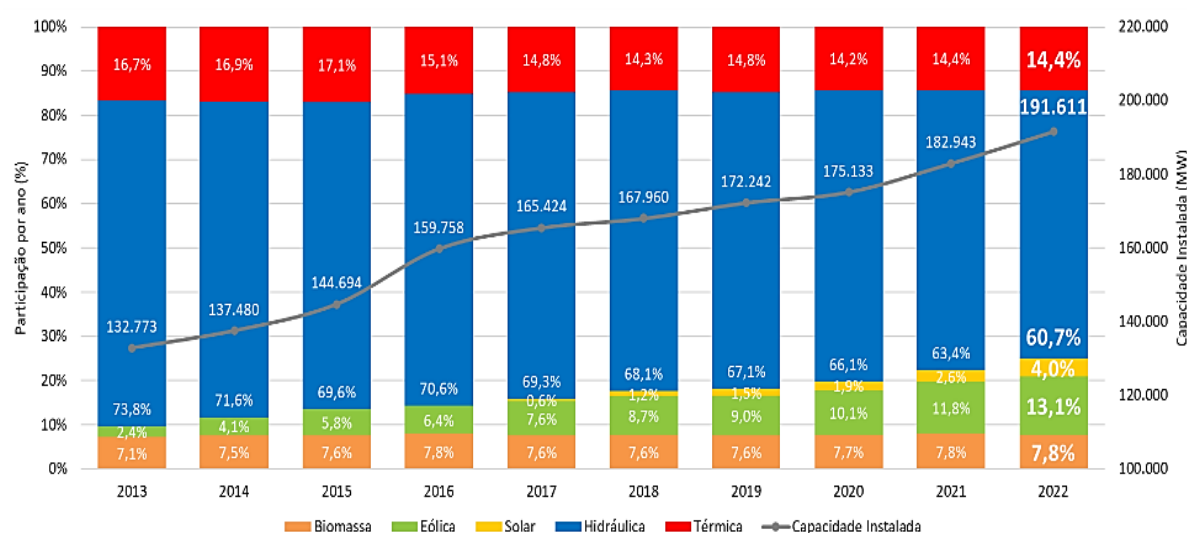
A fonte de energia proveniente da biomassa pode ser dividida em dois modelos: o tradicional e o moderno. O tradicional está atrelado a derrubada de árvores sem conscientização, apenas para a produção energética, não é considerado sustentável. O segundo modelo, chamado de moderno é o que se busca com a industrialização e desenvolvimento global, utilizando de madeiras próprias de reflorestamento, bagaço de cana de açúcar ou ainda a produção de combustíveis como o etanol, que são muito mais limpos e com balanço energético positivo (GOLDEMBERG, 2009).

A produção energética oriunda da biomassa pode utilizar diversas matérias primas, podendo ter origem florestal, de carvões e lenha vegetal, de origem agrícola, sendo a cana de açúcar a de maior destaque, mas pode haver também de arroz, capim elefante, milho e soja. Rejeitos urbanos, tanto sólidos quanto líquidos podem ser aproveitados como plásticos, metais, papéis, matéria orgânica, e rejeitos dos setores comerciais e residenciais. A idéia desse último aproveitamento é fazer uma seleção dos materiais que devem ser reciclados e daqueles aproveitados para a matriz energética, dessa forma, até mesmo o problema do excesso de lixo seria resolvido em conjunto (SANTOS *et al*, 2016).

Segundo a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2023) o ano de 2022 foi marcado pelo avanço da energia renovável no Brasil. O país ultrapassou o marco de 92% de participação de usinas hidrelétricas, eólicas, solares e de biomassa no total gerado pelo Sistema Interligado Nacional – SIN, o maior percentual dos últimos 10 anos. O levantamento mostra

que as fontes produziram quase 62 mil megawatts médios de energia, um reflexo do cenário hídrico climático mais favorável, que contribuiu para a recuperação dos reservatórios de água, e da expansão das usinas movidas pelo vento e pelo sol. “Este é o resultado de uma matriz energética diversificada, característica que nos coloca à frente de quase todos os outros países. Além de ser um ganho imensurável para o meio ambiente, essa característica nos traz uma série de oportunidades em novos mercados, como o de créditos de carbono e de hidrogênio renovável, que vão gerar benefícios para a sociedade nos próximos anos”, avalia Rui Altieri, presidente do Conselho de Administração da CCEE. A Figura 1 mostra a participação das diversas fontes renováveis na geração de energia elétrica brasileira.

Figura 1. Capacidade instalada da geração centralizada e evolução da capacidade instalada.



Fonte: CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA(2023)

2.2 Uso do bagaço de cana na produção de energia elétrica

No setor do agronegócio não é diferente, é necessário reinventar as ideias em busca de alternativas mais sustentáveis e foi o que aconteceu. As usinas sucroalcooleiras suprem sua necessidade energética (demandas de calor, energia mecânica e eletricidade), usando um resíduo da própria produção. O bagaço da cana de açúcar é o principal agente nessas usinas, consumido em sistemas de vapor, consegue fazer as caldeiras trabalharem com maior eficiência e propiciar redução do consumo de combustíveis. Além de aumentar e exceder a produção de eletricidade, podendo ser feita sua comercialização para empresas geradoras de energia ou até mesmo usar essa energia para abastecer sistemas de irrigação (NOVACANA, 2013).

Esse uso do bagaço para produzir energia é chamado de bioenergia, um tipo de energia limpa e não poluente que é obtida a partir da queima de plantas, madeira, animais, ou seja, de biomassa (SOUZA; AZEVEDO, 2006; Brasil Escola, s.d.).

Para a retirada do bagaço, é feito a lavagem do material após a sua colheita, visando retirar toda e qualquer sujeira presente na planta, então é encaminhada para o desfibrilador, onde aumentará a densidade do colmo e a abertura de células do colmo para melhor retirada do caldo. Em seguida passa por uma série de moendas que vão extrair todo caldo da cana, ao final do ciclo de moenda a cana passa novamente na moenda para tentar retirar a maior quantidade de caldo possível. Os produtos desse processo são o caldo e o bagaço, sendo o primeiro com variação de rendimento de 92 a 97% e o segundo com umidade de aproximadamente 50%. A quantidade de bagaço obtida por tonelada de cana de açúcar, em média, são 250 quilos de bagaço. Para produzir 1 MWh de energia, são necessários queimar 6,5 toneladas de bagaço, ou seja, 26 toneladas de cana precisam ser colhidas e processadas para haver 1 MWh (GUARDABASSI; ALVES, 2006).

A necessidade de expandir o uso da biomassa surgiu da alta dependência das hidroelétricas, já que mais de 61% da energia produzida no Brasil advém dessas fontes. A preocupação com essa dependência perdura pelos riscos que podem ser decorrentes das mudanças, como a redução de regimes hídricos, causando elevação da tarifa elétrica e racionamento de energia. Atualmente, problemas nos cursos de águas de hidroelétricas causam a necessidade de fornecer energia por meio de termoeletricas, estas queimam gás natural e aumentam substancialmente o valor da tarifa (PEDROSO *et al*, 2018).

Segundo Goldemberg (2016), nos períodos iniciais do programa Proálcool, o bagaço era tido como um subproduto indesejado, afinal de contas, a produção de hidroelétricas na época era abundante e a legislação não permitia a venda do excedente para as redes elétricas. Contudo, no ano de 2001, houve uma grave crise no setor de abastecimento de energia, foi a partir desse momento que muitas usinas observaram a oportunidade de vender o excedente para a rede elétrica. O mercado de energia na época foi tão intenso que as usinas trocaram os equipamentos por mais modernos buscando melhores rendimentos e produção em excesso de eletricidade.

Rosseto (2004) mostra que o bagaço da cana de açúcar é o resíduo com maior expressividade nas indústrias sucroalcooleira com origem após a moagem e extração do caldo, contendo aproximadamente 250 kg de bagaço seco para cada tonelada. A estimativa é de que haja 70 milhões de toneladas de bagaço por ano, e que de 30 a 95% desse bagaço é utilizado nas próprias indústrias para produção energética, seja no aquecimento das caldeiras (substituindo a madeira e o óleo combustível) ou na geração de energia elétrica.

No entanto, o bagaço não é somente para a produção energética, podendo também ser usado para produção de compensados similares a madeira, alimentação animal, produção de celulose, fertilizante, e também ser possível a criação de bioplástico (G1, 2021).

Para ser utilizado na alimentação animal dos ruminantes, precisa passar por tratamentos específicos para atingir níveis adequados de qualidade e diminuição dos efeitos da lignina sobre os microrganismos presentes no rúmen. Sem os tratamentos, o bagaço é apenas um alimento do tipo volumoso, não acarretando em nenhum ganho para os bovinos. O alimento tratado acarreta benefícios tanto para os bovinos de corte quanto de leite. (TEIXEIRA, 2007, Revista Eletrônica de Veterinária, Vol. VIII N°6).

2.2.1 Outras fontes de biomassa disponíveis

Além da utilização do bagaço da cana de açúcar como combustível para geração de energia, há disponíveis outros tipos de biomassa que podem ser utilizados para a mesma finalidade, sendo renováveis e sustentáveis, podendo também armazenar carbono no solo enquanto vivas (RAÍZEN, 2022).

Originário do setor florestal, há usinas que utilizam resíduos da indústria de papel e celulose, madeiras e moveleiras para gerar calor e energia. Dentre os resíduos desse setor, temos principalmente, o licor negro, gás alto de forno e o carvão vegetal, sendo que o licor negro é que tem de maior destaque dentre esses, sendo o segundo colocado no destaque brasileiro de produtos energéticos da biomassa, ficando atrás apenas dos resíduos da cana de açúcar (PEDROSO *et al*, 2018).

Segundo Pedroso *et al.*, o licor negro é um líquido denso e de coloração negra que contém 60% de matéria orgânica e o restante de inorgânica. A porção orgânica é bem complexa, sendo constituída de ácidos carboxílicos e fragmentos de lignina, enquanto que a fração inorgânica é formada por reagentes que não foram convertidos no processo de polpação e restos químicos, como hidróxido de sódio, sulfato de sódio, entre outros. É um líquido extremamente tóxico e poluente para o meio ambiente, podendo causar grandes problemas devido a sua alta alcalinidade. Contudo, é indispensável na cogeração de energia nas usinas de papel e celulose, possuindo poder calorífico próximo de 2860 kcal/kg.

Outra importante matéria prima e também biomassa geradora de energia no Brasil é o arroz, produzido principalmente na região sul, responsável por cerca de 60% da produção nacional. A palha do arroz tem dois destinos, podendo ser queimada diretamente e gerar energia com essa queima ou então transformada em briquetes, em que a palha será compactada e

submetida à pirolise, aumentando a quantidade de carbono e o poder calorífico do briquete formado (SANTOS *et al*, 2016).

Para a formação de energia não é obrigatório a queima de materiais para gerar vapor e alimentar sistemas complexos, pode-se produzir biogás, sendo também renovável e sustentável. Assim como outras fontes orgânicas, é possível utilizar de duas maneiras, a queima direta para obtenção de calor ou então em conversão para eletricidade. Essa conversão de material orgânico em eletricidade abre novas possibilidades de produção agropecuária sustentável, em que o produtor usará de resíduos da produção de suínos, por exemplo, para produção energética da propriedade (GUARDABASSI, 2006).

Há ainda a possibilidade de fazer energia usando outras fontes de biomassas, não tão comuns e nem com destaque como as já citadas, mas que também podem ser úteis em momentos de crise e necessidade de diversificação. São elas o capim elefante, a soja e o milho. Culturas totalmente diferentes, mas que produzem grande quantidade de resíduos na hora de colher e que podem ser queimadas para produção de energia elétrica. Contudo, tanto os resíduos da soja como do milho, auxiliam na próxima safra, liberando nitrogênio através do consumo da palhada (SANTOS *et al*, 2016).

2.2.2 Produção e demanda de energia elétrica numa usina de açúcar e álcool

A produção energética proveniente do bagaço da cana possui tendências crescentes ao passar dos anos devido ao aumento da eficiência produtiva das usinas, com a troca de sistemas mais modernos e caldeiras de maiores capacidades. Em 2021, das 369 usinas de açúcar e etanol existentes no Brasil, apenas 60% ofertam o excedente em energia elétrica, ou seja, o potencial elétrico das usinas não está no seu potencial máximo. Caso houvesse 100% de oferta do excedente, seria possível alcançar 151 mil Gwh, totalizando em torno de 26% do consumo elétrico brasileiro. O potencial de 151 mil Gwh representa duas vezes a geração da usina de Itaipu, e significa usar um material renovável e abundante no Brasil, a cana-de-açúcar (UNICA, 2022).

Segundo Alves (2006), a moagem de uma tonelada da cana, seja para açúcar ou para etanol, produz em média 250 quilos de bagaço. A queima de seis toneladas e meia de bagaço de cana produz 1 MWh, então são necessárias cerca de 26 toneladas de cana para começar a produzir uma energia significativa. Como a produção nacional de cana de açúcar é aproximadamente 69.355 kg/ha (CONAB, 2023), é possível produzir mais de 3 MWh por hectare de cana colhida e triturada.

O potencial de produção está bem além do que é possível chegar, segundo o site da NOVACANA (2021), uma empresa de consultoria chegou à conclusão de que para a safra de 2019/2020 as usinas necessitavam atingir uma eficiência de 96 kWh por tonelada de cana para atingir um lucro desejável, entretanto, a produtividade média brasileira na mesma época foi de 34,94 kWh, o equivalente a 36,4% do recomendado pela consultora. Os valores apresentados não estão distantes da realidade, a usina Cerradinho (Chapadão do Céu – GO) atingiu um patamar próximo ao desejado, com 87,92 kWh por tonelada, moendo em torno de 5,22 milhões de toneladas e exportando 458,78 GWh de energia. A usina Atvos passou do patamar dado pela consultora, com a moagem de 26,2 milhões de toneladas com rendimento de 104 kWh por tonelada.

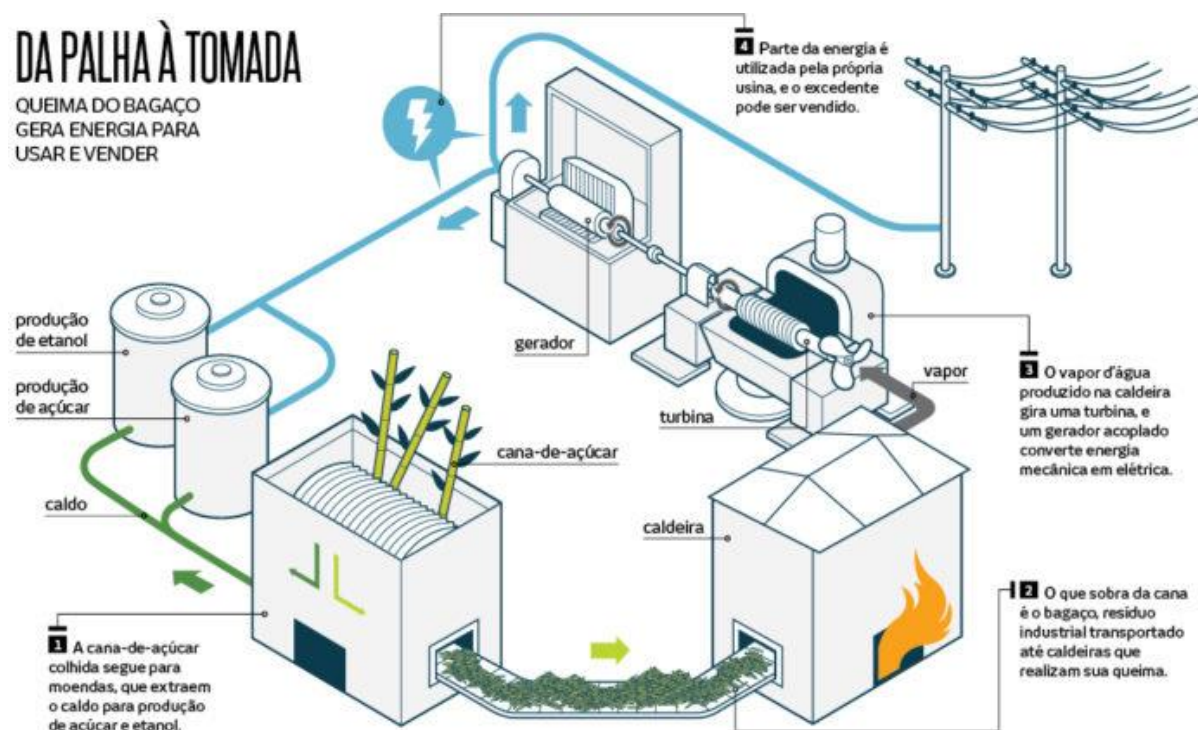
Os resíduos são usados na geração da energia térmica e elétrica nos sistemas de cogeração de energia elétrica nessas usinas, de maneira simples, o bagaço é queimado e gera energia térmica suficiente em forma de vapor e energia elétrica. Em uma fornalha, o bagaço será queimado e o todo o vapor produzido pela caldeira será direcionado para as turbinas, podendo ser simples estágio ou multiestágios (que possuem melhor eficiência, gerando maior número de excedentes do que a simples estágio), que ligadas em um eixo gerador, irão fazer a movimentação do eixo, e ele produzirá energia elétrica (ALCARDE, 2022; SOUTO, 2018).

A perspectiva do potencial gerador, está diretamente ligado à tecnologia empregada, e algumas usinas utilizam de caldeiras de média pressão, possuindo de 22 a 45 bar de pressão, contudo, no mercado existem caldeiras que podem chegar até 100 bares de pressão. Outro investimento tecnológico é a resistência a temperatura das caldeiras, atualmente, a produção nacional de caldeiras está limitada em 520°C, porque o aço produzido no Brasil não possui maiores resistências, tendo a necessidade de importar aços de maior resistência, isso demanda grande quantidade de investimento, as caldeiras ainda podem modificadas quanto ao seu tamanho, na atualidade, as caldeiras possuem capacidade de 150 a 250 toneladas por hora, com uma eficiência acima de 85%, mas ainda é possível investir mais, existem novos projetos de caldeiras que suportam 300 a 450 toneladas por hora de vapor gerado (NOVACANA, s.d; SOUTO, 2018).

Na Figura 2 é possível ver de maneira mais clara como funciona o sistema, a cana é coletada e trazida até a usina, e passará por processos de limpeza antes de ser moída. Em seguida, a moagem divide os produtos, o caldo passará para a produção de açúcar e etanol, e o bagaço irá para a caldeira, lá será queimada e o vapor obtido por essa queima, vai girar a turbina que possui um gerador acoplado, convertendo a energia mecânica em elétrica. Parte da energia

é usada na demanda pela usina, e o restante pode ser vendido para a companhia de energia (EOS Consultores, s.d.).

Figura 2. Esquema de como é feita a queima do bagaço até a comercialização do excedente pela usina.



Fonte: EOS Consultoria (s.d.)

Conforme a produção canavieira aumenta, os resíduos e subprodutos também aumentam, bagaço, palha, ponta de cana e vinhaça se tornam cada vez mais volumosos dentro das usinas, sabe-se que bagaço, palha e a ponta de cana conseguem ser escoados e aproveitados, a vinhaça, entretanto, caso não seja utilizada e não consiga ser comercializada para outra usina ou consumidores, precisa de uma maneira de ser escoada, afinal de contas, o descarte inadequado dela contamina o solos e os lençóis freáticos existentes. Por isso, Rodrigues *et al.*, estimam o potencial de geração de energia da vinhaça, para que em ocasiões como essa, possa também ser aproveitado.

Explicando brevemente, a vinhaça será transformada em energia e passará por uma câmara sem a presença de oxigênio, caracterizando uma digestão anaeróbica, onde haverá a biodegradação de substâncias orgânicas complexas nessa ausência de oxigênio, gerando uma mistura gasosa, dado como um biogás composto por metano e dióxido de carbono (RODRIGUES, 2012).

2.2.3 Cogeração e venda de energia excedente numa usina de açúcar e álcool

Segundo a Associação da Indústria de Cogeração de Energia, COGEN, a cogeração de energia é a produção sequenciada ou simultânea de duas ou mais formas de energia, advindos de um único combustível. A produção mais comum de cogeração é a produção de energia elétrica e térmica a partir do uso de biomassa e outros tipos de combustíveis. A cogeração nada mais é do que um método efetivo de conservação de energia aplicado ao setor industrial ou terciário com níveis de eficiência variando em torno de 50 a 85%, entretanto, mesmo com menor eficiência, o método reduz os gastos energéticos, possibilita preservar o meio ambiente, é renovável, entre outros (JÚNIOR, 2009).

É difícil utilizar da energia elétrica como um produto de venda, principalmente, por não ser possível armazenar (vender em preços altos), haver sazonalidade de consumo e preço e ainda sofrer com grande sensibilidade dos custos em relação a quantidade produzida, sendo volátil a todo instante. Dessa forma a comercialização se dá por essa intensa alteração do valor a todos os instantes (SOUZA; AZEVEDO, 2006).

Contudo, como é um produto que tem sempre demanda no mercado e a usina não utiliza do excedente (na maioria dos casos), é vendido para companhias de luz, como a Companhia Paulista de Força e Luz, CPFL, principal responsável pela distribuição da rede elétrica no estado de São Paulo. Mesmo com a existência de volatilidade, existem estímulos dos governos para que haja implementações que contribuam com excedente elétrico. Financiamentos a partir do Banco Nacional de Desenvolvimento, BNDES, que utiliza da produção do excedente para pagamento do empréstimo, têm-se também o Sistema Interligado Nacional, que facilitará a transmissão entre o comprador e a usina, e por fim, programas de incentivo, como o PROINFA, Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, lançado desde 2004 (CARDOSO, 2011).

Para o fornecimento adequado de energia elétrica, a usina precisará aperfeiçoar as estruturas existentes, exigindo investimento e alto valor de mercado para poder pagar esse investimento. Segundo as informações de Flausinio (2015), retirada da Fundação Estadual do Meio Ambiente de Minas Gerais (2014), os principais empecilhos para o investimento na rede elétrica são as dificuldades encontradas para ligar à rede de distribuição, alto custo da troca de equipamentos, cargas tributárias e a falta de experiência no setor quanto a operação elétrica.

O mesmo autor enfatiza que do total de 66 empreendimentos, apenas nove forneceram a extensão das linhas de transmissão da energia, ou seja, o custo da extensão é muito alto e poucos empreendimentos arriscam a sua confecção. Longas linhas podem prejudicar ainda mais

a transformação do setor, já que o custo avaliado pode ser de US\$ 100,000 a 159,645 para quilometro de linha com 138 kV.

As informações da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica, CCEE, são de que o preço do MWh está em torno de R\$69,04 no território nacional (2022). O preço dado pela câmara nos dias de hoje não é atraente ao setor sucroalcooleiro, segundo o INSTITUTO ACENDE BRASIL, de 2015, citado por Flausinio, é necessário um preço médio de R\$209,91/MWh para aumentar a atrativa da usina pelo empreendimento.

2.3 Aspectos gerais sobre a cana-de-açúcar

A cana de açúcar é uma gramínea da família Poaceae, do gênero *Saccharum* com variadas espécies conhecidas, como: “*Saccharum officinarum*, *Saccharum spontaneum*, *Saccharum sinensis*, *Saccharum barbiri* e *Saccharum robustum*”, formada por colmos, folhas, inflorescências, rizoma e raízes que se desenvolve em formato de moitas ou touceiras. As raízes são do tipo fasciculadas, o colmo é marcado por nós e entrenós, este, é o caule da planta e responsável por sustentar as folhas. A inflorescência é do tipo panícula aberta, sendo denominada flecha ou bandeira (SILVA J.P; SILVA M.R, 2012, p. 23-29).

A sua origem ainda é incerta, mas a teoria mais aceita é que foi originada do sudeste asiático e da Índia ocidental e os árabes fizeram a propagação pelo norte da África e pelo sul da Europa. Devido a preferência da cultura por clima tropical e subtropical, não se sustentou na Europa. Foi trazida pelos portugueses para América do Sul e Central propagando-se cada vez mais por todo o continente (CRUSCIOL, 2016; SILVA J.P; SILVA M.R, 2012, p. 15-16). A cana brasileira tem duas regiões concentradoras, o norte-nordeste e o centro-sul. Na primeira região, a cana é colhida de setembro até março, enquanto na segunda é de abril a novembro (NOVACANA, s.d.).

A cana possui características-chaves e fáceis de perceber, com um formato fino e cilíndrico, grandes folhas, podendo alcançar até seis metros de altura e com caule adocicado. Capaz de produzir dois produtos essenciais ao comércio mundial, o álcool e o açúcar. O açúcar faz parte da alimentação humana e o álcool é usado em bebidas e, principalmente, como biocombustível para automóveis, emitindo 80% a menos de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera do que a gasolina comum. O processo de extração é simples, basta moer e o líquido extraído que pode ser fervido ou fermentado. Quando fervido, o excesso de água evaporado faz concentrar o açúcar, sendo então filtrado, concentrado e centrifugado (quando é separado da água). Assim, são obtidos os cristais de sacarose. Os tipos mais brancos de açúcares passam por

processos de clarificação (para clarear) e refinamento. O etanol, por sua vez, é fermentado por bactérias se alimentam do açúcar e fabrica o álcool.

Atualmente, há um terceiro produto de alta importância originado da cana de açúcar, a bioeletricidade. A biomassa permite que a energia alimente a usina e produza excedentes, e o avanço da tecnologia permitirá maior abastecimento energético nacional devido ao uso dessa massa (NOVACANA, s.d; SOUTO, 2018).

A produção mundial de cana de açúcar está dividida em mais de 100 países, entretanto, 80% da quantia total está dividido em 10 países diferentes. Brasil, Índia e China são os líderes mundiais de produção de cana de açúcar. Só o Brasil e Índia representam mais de 50% da produção mundial, com a diferença de que no Brasil é produzido por grandes produtores e na Índia por pequenos. Dentro do território nacional, a cana detém a terceira posição, ficando atrás da soja e do milho, culturas anuais e de rápido retorno econômico (NOVACANA, s.d.).

O plantio de cana de açúcar pode ser feito de forma manual ou mecanizada. No formato manual, os colmos da cana são colocados nos sulcos antes abertos e, em seguida, cortados em toletes deixando cerca de 3 gemas por tolete. No plantio mecanizado, os toletes são colocados simultaneamente à abertura dos sulcos. Independente da forma como for plantada, são necessários alguns critérios importantes para ter uma produção de qualidade, como o levantamento topográfico da área, alocando os carregadores primários e secundários, além de subdividir melhor as variedades de cana a ser utilizada, a fertilidade e preparo da área para um plantio mais vigoroso, espaçamento e profundidade adequado, qual a quantidade utilizada de mudas na área, as operações e máquinas para o preparo e fechamento dos sulcos, além da escolha da época correta de implantação (ROSSETO; SANTIAGO, 2022).

Segundo SILVA J.P; SILVA M.R, (2012), a cana pode ser plantada em duas épocas, de setembro a novembro, chamada de cana de ano, com aproximadamente 12 meses de duração, podendo seu corte ser efetuado em setembro ou mesmo adiado até julho, dependendo da variedade e do ciclo escolhido. E a segunda época é em janeiro até abril, são as chamadas cana de ano e meio, possuem maior período vegetativo e produzem bem mais do que as de ano. Após o período de implantação, as canas são cortadas a cada 12 meses, aproximadamente.

E os autores ainda enfatizam que a principal época de vegetação da cultura é ao final do ano, havendo chuvas e também sol abundante para seu maior desenvolvimento. Canas de ano e meio possuem maior quantidade de folhas nessa época, sendo assim, produzem maiores quantidades de fotoassimilados que serão distribuídos por toda a planta. Ao contrário de plantas anuais que são divididas em período vegetativo e reprodutivo, a cana é determinada pelo estágio que se encontra. No total são quatro, sendo o primeiro o período de brotação e emergência do

broto, é nessa fase que determinará a base da cultura, aqui estará se desenvolvendo o estabelecimento inicial de plantas, em seguida nós temos o segundo estágio, responsável pelo perfilhamento e estabelecimento definitivo da cana de açúcar. O terceiro estágio é o de crescimento da cultura, aqui tem se a quantidade máxima de perfilho e o acúmulo de sacarose e por fim, é o estágio de maturação, nessa última etapa é o enchimento do colmo com sacarose, que determinará a produtividade em toneladas por hectare.

A cana é dividida em dois tipos, a cana planta e a cana soca. A cana planta é aquela que não teve nenhum corte, com maior produtividade e sacarose na planta. A partir do primeiro corte, são as chamadas cana soca, essas que são menos produtividades que o corte anterior, mas que, entretanto, continua rebrotando e produzindo. A versatilidade da cultura da cana de açúcar está no fato da rebrota da gramínea, não necessitando plantar novamente todos os anos. A reforma do canavial é feita quando o último corte apresenta baixo retorno para a usina, possuindo muita fibra e pouco açúcar, esse fenômeno de baixa produção, normalmente, acontece próximo ao sexto corte (SILVA J.P; SILVA M.R, 2012. pg 32-33).

A cana de açúcar conta atualmente com somente a forma de colheita mecanizada, que não utiliza mais a queima para fazer a colheita. Isso acontece desde 2006, em que usinas assumiram a responsabilidade de acabar com as queimadas nas chamadas “áreas mecanizáveis”. Graças a essa conquista, houve menor emissão de gases do efeito estufa. A extinção do formato de queima da cultura, trouxe impactos ambientais, econômicos e sociais (RONQUIM, 2010).

Ambientalmente, a queimada da cana impedia a vida ao redor dos canaviais, a fauna e a flora sofrem com altas temperaturas, causando a morte de animais e plantas existentes, a emissão de gases do efeito estufa advindos do Brasil, em sua maioria, era causado pela queima da cana de açúcar, assim sendo, houve redução dos gases e queima impedia a palha de estar no solo, deixando-o desprotegido (RONQUIM, 2010).

No âmbito social, o avanço do campo desempregou muitas pessoas, porque uma única colheitadeira consegue fazer o trabalho de 80 a 100 homens, com menor custo e maior eficiência. Entretanto, com o passar do tempo, as áreas que necessitavam de pessoas para fazer as colheitas passaram a constituir de especialistas em colheitas, com o auxílio do governo e dos produtores, passou a existir o Compromisso Nacional para Aperfeiçoar as Condições de Trabalho na cana-de-açúcar, levando um conjunto de boas práticas trabalhistas e requalificação das pessoas envolvidas, acarretando na redução de trabalhos infantis, possibilidade de aposentadoria, além de possuir carteira de trabalho assinada. Contudo, para os migrantes que iam de outras regiões do Brasil em direção ao Centro Sul para fazer o corte da cana queimada,

houve a necessidade de fazer migrações para outras regiões e ir em busca de outras oportunidades de emprego disponíveis (RONQUIM, 2010).

Economicamente, o impacto foi menor do que se esperava, por um lado, houve a necessidade de investir inicialmente um grande valor na compra de maquinários, do outro, teve uma redução do custo de mão de obra, encargos trabalhistas, longevidade dos canaviais, aumento na produtividade, alto volume de bagaço, entre outros. O potencial da colheita mecanizada aumentou com o uso do bagaço da cana para geração elétrica, dessa forma, observou-se que não havia mais necessidade de gasto com combustíveis, e que o próprio resíduo da cana colhida poderia ser aproveitado dentro da usina (RONQUIM, 2010).

Sendo assim, a implementação de tecnologias ao campo trouxe uma série de benefícios, e antigo cortador de cana, necessitou se atualizar junto. Visando a preservação dos atributos químicos, físicos e microbiológicos, a queima se tornou um inimigo, e a palhada, antes desvalorizada, um novo aliado. Os benefícios não são observados de um ano ao outro, mas ao longo de toda a cadeia produtiva da cultura, entretanto, problemas limitantes como a declividade maior que 12% que impede o uso de máquinas e a incompatibilidade com o plantio direto são fatores que serão melhores avaliados com o avanço da tecnologia (NOVACANA, s.d; OLIVEIRA, 2014).

O estímulo à produção canavieira começou quando a elevação do preço do barril de petróleo fez o governo criar novas formas de se obter um combustível mais em conta, e indiretamente, mais sustentável para o mundo. Antes da criação do Programa Nacional do Álcool, conhecido como Proálcool, a cana de açúcar era vista como uma cultura retrógrada e arcaica, com baixo potencial econômico. Sendo assim, em 1975 seria lançada uma ideia inovadora e sinônima de progresso no Brasil, o estímulo de produção de etanol. Somente a ideia não seria suficiente para estabelecer o sucesso do programa, mas a perseverança dos apoiadores e as características edafoclimáticas disponíveis no centro-sul brasileiro foram cruciais para alavancar do programa (CORTEZ, 2016).

A produtividade média obtida em 2021/22 foi de 69355 kg/ha, enquanto que no ano anterior, de 2020/21 chegou em 70357 kg/ha, uma pequena perda quando vista isoladamente, entretanto, como são mais de 8,3 milhões de hectares, a redução de produtividade chega a 8,3 milhões de quilos (CONAB, 2022). Os dados mostram que o estado de São Paulo permanece como destaque na produção canavieira, sendo responsável por aproximadamente 62% de toda produção nacional.

Quando se fala em de cana de açúcar, o Brasil é quem se torna protagonista mundial, porém a produção de etanol, é liderada pelos Estados Unidos extraído principalmente a partir

do milho. Segundo a União da Indústria de Cana-de-Açúcar (ÚNICA), em 2016/2017, os EUA produziram mais de 58 milhões de litros de etanol, enquanto o Brasil estava logo atrás com mais de 27 milhões de litros, sendo esses dois países juntos responsáveis por cerca de 85% da produção mundial de etanol.

2.3.1 Efeitos da irrigação e da fertirrigação na produtividade da cana de açúcar

É notável a importância da água para a produção agrícola e como ela está ligada à diversas funções, como estrutural, de transporte, metabólica, entre outras (COSTA, 2001). É fato de que a cana de açúcar possui maior “rusticidade” ao déficit hídrico, com uma produção inferior, mas não inviabilizada, contudo com o uso da irrigação, é possível aumentar a durabilidade do canavial (quase dobrar o tempo de renovação), aumentar a produtividade média e também diminuir os impactos que o déficit hídrico trás (ANA, 2017).

No Brasil, a área que contempla somente a irrigação de cana de açúcar atinge aproximadamente 748.912 hectares de terra, e as áreas que se utilizam em conjunto a fertirrigação são de 2.912.812 hectares, totalizando 3.661.724 hectares de cana irrigada, ou seja, só a área de cana engloba aproximadamente 44% da área total irrigada (ANA, 2019).

A tendência para a agropecuária irrigada é positiva, já que o governo brasileiro promove o Programa Nacional de Agricultura Irrigada (Irriga + Brasil), que visa aumentar a produção de alimentos, bioenergia e fibras graças a expansão de áreas irrigadas, com bases ambientalmente sustentáveis (MAPA, p.27, 2022).

Inicialmente, a expectativas do projeto Irriga + Brasil, era de que a áreas irrigadas chegassem a 3 milhões de hectares em 2030, atualmente, essa quantidade é inferior a área de irrigação e fertirrigação de cana de açúcar somadas. Segundo dados da Agência Nacional de Águas (2021), há mais de 8,2 milhões de hectares irrigado em todo o Brasil e a nova meta para se alcançar até 2040 é mais de 4,2 milhões de hectares, totalizando 14,5 milhões aproximadamente. E mesmo com a grande expansão irrigada, ainda temos 55,85 milhões de hectares que podem ser irrigados.

A produção de cana de açúcar quando é feita de forma irrigada, apresenta um incremento na produtividade de toneladas por hectares. Em experimento de cana irrigada, Dalri *et al.*, (2008) obtiveram incrementos de 58,5% na produtividade da cana e 66,1% na produtividade de açúcares totais recuperáveis em relação à testemunha. A quantidade de matéria seca produzida também foi significativa para os testes irrigados, com um incremento médio de 36% na

produção total. Sendo assim, a cana irrigada produz maior quantidade de açúcar e de biomassa usando o mesmo tamanho de área.

Carvalho e *et al.*, (2009) encontraram resultados positivos do incremento produtivo da irrigação na cana. O trabalho realizado no município de Capim, no estado da Paraíba, contempla o uso de um pivô central rebocável, que aplica quatro lâminas diferentes de água (0; 13,8; 27,5; 41,3 mm) em dois tipos de adubações diferentes na cana de açúcar. O autor compara a produção de colmos, o rendimento bruto de açúcar e do álcool afirmando que a cana irrigada tem a capacidade de atingir altos níveis produtivos se comparado as áreas de sequeiro. Utilizando a maior lâmina testada no trabalho (41,3 mm) e maiores níveis de adubação, observou que o nível de produção de colmos atingiu mais do que 30% de incremento.

O incremento dos ganhos não está ligado só ao uso da água ou não, também é necessário procurar variedades que melhor se adequam à região e também ao sistema irrigado. Oliveira *et al* (2010) indicam que variedades precoces com baixa altura e com pouca produção de matéria seca não sejam ideais em áreas de irrigação, enquanto que variedades de maturação média e tardia, com alto perfilhamento e alto índice de área foliar podem ser mais produtivas, havendo maior quantidade de matéria seca.

O portal de notícias Revista Cultivar publicou uma reportagem feita com os Pesquisadores do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) que mostram exatamente como o cuidado com o déficit hídrico da cana pode acrescentar no rendimento. Existem quatro tipos de irrigação para a cana, a de salvamento, deficitária, complementar às chuvas e plenas.

As irrigações de salvamento são caracterizadas por aplicações de pequenas lâminas em épocas críticas e de alta necessidade de água (rebrotas), as chamadas deficitárias atendem à demanda hídrica apenas nas épocas que a cultura necessita de maior quantidade de água, as irrigações complementares são aquelas em função da maior tolerância ao estresse hídrico e porque as chuvas já disponibilizam água suficiente para otimizar a produção e a plena (total) é com maior frequência de rega e lâminas maiores (BUFON; MAIA; PEREIRA, 2021).

O IAC ainda orienta os passos para a implementação da irrigação na área, como o planejamento de todo o projeto, com a obtenção da outorga do uso da água, análise técnica e financeira, providências para a disponibilidade de energia para o sistema, programação de implantação, cenários futuros e adequação de estruturas físicas.

O enfoque da cana irrigada é grande e as pesquisas visam as melhores alternativas de produção e consumo com estudos que analisam as adubações e uso de resíduos durante o ciclo da cana, diferentes tipos de irrigação, qual a resposta da cana perante as irrigações de salvamento, deficitária, complementar e plena, estratégias de manejo, uso de mudas pré-

brotadas e outras que buscam o melhor rendimento canavieiro. A pesquisadora ressalta ainda que “O aumento do uso dos pivôs está associado às vantagens na adoção, em ganho de produtividade e longevidade da cultura, características dos equipamentos e viabilidade econômica e financeira alcançada”.

Sendo assim, é possível observar que os produtos e subprodutos obtidos a partir da cana possuem um maior incremento quando utilizado em conjunto com a irrigação, satisfazendo a necessidade de aumento da produção agrícola sem expandir a quantidade de área utilizada, estímulo à produção de biocombustível sustentável e à produção energética limpa e renovável.

Pedroso (s.d.), engenheiro agrônomo da Netafim, afirma que em alguns casos, há um tempo médio de retorno de três anos para obter o valor investido, e o sistema dura mais 9 anos com lucros e maiores margens. Ele ainda diz que em algumas regiões, o retorno ocorreu em 1 ano e meio, devido ao expressivo déficit hídrico da região. Há possibilidade de aplicar tanto a vinhaça quanto produtos químicos e biológicos, facilita o manejo da adubação e controle de pragas na área, auxiliando também na diminuição de custos com maquinários, óleo diesel e funcionários.

O uso da fertirrigação é importante visto que diminui os problemas das perdas gasosas de NH_3 e contribui para aumentar a eficiência de uso da água e de fertilizantes nitrogenados. Além disso, ela tem a capacidade de não só aumentar a produção de cana de açúcar, mas também melhoria na qualidade da matéria prima (da SILVA *et al.*, 2017).

Na indústria sucroalcooleira são gerados diferentes resíduos, entre eles, água de lavagem de cana, bagaço, torta de filtro e vinhaça (CAVALCANTI *et al.*, 2019). A água de lavagem da cana pode ser reciclada para o processo de embebição e de lavagem, o bagaço como cogeração de energia elétrica, adubo orgânico, produção de ração animal e celulose, a torta de filtro como condicionador de solo e produção de celulose, e a vinhaça utilizada como fertilizante (CETESB, 2002). O reaproveitamento dos resíduos gera menor impacto ambiental, melhor aproveitamento de todo o ciclo da cultura e melhor gestão ambiental dentro da indústria (CAVALCANTI *et al.*, 2019).

Segundo Fonseca *et al.*, (2007, p. 194-209), o uso de resíduos do tratamento de esgoto pode ser visto como uma ação benéfica a produção agrícola, devido ao aproveitamento da água, e a disponibilização de nutrientes para a área. Os efluentes de tratamento de esgoto são ricos em potássio (JARVIE *et al.*, 2009).

Deon e outros (2010, p. 1149-1156) mostraram que o uso de efluentes de esgoto na produção canavieira auxiliam na redução de gastos com fertilizantes de base nitrogenada, além de ganhos na produção produtividade pela reposição da evapotranspiração da cultura.

A chamada vinhaça ou vinhoto, é um material que possui mau cheiro e altamente tóxico quando lançado em efluentes, poluindo águas, exterminando peixes e podendo contaminar lençóis freáticos. Contudo, possui altas concentrações de potássio e altos níveis de matéria orgânica. Para cada litro de etanol produzido, são produzidos ao menos 10 litros de vinhoto (OLIVEIRA, 2011). Ainda segundo o autor, a partir de 1978, a Cetesb (Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental do estado de São Paulo) obrigou os produtores a utilizar esse resíduo nas áreas de canavieiras, dando uma solução ambiental e comercial para a vinhaça.

Além da alta concentração de potássio e matéria orgânica, graças a características químicas do vinhoto, é possível aumentar o pH, a capacidade de troca catiônica, a retenção de água no solo, tornar mais disponíveis alguns íons e também melhorar as estruturas físicas do solo (ANA; INOVAGRI, 2017).

Paulino *et al.*, indicaram que existem limitações na quantidade aplicada de vinhaça na área. Aplicações de 300 a 400 m³/ha de vinhaça se mostrou benéfica, tanto para a produção agrícola quanto industrial, já doses mais altas como 600 m³/ha são inviáveis devido ao maior custo de mão de obra, gasto com combustível e desgastes das máquinas, causando produções agrícolas e indústrias inferiores às demais doses.

Além de maior custo de produção, doses maiores podem causar um alto impacto ambiental e desperdício de resíduos, que poderiam ser aproveitados em outras áreas e finalidades. Esse uso exagerado contamina lençóis freáticos com potássio, causa a lixiviação de metais pesados, e depois causa mau cheiro e emissão de gases do efeito estufa (ZAIAT; SILVEIRA, 2015).

Segundo dados da Conab, a estimativa de produção de etanol para 2022/23 é de quase 26 bilhões de litros, isso equivale a quase 260 bilhões de litros de vinhaça produzido.

O uso da vinhaça em áreas de cana é benéfico, porém em excesso, causa impactos ambientais e desperdiça o potencial para a geração de energia elétrica. Uma solução para diminuir este impacto ambiental, são trabalhos como os dos pesquisadores da Universidade de São Paulo (USP) e do Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais (CNPEM) que buscam a transformação da vinhaça em biogás por meio de biodigestores, mudando a forma como é utilizada a vinhaça e também a própria produção de energia. É dito que o biogás feito a partir da vinhaça irá substituir a energia elétrica do bagaço, e esse bagaço que sobrou, não mais será usado para energia, e sim para o etanol de segunda geração (ZAIAT; SILVEIRA, 2015).

Alvarenga e Queiroz (2008) mostram que a torta de filtro é mais um resíduo utilizado áreas de canaviais, originado da mistura do bagaço moído e do lodo de decantação, sendo este originado a partir do processo de clarificação do açúcar. Eles também citam que a produção

desse resíduo é de 30 a 40 kg por tonelada de cana moída e que, em conjunto com a vinhaça, é possível economizar até US\$ 60 por hectare, além de diminuir a poluição de rios e possibilitar maior retorno econômico na produção agrícola.

Esse resíduo é composto principalmente por fósforo e matéria orgânica e ainda pode ser adicionado compostos para maior valor nutricional, como cinza de caldeiras, palhada e gesso (CANA ONLINE, 2020). De acordo com Silva (2017), uma amostra de torta de filtro utilizada no trabalho, continha 23,49% de matéria orgânica, 0,95% de P₂O₅ e pH de 6,81.

2.3.2 Métodos de irrigação de canaviais

Há dois tipos mais comuns de irrigação para a cultura da cana-de-açúcar, a irrigação localizada, feita por gotejamento e a irrigação por aspersão (SANTOS *et al*, 2017).

A irrigação localizada por gotejamento pode ser feita de forma superficial e subsuperficial, usando de tubos perfurados ou mangueiras gotejadoras. O primeiro, é mais utilizado como um sistema móvel, sendo empregado em áreas que necessitam de salvamento após uma estiagem prolongada. O subsuperficial, é o método em que se enterra a linha de gotejadora próxima ou abaixo da linha de plantio e a água é aplicada na região radicular da cultura. Em termos de eficiência, o gotejamento é o de maior destaque entre todos os sistemas, sendo aplicado água em pequenas vazões, baixas pressões e alta frequência, mantendo sempre o solo úmido. O problema do sistema de gotejamento é o alto custo de implantação, além da atenção redobrada para o uso de filtros e qualidade da água, para evitar entupimentos. (BUFON; MAIA; PEREIRA, 2021, p. 566).

O sistema localizado cria uma área molhada de forma circular, mas no solo úmido forma um bulbo na porção do solo, o conjunto de bulbos próximos vão criar uma faixa molhada continua, responsável por disponibilizar água diretamente para as raízes das plantas, sempre tentando manter o solo próximo a capacidade de campo. (Manual de Irrigação, 8 ed., p. 483 – 484).

Neto *et al* (2015, p. 15-18), mostram que o sistema de irrigação localizada tem uma alta eficiência, chegando à 90% e um ótimo aproveitamento da água, mesmo aplicando uma vazão inferior do que foi projetado.

O sistema localizado cria uma área molhada de forma circular, mas no solo úmido forma um bulbo na porção do solo, o conjunto de bulbos próximos vão criar uma faixa molhada continua, responsável por disponibilizar água diretamente para as raízes das plantas, sempre

tentando manter o solo próximo a capacidade de campo. (Manual de Irrigação, 8 ed., p. 483 – 484).

O sistema pivô central aplica gotas de água imitando a chuva em toda a superfície foliar, atingindo posteriormente o solo e irrigando toda a área. Com o avanço das tecnologias do sistema tornou-se possível a operação em baixas pressões, parecidas com as de irrigações localizadas, assim como também o aumento do tamanho da gota, diminuindo perdas por evaporação e arraste e aumento do raio de alcances dos emissores. Os aspersores do pivô podem ainda ser aproveitados para aplicação de vinhaça e água residual, assim como produtos químicos, sem tanto risco de entupimento como no gotejo, desde que haja equipamento anticorrosivo. Esse meio de irrigação possui a vantagem de simplicidade na execução e manutenção de todo o sistema, além de alta eficiência de aplicação e baixo consumo de energia, somado com o baixo custo de milímetro irrigado.

Contudo, o sistema do pivô central pode ser prejudicado pela alta declividade do terreno e devido as limitações na intensidade de aplicação das grandes áreas do sistema (BUFON; MAIA; PEREIRA, 2021).

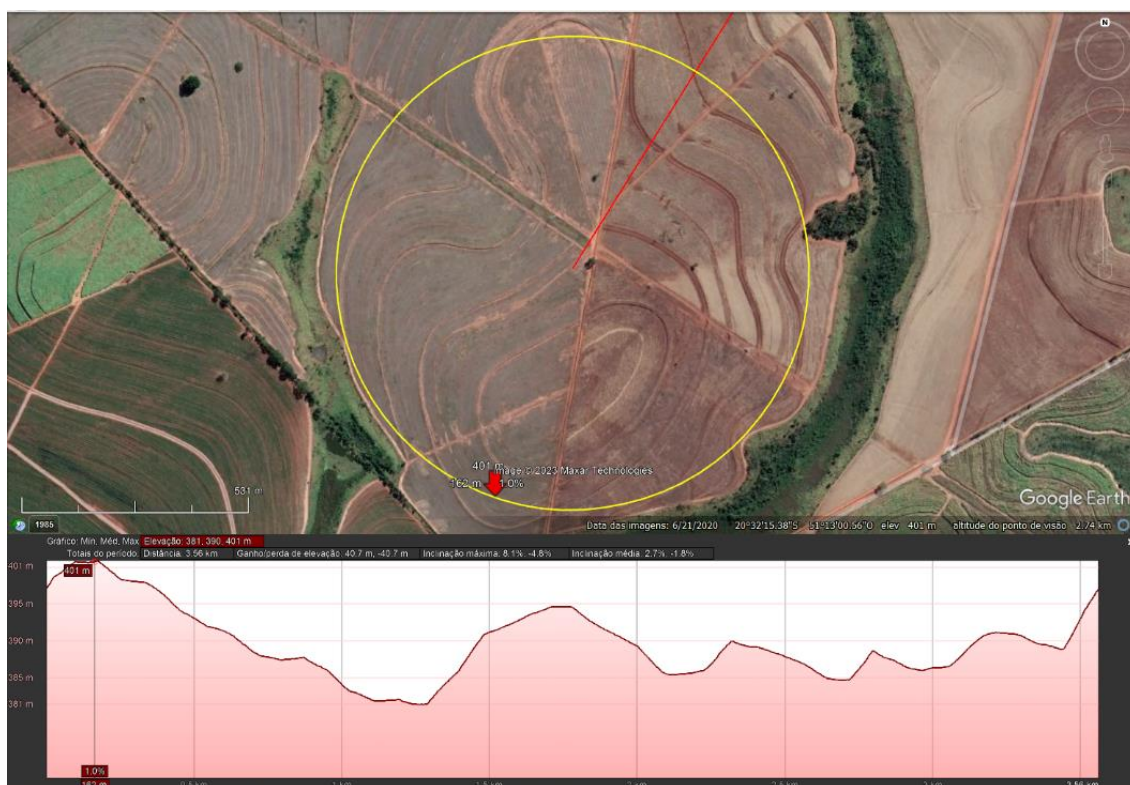
No começo dos anos 2000 até 2018, a agricultura irrigada por pivô central do noroeste paulista implantou mais de 240 equipamentos, irrigando 10.473 hectares, ou seja, em um período de 18 anos, houve um incremento de 157% na área total irrigada (OLIVEIRA, 2020).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Locação do sistema de irrigação

Neste trabalho foi assumida a locação de um sistema de irrigação do tipo pivô central em uma usina no município de Pereira Barreto, na região noroeste do Estado de São Paulo. A área irrigada pelo equipamento é correspondente a 100,66 ha (Figura 3), tendo o ponto central nas coordenadas S 20°31'58" e O 51°12'54, conforme a imagem utilizada no Google Earth. O raio irrigado é 566 m, tendo 13 lances (torres móveis) de 42 m e balanço final 20 m. A declividade média do círculo irrigado é 2,4%, tendo altitude máxima 408 m e mínima 381 m.

Figura 3. Locação e informações básicas do sistema pivô central, bem como parcialmente a linha de recalque do sistema de bombeamento (linha vermelha).



Fonte: Google Earth

3.2 Estimativa da necessidade de irrigação da cana e estabelecimento da lâmina de irrigação de projeto do sistema pivô central

Para se estimar a necessidade de irrigação da cana, assim como estabelecer a lâmina de irrigação de projeto do sistema pivô central, foi necessário obter os dados da evapotranspiração de referência (ET_o). Utilizou-se a série histórica do período de 2002 a 2022, obtida no site

<http://clima.feis.unesp.br/>, sendo a ETo estimada pelo método de Penman-Monteith. Com base nessa série histórica, a ETo média anual é correspondente a 4,05 mm/dia. Também foi calculado o valor médio da ETo e o acumulado mês a mês, conforme pode ser observado na Tabela 1. Em seguida, e com base o boletim 56 da FAO (Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura), aplicou-se o coeficiente de cultivo (Kc) para obter a estimativa da evapotranspiração potencial acumulada da cana em cada mês (ETc). Segundo o mesmo boletim, o valor do Kc no início do ciclo da cultura é baixo, 0,4, passando para o valor máximo durante o pleno desenvolvimento, 1,2, e no final caindo para 0,75. Foi considerado o valor de 1,0 no estabelecimento da vazão do sistema pivô central.

Tabela 1. Valores da evapotranspiração média diária, acumulada e da evapotranspiração acumulada da cultura da cana de açúcar.

Mês	ETo média diária ¹ (mm/dia)	ETo-acumulado mensal ¹ (mm/mês)	ETc acumulada ² (Kc = 1,0) (mm/mês)
Janeiro	4,46	138,3	138,3
Fevereiro	4,50	125,9	125,9
Março	4,15	128,7	128,7
Abril	3,76	112,9	112,9
Maio	2,93	90,9	90,9
Junho	2,71	81,3	81,3
Julho	3,15	97,7	97,7
Agosto	4,07	126,2	126,2
Setembro	4,75	142,4	142,4
Outubro	4,57	141,7	141,7
Novembro	4,89	146,7	146,7
Dezembro	4,75	147,3	147,3

¹Fonte: UNESP – Canal Clima;

²Fonte: Próprio autor

Considerou-se que somente haverá necessidade de irrigação quando a ETc for superior a precipitação mensal acumulada (Pac), ou seja, sem a irrigação haveria um déficit hídrico na cultura e a evapotranspiração deixaria de ser potencial.

O valor da lâmina de irrigação acumulada que deverá ser aplicada mensalmente pelo sistema para suprir o déficit considerou a eficiência de aplicação do sistema de irrigação, assumido 90%, que corresponde a um valor típico para esse tipo de sistema (pivô central). Assim, havendo déficit hídrico, a lâmina de irrigação acumulada no mês é dividida por 0,9.

Tabela 2. Valores da evapotranspiração acumulada, precipitação acumulada, necessidade de irrigação no mês e o quanto precisa irrigar

Mês	ETc acumulada (Kc = 1,0) (mm/mês)	Precipitação acumulada (mm/mês)	Precisa irrigar	Quanto irrigar (mm/mês)
Janeiro	138,3	245,4	Não	0
Fevereiro	125,9	167,1	Não	0
Março	128,7	152,2	Não	0
Abril	112,9	67,3	Sim	45,6
Maio	90,9	55,8	Sim	35,1
Junho	81,3	31,8	Sim	49,5
Julho	97,7	17,6	Sim	80,1
Agosto	126,2	25,7	Sim	100,5
Setembro	142,4	58,3	Sim	84,1
Outubro	141,7	113,4	Sim	28,3
Novembro	146,7	154,9	Não	0
Dezembro	147,3	186,9	Não	0

Fonte: UNESP – Canal Clima

Por sua vez, a lâmina de projeto do sistema pivô central, ou seja, a capacidade de suprimento da evapotranspiração da cana, foi calculada pela seguinte equação:

$$L = \frac{(ETo \text{ média} + ETo \text{ mais alta}) Kc}{2} \frac{24}{Ea \ t_{máx}} \quad (1)$$

Sendo:

L = lâmina de irrigação de projeto do pivô central (mm)

ETo média = evapotranspiração média diária do ano (mm/dia)

ETo mais alta = evapotranspiração média diária do mês com a maior média (mm/dia)

Kc = coeficiente de cultivo da cana

Ea = eficiência de aplicação do sistema de irrigação (%)

t_{máx} = tempo máximo de operação do sistema por dia (h)

Os valores utilizados na equação (1) foram:

ETo média = 4,05 mm/dia, correspondente média da série histórica (2002 a 2022);

ETo mais alta = 4,89 mm/dia, correspondente ao mês de novembro da série histórica;

Kc = 1,0, correspondente ao maior valor do ciclo da cana;

Ea = 90%, correspondente a um valor padrão do equipamento;

t_{máx} = 21 h, tempo máximo de operação do sistema por dia (h), cujo propósito é excluir as 3 horas de ponta da tarifa da energia elétrica. Observação: Embora a energia para acionamento do sistema de irrigação seja proveniente da cogeração da usina de açúcar e álcool, considerou-se condições de fornecimento da energia elétrica similares àquelas de um

consumidor comum, ou seja, aquele que compra a energia elétrica diretamente de uma concessionária, exceção aos valores das tarifas. Por essa razão que se assumiu o uso de no máximo 21 horas diárias o equipamento de irrigação.

Com isso, o resultado da lâmina de projeto foi 5,67 mm ($L = 5,67$ mm), que corresponde à lâmina bruta máxima que o sistema consegue aplicar no limite máximo de operação de 21 horas diárias. Essa lâmina tende a ser suficiente para maioria da demanda de evapotranspiração da cultura, contudo, por se tratar de valores médios, é também provável que os dias de maior demanda da cultura o sistema de irrigação não seja capaz de repô-la integralmente.

Considerando que, a velocidade máxima de deslocamento da última torre do equipamento (torre que comandará as demais a se deslocar seguindo um alinhamento) seja 245 metros por hora (valor típico desses sistemas) e, considerando – se que o perímetro percorrido por ela é 3431 m (devido ao raio da última torre ser aproximadamente 546 m), então, o tempo mínimo de cada volta completa do pivô central corresponde a 14 horas, sendo aplicada uma lâmina mínima de 3,78 mm.

Para calcular o valor da lâmina a ser aplicada por giro completo do equipamento em determinado ajuste do relé temporizador, que fica localizado na torre fixa sendo também denominado percentímetro, basta utilizar a equação:

$$L_a = L \frac{100}{p} \quad (2)$$

Sendo:

L_a = lâmina de irrigação aplicada pelo equipamento numa determinada regulagem do relé temporizador (mm/volta)

L = lâmina de irrigação de projeto do pivô central (mm/dia)

p = ajuste feito no relé percentual de comando localizado no ponto pivô (%), sendo menor ou igual a 100

Por sua vez, a vazão do sistema pivô central foi calculada pela equação:

$$Q = \frac{10 L A}{24} \quad (3)$$

Sendo:

Q = vazão do sistema pivô central (m^3/h)

L = lâmina de irrigação de projeto do pivô central, cujo valor é 5,67 mm/dia

A = área irrigada, cujo valor é 100,66 ha

Dessa forma obteve-se a vazão de 237,8 m^3/h e, conforme foi exposto na Tabela 2, será necessário irrigar a cultura nos meses de abril a outubro. A Tabela 3 apresenta um resumo das

lâminas necessárias (acumuladas), os volumes acumulados correspondentes na área (100,66 ha), e os tempos de operação (acumulados) mês a mês, sendo este calculado através da divisão dos volumes acumulados pela vazão do sistema de irrigação (237,8 m³/h).

Tabela 3. Valores da lâmina de irrigação necessária, do volume acumulado de água no mês e o tempo de operação do sistema de irrigação.

Mês	Lâmina de irrigação necessária (Quanto irrigar) (mm/mês)	Volume acumulado (m ³ /mês)	Tempo de operação do sistema de irrigação (h/mês)
Abril	45,6	45.901	193
Maio	35,1	35.332	149
Junho	49,5	49.827	210
Julho	80,1	80.629	339
Agosto	100,5	101.163	425
Setembro	84,1	84.655	356
Outubro	28,3	28.487	120
Total	423,2	425.993	1791

Fonte: Próprio autor

3.3 Seleção dos componentes básicos do sistema de bombeamento

O sistema de bombeamento teve 3 opções de diâmetro interno da tubulação de recalque, conforme a Tabela 4. O material da tubulação de recalque é o polietileno de alta densidade (PEAD), classe de pressão 10 bares (PN 10).

Tabela 4. Especificações dos tubos de PEAD utilizados na tubulação de recalque.

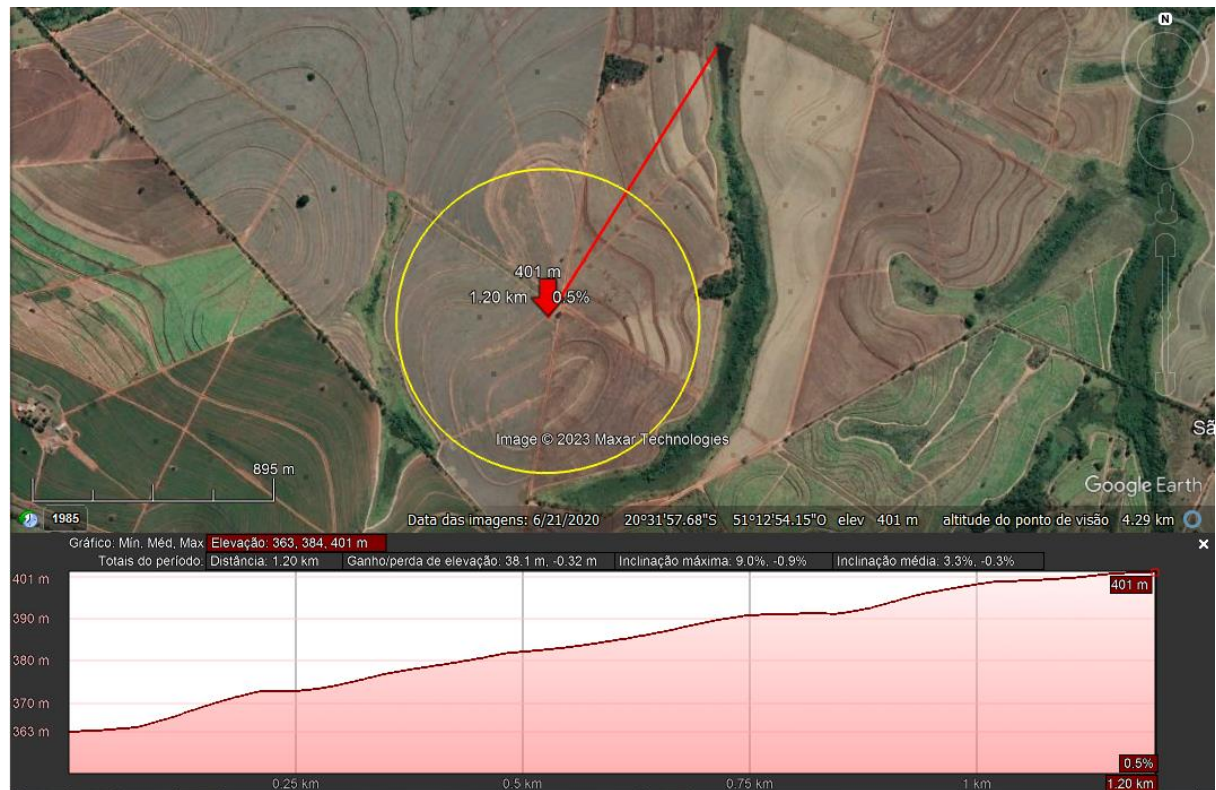
Classe de pressão (PN em bar)	Diâmetro externo (mm)	Espessura (mm)	Diâmetro interno (mm)
PN 10	200	11,9	176,2
PN 10	250	14,9	220,2
PN 10	315	18,7	277,6

Fonte: FGS Brasil – Tubos PEAD

A classe de pressão (PN 10) foi a selecionada em função da expectativa da pressão gerada pela bomba hidráulica. A extensão da tubulação de recalque é 1200 metros e seu desnível topográfico é 38 m (cota inicial 363 m e final 401 m), sendo representada pela linha vermelha da Figura 4.

Esses diâmetros geraram diferenças na perda de carga e, conseqüentemente, diferenças na altura manométrica do sistema que, por sua vez, resultaram em níveis distintos de necessidade de potência da bomba hidráulica, motor elétrico e demais acessórios elétricos.

Figura 4. Tubulação de recalque (linha vermelha) e seu perfil topográfico.
Fonte: Google Earth



A perda de carga na tubulação de recalque foi calculada pela fórmula Universal:

$$hf_r = 0,082711 f \frac{Q^2}{D^5} L_r \quad (4)$$

Sendo:

hf = perda de carga na tubulação de recalque (m)

f = fator de atrito

Q = vazão (m^3/s)

D = diâmetro (m)

L_r = comprimento da tubulação de recalque (m)

A Tabela 5 compila os resultados dos componentes da altura manométrica do sistema de bombeamento (H) nos três diâmetros propostos da tubulação de recalque. A altura manométrica foi calculada considerando a perda de carga na tubulação de recalque, o desnível geométrico do recalque, o desnível geométrico da sucção, considerado 1,0 m, a pressão necessária no ponto pivô, considerada 40 metros de coluna de água (mca). A perda de carga na tubulação de sucção e as perdas nos acessórios hidráulicos foram desprezadas (normalmente possuem valor baixo que podem ser desprezados nas tubulações longas com poucos acessórios).

Tabela 5. Valores dos diâmetros externos e internos da tubulação, fator de atrito, perda de carga na tubulação de recalque, desnível total, pressão no ponto pivô e valor da altura manométrica.

Diâmetro externo (mm)	Diâmetro interno (mm)	fator de atrito	h_{f_r} (m)	Desnível total (m)	Pressão ponto pivô (mca)	H (m)
200	176,2	0,0140	35,7	39	40	114,7
250	220,2	0,0143	12,0	39	40	91,0
315	277,6	0,0148	3,9	39	40	82,9

Fonte: Próprio autor

Tendo os valores da altura manométrica do sistema de bombeamento e a vazão, foram selecionadas as bombas hidráulicas e os motores elétricos nas três opções do diâmetro da tubulação de recalque, conforme pode ser visto na Tabela 6.

Tabela 6. Especificação dos modelos de bombas hidráulica e motor elétrico utilizado no sistema para cada diâmetro da tubulação de recalque.

Item	Diâmetro interno da tubulação de recalque		
	176,2 mm	220,2 mm	277,6 mm
1) Bomba hidráulica	KSB WKL	KSB WKL	KSB Meganorm
Modelo	125/3	125/2	125-400
Estágios	3	2	1
Rotação (rpm)	1750	1750	1750
Diâmetro do rotor (mm)	298	310	408
Rendimento (%)	77	78	73
NPSH exigido (m)	5,0	4,7	2,5
Potência demandada (hp/kW)	130/97	100/75	100/75
2) Motor elétrico	WEG W22 IR4	WEG W22 IR4	WEG W22 IR4
Número de pólos	4	4	4
Rotação (rpm)	1750	1750	1750
Rendimento (%)	96,3	96,2	96,2
Fator de potência (%)	82	82	82
Fator de serviço	1,25	1,25	1,25
Potência nominal (hp/kW)	150/110	100/75	100/75

Fonte: Próprio autor

3.4 Consumo de energia elétrica do sistema de irrigação e quantidade de bagaço de cana para geração da energia do sistema de bombeamento e de movimentação das torres do pivô central

O consumo de energia elétrica da irrigação contempla a energia do bombeamento (dominante) e a energia para movimentação das torres da linha lateral do sistema de irrigação,

que possui 13 torres com motor elétrico de 1,5 hp ($\cong 1,11$ kW) cada torre, totalizando 19,5 hp ($\cong 14,5$ kW).

O consumo de energia elétrica devido ao bombeamento é calculado pela equação:

$$en = \frac{Q H 9,8 t}{1000 \eta_b \eta_m} \quad (4)$$

Sendo:

en = energia elétrica consumida no bombeamento (kWh)

Q = vazão do sistema pivô central (L/s)

H = altura manométrica de bombeamento (m)

η_b = rendimento da bomba hidráulica (decimal)

η_m = rendimento do motor elétrico (decimal)

Por sua vez, a energia elétrica gerada pela combustão do bagaço de cana é bastante variável entre as usinas sucroalcooleiras. Segundo a NOVACANA (2021), uma empresa de consultoria, a produtividade média brasileira em 2021 foi de 34,94 kWh por tonelada de cana, muito aquém do desejável, que seria em torno de 96 kWh/t., Contudo, houve usina que superou o valor, chegando a 104 kWh/t moendo 26,2 milhões de toneladas. Será assumido neste trabalho uma produtividade de 65 kWh/t, valor facilmente alcançável ou mesmo considerado conservador para a tecnologia disponível atualmente.

Em termos de balanço energético, cada 1 kg de bagaço tem capacidade de liberar 5 kWh de energia em sua combustão, contudo se sua umidade for 50%, que é a situação real após a moagem e estocagem na usina, sua capacidade cai para cerca de 2 kWh. Cada tonelada de cana produz em média 250 kg de bagaço (50% de umidade), portanto, teoricamente poderia ser produzido 500 kWh. No entanto, o rendimento das caldeiras das usinas varia entre 15 e 25%, o que conduz ao valor de 100 kWh se for considerado o valor médio (20%), sendo assim, esse o valor de referência aproximado desejável para as usinas.

3.5 Avaliação econômica do uso da energia da cogeração para irrigação da cana

Foram considerados 3 Cenários em relação ao acréscimo de produtividade com a irrigação: 1º - Pessimista, que considera um acréscimo de somente 35%; 2º - Ordinário, que considera um acréscimo de 70%; e 3º - Otimista, que considera um acréscimo de 100%. A produtividade média da cana na região é 77,4 t/ha (DIÁRIO DA REGIÃO, 2023). Assim, no cenário pessimista se esperou um acréscimo de 27,1 t/ha; no cenário ordinário se esperou um acréscimo de 54,2 t/ha; e no cenário otimista se esperou um acréscimo de 77,4 t/ha.

Os benefícios diretos pela irrigação estão na comercialização do açúcar, segurança de produção agrícola, e da capacidade do aumento do rendimento da venda do açúcar. O valor da saca do açúcar, com fechamento no dia 06 de junho de 2023, é de R\$ 147,83 (Cepea/Esalq). Em média, o processamento de uma tonelada de cana, resulta em 120 kg de açúcar (NOVACANA, s.d). E no Brasil, o custo do açúcar bruto é de USD 350.00 por megatonelada de cana, e enquanto que na China, o valor do açúcar cristal vindo da cana é de USD 812,00 por megatonelada. (ZANCANER, 2022).

Foram considerados os seguintes valores para estimar o investimento na irrigação:

i) Preço do pivô central sem considerar as adutoras, bomba hidráulica e motor elétrico: R\$ 2.013.200,00 (Fonte: FERNANDO BRAZ TANGERINO, comunicação verbal tendo como referência R\$ 20.000,00/ha já montado);

ii) Preço dos tubos de PEAD para as tubulações de recalque: R\$ 20,00/m para o diâmetro (externo) 200 mm; R\$ 40,00/m para o diâmetro (externo) 250 mm e R\$ 70,00/m para o diâmetro (externo) 315 mm (Fonte: REAL MÁQUINAS – BIRIGUI/SP);

iii) Preço do conjunto motobomba: R\$ 92.000,00 para o diâmetro (externo) 200 mm; R\$ 73.000,00 para o diâmetro (externo) 250 mm e R\$ 69.000,00 para o diâmetro (externo) 315 mm (Valores ajustados com base em similares obtidos no site MF RURAL (<https://www.mfrural.com.br/>));

iv) Preço dos componentes elétricos no bombeamento, excluindo os motores elétricos: 100% do valor da soma da bomba hidráulica com o motor elétrico;

v) Preço de comercialização da energia elétrica da usina para a Concessionária: R\$ 0,069/kWh;

vi) Tempo de amortização: 15 anos;

vii) Preço do açúcar comercializado pela usina: R\$ 147,83/sc 50 kg (Fonte: CEPEA/ESALQ, 06-junho-2023);

viii) Custo de produção do açúcar pela usina: US\$ 350.00/t (1.00 US\$ = 5,00 R\$);

ix) Preço da rede de energia elétrica na tensão de 13,8 kV (considerando 1000 m de extensão): R\$ 213.720,00. Esse valor atualizado com base no artigo de Velasco *et al.* (2003), sendo o fator de atualização 5,48 considerando o Índice Nacional do Custo da Construção (INCC). O preço da rede, conforme os autores, era R\$ 39.000,00/km de rede primária;

x) Energia elétrica unitária gerada pela queima do bagaço de cana: 65 kWh por tonelada de cana (considerando 250 kg de bagaço por tonelada de cana), ou seja, aproximadamente 260 kWh por tonelada de bagaço.

Os fatores indiretos na implementação do sistema também devem ser considerados, como menor área para a produção de mudas, menos gasto com reforma dos canaviais e longevidade do canavial.

Para Pedroso (s.d.), a longevidade do canavial está amplamente ligada com a irrigação, este possibilita melhores condições para a cultura da cana de açúcar, explica o engenheiro agrônomo da Netafim. O número de cortes pode saltar de seis cortes durante o ciclo, para até 12, assim, os custos com a reforma são menores pelo tempo total que perdura o canavial, e o aumento expressivo da produção de etanol, açúcar e biomassa, induz a maior eficácia e mitigação dos custos do sistema.

Houve um incremento nos custos de reforma de áreas de cana de açúcar, devido à alta dos valores de insumos agrícolas, como fertilizantes, defensivos químicos e biológico, maquinário e óleo diesel. O salto do custo de reforma foi de R\$ 8.500,00 por hectare para R\$ 10.500,00 no ano de 2021. E o custo para implementação no ano de 2022 foi maior ainda, a estimativa é de que seja em torno de R\$ 12.500,00 por hectare (CANA ONLINE, 2022). Como a irrigação permite o maior número de cortes, esse valor é amortizado em até 12 safras.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 7, 8 e 9, que se seguem, apresentam a síntese dos resultados, especialmente os custos e benefícios da irrigação da cana, nos 3 cenários propostos e nos 2 diâmetros da tubulação de recalque.

Tabela 7. Indicativos da produção da cana irrigada no pivô central de 100,66 hectares no cenário 1 (produtividade de 104,49 t/ha – 35% de acréscimo em relação à de sequeiro).

ITEM	Unidade	DI = 176,2 mm	DI = 220,2 mm	DI = 277,6 mm
Investimento no pivô central	R\$	2.013.200	2.013.200	2.013.200
Investimento na tubulação de recalque	R\$	24.000	48.000	84.000
Investimento no conjunto motobomba	R\$	92.000	73.000	69.000
Investimento nos demais acessórios	R\$	92.000	73.000	69.000
Investimento na rede elétrica (1000 m)	R\$	213.720	213.720	213.720
Total de investimento	R\$	2.434.920	2.420.920	2.448.920
Custo anual com manutenção e reparos	R\$	24.349	24.209	24.489
Custo fixo anual	R\$	162.328	161.395	163.261
Potência do bombeamento	kW	100,1	78,5	76,4
Potência movimentação do pivô	kW	14,5	14,5	14,5
Energia anual gasta no bombeamento	kWh	159.814	125.297	121.962
Energia anual gasta na movimentação do pivô	kWh	23.142	23.142	23.142
Consumo anual de bagaço para geração e.e.	t	704	571	558
Custo anual da energia elétrica	R\$	58.741	46.054	44.828
Acréscimo de açúcar pelo acréscimo de produtividade	kg	327.225,5	327.225,5	327.225,5
Receita bruta do açúcar pelo acréscimo de produtividade	R\$	967.475	967.475	967.475
Receita líquida do açúcar pelo acréscimo de produtividade	R\$	394.830	394.830	394.830
Bagaço produzido pelo acréscimo de produtividade	t	682	682	682
Renúncia de receita da venda e.e. para a Concessionária	R\$	12.624	10.242	10.012
Benefícios (Receita líquida + valor da e.e do bagaço extra)	R\$	411.118	411.118	411.118
Custos da irrigação + renúncia da venda de e.e.	R\$	258.042	241.900	242.591
SALDO (anual)	R\$	153.075	169.217	168.526

Fonte: Próprio autor

Tabela 8. Indicativos da produção da cana irrigada no pivô central de 100,66 hectares no cenário 2 (produtividade de 131,58 t/ha – 70% de acréscimo em relação à de sequeiro).

ITEM	Unidade	DI = 176,2 mm	DI = 220,2 mm	DI = 277,6 mm
Investimento no pivô central	R\$	2.013.200	2.013.200	2.013.200
Investimento na tubulação de recalque	R\$	24.000	48.000	84.000
Investimento no conjunto motobomba	R\$	92.000	73.000	69.000
Investimento nos demais acessórios	R\$	92.000	73.000	69.000
Investimento na rede elétrica (1000 m)	R\$	213.720	213.720	213.720
Total de investimento	R\$	2.434.920	2.420.920	2.448.920
Custo anual com manutenção e reparos	R\$	24.349	24.209	24.489
Custo fixo anual	R\$	162.328	161.395	163.261
Potência do bombeamento	kW	100,1	78,5	76,4
Potência movimentação do pivô	kW	14,5	14,5	14,5
Energia anual gasta no bombeamento	kWh	159.814	125.297	121.962
Energia anual gasta na movimentação do pivô	kWh	23.142	23.142	23.142
Consumo anual de bagaço para geração e.e.	t	704	571	558
Custo anual da energia elétrica	R\$	58.741	46.054	44.828
Acréscimo de açúcar pelo acréscimo de produtividade	kg	654.451,1	654.451,1	654.451,1
Receita bruta do açúcar pelo acréscimo de produtividade	R\$	1.934.950	1.934.950	1.934.950
Receita líquida do açúcar pelo acréscimo de produtividade	R\$	789.661	789.661	789.661
Bagaço produzido pelo acréscimo de produtividade	t	1.363	1.363	1.363
Renúncia de receita da venda e.e. para a Concessionária	R\$	12.624	10.242	10.012
Benefícios (Receita líquida + valor da e.e do bagaço extra)	R\$	822.235	822.235	822.235
Custos da irrigação + renúncia da venda de e.e.	R\$	258.042	241.900	242.591
SALDO (anual)	R\$	564.193	580.335	579.644

Fonte: Próprio autor

Tabela 9. Indicativos da produção da cana irrigada no pivô central de 100,66 hectares no cenário 3 (produtividade de 154,8 t/ha – 100% de acréscimo em relação à de sequeiro).

ITEM	Unidade	DI = 176,2 mm	DI = 220,2 mm	DI = 277,6 mm
Investimento no pivô central	R\$	2.013.200	2.013.200	2.013.200
Investimento na tubulação de recalque	R\$	24.000	48.000	84.000
Investimento no conjunto motobomba	R\$	92.000	73.000	69.000
Investimento nos demais acessórios	R\$	92.000	73.000	69.000
Investimento na rede elétrica (1000 m)	R\$	213.720	213.720	213.720
Total de investimento	R\$	2.434.920	2.420.920	2.448.920
Custo anual com manutenção e reparos	R\$	24.349	24.209	24.489
Custo fixo anual	R\$	162.328	161.395	163.261
Potência do bombeamento	kW	100,1	78,5	76,4
Potência movimentação do pivô	kW	14,5	14,5	14,5
Energia anual gasta no bombeamento	kWh	159.814	125.297	121.962
Energia anual gasta na movimentação do pivô	kWh	23.142	23.142	23.142
Consumo anual de bagaço para geração e.e.	t	704	571	558
Custo anual da energia elétrica	R\$	58.741	46.054	44.828
Acréscimo de açúcar pelo acréscimo de produtividade	kg	934.930,1	934.930,1	934.930,1
Receita bruta do açúcar pelo acréscimo de produtividade	R\$	2.764.214	2.764.214	2.764.214
Receita líquida do açúcar pelo acréscimo de produtividade	R\$	1.128.087	1.128.087	1.128.087
Bagaço produzido pelo acréscimo de produtividade	t	1.948	1.948	1.948
Renúncia de receita da venda e.e. para a Concessionária	R\$	12.624	10.242	10.012
Benefícios (Receita líquida + valor da e.e do bagaço extra)	R\$	1.174.622	1.174.622	1.174.622
Custos da irrigação + renúncia da venda de e.e.	R\$	258.042	241.900	242.591
SALDO (anual)	R\$	916.579	932.721	932.031

Fonte: Próprio autor

De acordo com os resultados e, em relação aos benefícios diretos, o saldo foi positivo em todos os cenários evidenciando a boa expectativa no investimento em irrigação da cana. Em relação ao diâmetro interno da tubulação de recalque, observa-se nas Tabelas 7, 8 e 9 que o diâmetro 220,2 mm foi o que proporcionou o maior saldo, consequência do melhor equilíbrio entre os custos fixos, manutenção e reparos e bombeamento.

Observa-se o montante referente à renúncia de receita da venda de energia elétrica para a Concessionária é pequeno o bastante para estimular o direcionamento da energia da cogeração para a irrigação ao invés da comercialização com a Concessionária. A maior receita líquida da comercialização do açúcar gerado pelo aumento da produtividade de cana é a principal causa

do saldo final anual se mostrar bastante vantajoso para o usineiro. Portanto, a atividade fim da usina, ou seja, produção de açúcar (ou mesmo etanol) é muito mais rentável ao usineiro do que a comercialização de energia elétrica com a Concessionária que é derivada do subproduto, mas, como há excedente de energia elétrica na usina, é melhor que seu uso seja interno (irrigação).

Outro aspecto importante da irrigação da cana no presente trabalho é que, o consumo anual de bagaço para a geração de energia elétrica para o bombeamento e movimentação do sistema de irrigação pivô central é inferior ao excedente de bagaço gerado pelo aumento da produtividade nos cenários 2 e 3, conforme pode ser visto nas linhas 14 e 19 das Tabelas 8 e 9. Apenas no cenário 1 e no caso do menor diâmetro da tubulação de recalque (176,2 mm) que o consumo de bagaço (704 t) é superior, mas minimamente, ao excedente (682 t). Ou seja, apenas o acréscimo de produtividade da cana irrigada produz bagaço suficiente para a autossuficiência energética utilizada no bombeamento e movimentação das torres do equipamento. Isso tudo considerando o rendimento relativamente baixo das usinas sucroalcooleiras na geração de energia elétrica por tonelada de cana, cujo valor considerado, 65 kWh por tonelada de cana pode ser dobrado se forem utilizadas caldeira com maior eficiência de conversão. Portanto, diante das condições e dos preços considerados neste trabalho, não utilizar a energia da cogeração para a irrigação é uma perda de oportunidade de o setor sucroalcooleiro lucrar mais e otimizar sua área de produção.

Por sua vez, em relação aos benefícios indiretos com a irrigação da cana, e independentemente do cenário produtivo da área, a economia indireta também promove um maior intervalo na reforma da área. Considerando que as usinas possuem áreas próprias para obtenção de mudas, é um gasto a menos que se tem na produção agrícola, já que com a irrigação e a longevidade dos canaviais, as áreas que antes eram destinadas ao corte de mudas, podem ser usadas para produção de açúcar e etanol normalmente. Essa capacidade de estender o período que a cana permanece sendo rentável, traz uma nova possibilidade de aproveitamento das canas mudas para cana planta.

A quantidade total de cana muda que pode ser utilizada em uma área de cana, varia de 12 a 22 toneladas por hectare, segundo o portal NOVACANA (2015). Dessa forma, o aumento da longevidade do canavial por meio da irrigação, causa uma economia de, no mínimo, mais de 1200 toneladas de mudas na área de estudo.

Houve um incremento nos custos de reforma de áreas de cana de açúcar, devido à alta dos valores de insumos agrícolas, como fertilizantes, defensivos químicos e biológico, maquinário e óleo diesel. O salto do custo de reforma foi de R\$ 8.500,00 por hectare para R\$ 10.500,00 no ano de 2021. E o custo para implementação no ano de 2022 foi maior

ainda, a estimativa é de que seja em torno de R\$12.500,00 por hectare (CANA ONLINE, 2022). Como a irrigação permite o maior número de cortes, esse valor é amortizado em até 12 safras. Na Tabela 10 pode-se observar o custo dividido pelos anos que o canavial se mantém na área e o valor total da reforma dividido pelo número de cortes obtidos.

Tabela 10. Custo da reforma referente ao valor pago por hectare e o custo baseado no número de cortes.

Cenário	Nº de cortes totais	Custo total da reforma (100,66 ha)	Valor da reforma por corte (R\$/corte)	Valor da reforma por hectare (R\$/ha)
Sequeiro	6	1.258.250	209.708,33	2.083,33
Irrigado	12	1.258.250	104.854,16	1.041,66

Fonte: CANA ONLINE

Ainda sobre a possibilidade de investimento em áreas irrigadas para canaviais, há maior aproveitamento da área e do bagaço produzido, já que em muitos casos, a venda de energia excedente para companhias de energia gera muitos entraves e impede a possibilidade de mercados viáveis para a usina. A venda para concessionárias e o firmamento de contrato pode diminuir o rendimento e o aproveitamento de toda a cana de açúcar, isso porque a energia possui uma volatilidade de preço muito grande e os contratos realizados geram incertezas do cumprimento do combinado pela companhia, além de haver possibilidade de outros usos da palhada e do bagaço. Como a energia produzida é um subproduto das usinas canavieiras, há preço de custo muito inferior à produzida pelas companhias, causando dificuldades na hora de comercialização visto que o mercado não é competidor. Em suma, a falta de estímulo e baixa valorização do excedente energético desestimula a adoção de técnicas e tecnologias que possam extrair mais energia da cana, contudo, com o redirecionamento da energia voltado a produção, torna-se possível que muitas usinas passem a investir em áreas irrigadas e melhorem as opções de aumento energético (SOUZA; AZEVEDO, 2006).

5 CONCLUSÕES

Conforme as condições e propósitos apresentados no presente trabalho, pode-se concluir que:

- Em relação aos benefícios diretos, o saldo foi positivo em todos os cenários (acréscimo de produtividade de 35, 70 e 100%) evidenciando a boa expectativa no investimento em irrigação da cana;

- O diâmetro interno da tubulação de recalque 220,2 mm foi aquele que proporcionou o maior saldo anual, consequência do melhor equilíbrio entre os custos fixos, manutenção e reparos e bombeamento;

- O consumo anual de bagaço para a geração de energia elétrica para o bombeamento e movimentação do sistema de irrigação pivô central é inferior ao excedente de bagaço gerado pelo aumento da produtividade promovida pela irrigação nas expectativas de produtividade de 70 e 100%. Na expectativa de aumento da produtividade de 35%, também o consumo é inferior ao excedente de bagaço gerado no caso dos dois diâmetros internos maiores da tubulação de recalque (220,2 e 277,6 mm) e apenas minimamente inferior no diâmetro 198,2 mm;

- Considerando todo o bagaço produzido na área irrigada, tanto aquele proveniente do acréscimo de produtividade, quanto aquele proveniente da produtividade normal, haveria energia elétrica suficiente e até mesmo excedente para a autossuficiência da irrigação;

- É uma opção muito mais rentável ao usineiro utilizar o excedente de energia elétrica da cogeração na irrigação ao invés de vendê-lo para a concessionária de energia elétrica no mercado atual;

- Além dos benefícios diretos, a irrigação da cana promove otimização da área e maior longevidade do canavial, podendo ser um importante aliado da sustentabilidade energética no setor sucroalcooleiro.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Atlas irrigação 2021: Uso da água na agricultura irrigada** (2ª edição), 2021. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/1b19cbb4-10fa-4be4-96db-b3dcd8975db0>. Acesso em: 09 de dez de 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Levantamento da cana-de-açúcar irrigada na Região Centro-Sul do Brasil**. Brasília: ANA, 2017. Disponível em: <https://www.ana.gov.br/arquivos/institucional/sge/CEDOC/Catalogo/2017/LevantamentoDaCanaDeAcucarIrigadaNaRegiaoCentroSulDoBrasil.pdf>. Acesso em: 09 de dez de 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Manejo e cuidados no uso da vinhaça na fertirrigação**, s.d. Disponível em: https://capacitacao2.ana.gov.br/conhecerh/bitstream/ana/2260/1/Apresenta%C3%A7%C3%A3o_ANA_MANEJO_DA_VINHA%C3%87A.pdf. Acesso em: 10 de dez de 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Modalidades tarifárias**, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/entenda-a-tarifa/modalidades-tarifarias#:~:text=Hor%C3%A1ria%20Verde%3A%20tarifas%20diferenciadas%20de,tarifa%20de%20demanda%20de%20pot%C3%Aancia>. Acesso em: 30 de maio de 2023.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Carvão mineral**, Parte III Fontes não renováveis, s.d. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par3_cap9.pdf. Acesso em: 25 de março de 2023.

ALCARDE, A. R. **Geração de energia elétrica**, EMBRAPA. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/pos-producao/processamento-da-cana-de-acucar/geracao-de-energia-eletrica>. Acesso em: 10 de maio de 2023.

ALMEIDA, E.; ROSA, A. C.; DIAS, F. C. L. S.; BRAZ, K. T. M.; LANA, L. T. C.; SANTO, O. C do E.; SACRAMENTO, C. B. **Energia solar fotovoltaica**: revisão bibliográfica. 2016. Revista FUMEC, v.1 n.2. Disponível em: <http://revista.fumec.br/index.php/eol/article/view/3574>. Acesso em: 18 de abril de 2023.

ALVARENGA, R. P.; QUEIROZ, T.R. **Caracterização dos aspectos e impactos econômicos, sociais e ambientais do setor sucroalcooleiro paulista**, 2008. XLVI Sociedade Brasileira de Economia, Administração e Sociologia Rural. Disponível em: <https://core.ac.uk/download/pdf/6494718.pdf>. Acesso em: 10 de dez de 2022.

ALVES, D. R.; ABDALLA, M. G.; LIMA, A. F. **Aplicação da torta de filtro como adubo em canaviais**, 2017. I ENCONTRO DE DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AGROINDUSTRIAIS. Disponível em: <http://dspace.uniube.br:8080/jspui/bitstream/123456789/877/1/APLICA%C3%87%C3%83O%20DA%20TORTA%20DE%20FILTRO%20COMO%20ADUBO%20EM%20CANAVIAIS.pdf>. Acesso em: 10 de dez de 2022.

ALVES, J. M. **Paradigma técnico e cogeração de energia com bagaço de cana de açúcar em Goiás**, 2006. An. 6. Enc. Energ. Meio Rural. Disponível em: http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=msc0000000022006000200021&script=sci_arttext. Acesso em: 10 de maio de 2023.

AMARAL, E. R do; AMARAL, T. R do. **Análise dos fatores que influenciam nas perdas de cargas em tubulações e acessórios hidráulicos**, 2016. Seminário de iniciação científica, 5. Disponível em: <https://ifnmg.edu.br/arquivos/2016/proppi/sic/resumos/64ddd471-17b3-4218-8c2f-02b86282f985.pdf>. Acesso em: 24 de maio de 2023.

ASSOCIAÇÃO DA INDÚSTRIA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA. **Conceitos e Tecnologias**, s.d. Disponível em: <https://www.cogen.com.br/cogeracao/conceito-e-tecnologias#:~:text=Cogera%C3%A7%C3%A3o%20%C3%A9%20a%20produ%C3%A7%C3%A3o%20simult%C3%A2nea,ou%20de%20biomassa%2C%20entre%20outros>. Acesso em: 24 de maio de 2023.

BENVENUTI, F.; ROSA, J.; SILVA, S.; VICTÓRIO, L. **Custo de plantio de cana alcança R\$12.500,00 por hectare**, 2022. Disponível em: <http://www.canaonline.com.br/conteudo/custo-de-plantio-de-cana-alcanca-r1250000-por-hectare.html#:~:text=H%C3%A1%20algumas%20safras%2C%20o%20custo,de%20R%24%2010%2C500%2Fhectare>. Acesso em: 30 de maio de 2023.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**, 2006. Viçosa. Disponível em: https://www.academia.edu/45657937/Manual_de_Iriga%C3%A7%C3%A3o_8_ed_Salassier_Bernardo_Editora_UFV. Acesso em: 09 de dez de 2022.

BEZERRA, F.D. **Energia Solar**, Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste. 2021. Ano 6, nº174. Disponível em: https://bnb.gov.br/s482-dspace/bitstream/123456789/834/1/2021_CDS_174.pdf. Acesso em: 18 de abril de 2023.

BISCARO, G.A. **Sistemas de irrigação por aspersão**, 2009. Disponível em: <https://repositorio.ufgd.edu.br/jspui/bitstream/prefix/2434/1/sistemas-de-irrigacao-por-aspersao.pdf>. Acesso em: 24 de maio de 2023.

BRITO J. O. **Carvão vegetal no Brasil: Gestões econômicas e ambientais**. 1990. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/YcDzd6q3pswcyzxFwJyNLfq/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 25 de março de 2023.

BUFON, V. B.; OLIVEIRA F. C.; PEREIRA R. M. **Sistema irrigado de produção de cana de açúcar no Brasil: métodos, recomendações e resposta produtiva**, cap. 26. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1137282/1/Bufon-Cap.-26.pdf>. Acesso em: 09 de dez de 2022.

CAIS, C. **Produtores investem em reforma do canavial na região noroeste paulista**, 2022. Disponível em: <https://www.diariodaregiao.com.br/economia/agronegocio/produtores-investem-em-reforma-do-canavial-na-regi-o-noroeste-paulista-1.986919>. Acesso em: 30 de maio de 2023.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE), 2023. **Balanco 2022**. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/pt/web/guest/-/geracao-de-energia-renovavel-bateu-recorde-em-2022-aponta-ccee>. Acesso em: 25 de junho de 2023.

CANA ONLINE. **O uso da torta de filtro como fertilizante ganha mais importância com o RenovaBio**, 2020. Disponível em: <http://www.canaonline.com.br/conteudo/o-uso-da-torta-de-filtro-como-fertilizante-ganha-mais-importancia-com-o-renovabio-.html>. Acesso em: 10 de dez de 2022.

CARDOSO, T. F. **Cogeração de energia através do bagaço de cana de açúcar: revisão de literatura**, 2011. Disponível em: <https://www.mta.ufscar.br/arquivos/publicacoes/sertaozinho-ii/monografia-tiago-fiori-cardoso.pdf>. Acesso em: 24 de maio de 2023.

CARVALHO, C. M de.; AZEVEDO, H. M de.; DANTAS NETO, J.; FARIAS, C. H de A.; SILVA, C. T. S da.; GOMES FILHO.; R. R. **Rendimento de açúcar e álcool da cana-de-açúcar submetida a diferentes níveis de irrigação**. 2009. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v. 4, núm. 1, pp. 72-77. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/1190/119018227012.pdf>. Acesso em: 03 de maio de 2023.

CARVALHO, J. F de. **The role of nuclear energy in Brazil**, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/ea/a/wyz7HtbndJ5cdXLchMSTNPm/?format=pdf&lang=en>. Acesso em: 17 de abril de 2023.

CAVALCANTI *et al.* **Levantamento dos resíduos oriundos da indústria de cana de açúcar e breve revisão sobre seus usos, aplicações e subprodutos**, 2019. 10 Fórum internacional de resíduos sólidos. Disponível em: <file:///C:/Users/Win10/OneDrive/Leonardo/TCC/Nova%20pasta/1408-Texto%20do%20artigo-5343-1-10-20191003.pdf>. Acesso em: 09 de dez de 2022.

CENTRO ESTADUAL PARA GERENCIAMENTO DE EMERGÊNCIA NUCLEAR. **A energia nuclear**., s.d. Disponível em: <http://defesacivil.rj.gov.br/index.php/a-energia-nuclear-cestgen#:~:text=A%20energia%20nuclear%20%C3%A9%20a,onde%20podemos%20obter%20esta%20energia>. Acesso em: 25 de março de 2023.

CETESB. **A produção mais limpa no setor sucroalcooleiro – Informações gerais**, 2002. Disponível em: <https://docplayer.com.br/69801-A-producao-mais-limpa-p-l-no-setor-sucroalcooleiro.html>. Acesso em: 09 de dez de 2022.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Boletim da safra de cana de açúcar – 1º Levantamento – safra 2023/2024**, 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/cana/boletim-da-safra-de-cana-de-acucar>. Acesso em: 09 de dez de 2022.

CORTEZ, L.A.B.; CRUZ, C. H de B.; SOUZA, G. M.; CANTARELLA, H.; SLUYS, M. A. V.; MACIEL FILHO, R. **PROÁLCOOL 40 anos de ciência e tecnologia para o etanol brasileiro**, São Paulo, Blucher, 2016, 224 p. Disponível em: <file:///C:/Users/Win10/OneDrive/Leonardo/TCC/Nova%20pasta/OpenAccess-Cortez-9788521210627.pdf>. Acesso em: 03 de maio de 2023.

- COSMO B. M. N.; GALERIANI, T. M.; NOVAKOSKI, F. P.; RICINI, B. M. **Carvão mineral**, 2020. vol. 4. Disponível em: <https://www.fcav.unesp.br/Home/ensino/departamentos/cienciasdaproducaoagricola/laboratorioidematologia-labmato/revistaagronomiabrasileira/rab202001.pdf>. Acesso em: 25 de março de 2023.
- COSTA, A. R da. **As relações hídricas em plantas vasculares**, 2001. Disponível em: <https://issuu.com/alexandracosta61/docs/relhid2014>. Acesso em: 18 de maio de 2023.
- CRUSCIOL, C.A.C. **Cultura da cana de açúcar**. Disponível em: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fitotecniatecnologiadealimentosesocioeconomia716/aula-1---cana---origem-e-economia-revisada-zoo.pdf>. Acesso em: 09 de dez de 2022.
- CUNHA E. A. A. C.; SIQUEIRA, J. A. C.; NOGUEIRA, C. E C.; DINIZ, A. M. **Aspectos históricos da energia eólica no Brasil e no mundo**. 2017. Revista brasileira de energia renováveis. Disponível em: <https://revistas.ufpr.br/rber/article/view/65759/38008>. Acesso em: 24 de abril de 2023.
- DALRI, A. B.; CRUZ, R. L.; GARCIA, C. J. B.; DUENHAS, L. H. **Irrigação por gotejamento subsuperficial na produção e qualidade de cana de açúcar**, 2008. Irriga, Botucatu v. 13, nº 1, p 1-1. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3340/2101>. Acesso em: 09 de dez de 2022.
- DEON, M. D.; GOMES, T. M. MELFI, A. J.; MONTES, C. R.; SILVA, E da. **Produtividade e qualidade da cana de açúcar irrigada com efluente de estação de tratamento de esgoto**. 2010. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília. v.45; nº 10. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/yNkLqxPTj48mWSsgrfGkfC/?lang=pt&format=pdf>. Acesso em: 09 de dezembro de 2022.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Fontes**, s.d. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/energia-eletrica/expansao-da-geracao/fontes>. Acesso em: 17 de abril de 2023.
- EOS CONSULTORES. **Cogeração nas companhias de saneamento**, s.d. Disponível em: <https://www.eosconsultores.com.br/cogeracao-no-saneamento-basico/>. Acesso em: 10 de maio de 2023.
- ESFERA BLOG. **Energia biomassa**. 2021. Disponível em: <https://blog.esferaenergia.com.br/fontes-de-energia/energia-biomassa>. Acesso em: 30 de abril de 2023.
- ESFERA ENERGIA. **Energia nuclear**. 2021. Disponível em: <https://blog.esferaenergia.com.br/fontes-de-energia/energia-nuclear>. Acesso em: 25 de março de 2023.
- FGS BRASIL. **Tubos PEAD FGS**, s.d. Disponível em: <https://fgsbrasil.com.br/wp-content/uploads/2020/04/CAT%C3%81LOGO-TUBO-PEAD-REDE-DE-INCENDIO.pdf>. Acesso em: 30 de maio de 2023.

FLAUSINIO, B. de F. P. G. **Produção de energia elétrica a partir do aproveitamento do bagaço de cana de açúcar gerado no setor sucroalcooleiro de minas gerais**, 2015.

Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-AB7FWF/1/tese_doutorado_cctn_bruna_flausinio.pdf)

AB7FWF/1/tese_doutorado_cctn_bruna_flausinio.pdf Acesso em: 24 de maio de 2023.

FONSECA, A. F da.; HERPIN, U.; PAULA, A. M de.; VICTÓRIA, R. L.; MELFI, A. J.

Agricultural use of treated sewage effluents: agronomic and environmental implications and perspectives for Brazil, 2007. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/sa/a/cNsPYxWWDNdnLbYR3qMJkXJ/?lang=en&format=pdf>.

Acesso em: 09 de dez de 2022.

FRAVET, P. R. F de.; SOARES, R. A. B.; LANA, R. M. Q.; LANA, A. M. Q;

KORNDÖRFER, G. H. **Efeito de doses de torta de filtro e modo de aplicação sobre a produtividade e qualidade tecnológica da soqueira de cana de açúcar**, 2010. Ciência e Agrotecnologia. v.34 n.3. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/cagro/a/ZVGWb5LTTWDZvM7zyC4NYwP/?format=pdf&lang=pt>.

Acesso em: 10 de dez de 2022.

G1 PARANÁ. **Bagaço da cana de açúcar é reaproveitado pela indústria no Paraná e vira energia, ração e plástico**, 2021. Disponível em: [https://g1.globo.com/pr/parana/caminhos-do-](https://g1.globo.com/pr/parana/caminhos-do-campo/noticia/2021/10/03/bagaco-da-cana-de-acucar-e-reaproveitado-pela-industria-no-parana-e-vira-energia-racao-e-plastico.ghml)

[campo/noticia/2021/10/03/bagaco-da-cana-de-acucar-e-reaproveitado-pela-industria-no-parana-e-vira-energia-racao-e-plastico.ghml](https://g1.globo.com/pr/parana/caminhos-do-campo/noticia/2021/10/03/bagaco-da-cana-de-acucar-e-reaproveitado-pela-industria-no-parana-e-vira-energia-racao-e-plastico.ghml). Acesso em: 10 de dez de 2022.

GOLDEMBERG, J. **Atualidade e perspectiva no uso de biomassa para geração de energia**. 2017. Revista Virtual Química, vol.9, No. 1, p.15-28. Disponível em:

<http://static.sites.sbq.org.br/rvq.sbq.org.br/pdf/v9n1a04.pdf>. Acesso em: 30 de abril de 2023.

GOLDEMBERG, J. **Biomassa e energia**. 2009. Quim. Nova, vol.32, No. 3, 582-587.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/qn/a/L6Pd3ZKdPqc4pZ4TQn5RyQy/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 30 de abril de 2023.

GOMES, A. P.; FERREIRA, J. A. F.; ALBUQUERQUE, L. F de.; SÜFFERT, T. **Carvão fóssil**, 1998. Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/ea/a/PwbGZGfvtBqkZnFsQfLFyBr/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 25 de março de 2023.

GUARDABASSI, P. M. **Sustentabilidade da biomassa como fonte de energia perspectiva para países em desenvolvimento**, 2006. Tese para obtenção do título de mestre. Disponível em: [https://energypedia.info/images/5/5d/PT-](https://energypedia.info/images/5/5d/PT-SUSTENTABILIDADE_DA_BIOMASSA_COMO_FONTE_DE_ENERGIA-Patricia_Maria_Guardabassi.pdf)

[SUSTENTABILIDADE_DA_BIOMASSA_COMO_FONTE_DE_ENERGIA-](https://energypedia.info/images/5/5d/PT-SUSTENTABILIDADE_DA_BIOMASSA_COMO_FONTE_DE_ENERGIA-Patricia_Maria_Guardabassi.pdf)

[Patricia_Maria_Guardabassi.pdf](https://energypedia.info/images/5/5d/PT-SUSTENTABILIDADE_DA_BIOMASSA_COMO_FONTE_DE_ENERGIA-Patricia_Maria_Guardabassi.pdf). Acesso em: 03 de maio de 2023.

INSOL ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA. **Qual o futuro da energia solar no Brasil?**

2022. Disponível em: [https://insolenergia.com.br/blog/qual-o-futuro-da-energia-solar-no-](https://insolenergia.com.br/blog/qual-o-futuro-da-energia-solar-no-brasil#:~:text=Estima%2Dse%20que%20mais%20de%20R%24%20%20bilh%C3%B5es%20ser%C3%A3o%20investidos,a%20diminui%C3%A7%C3%A3o%20do%20aquecimento%20global)

[brasil#:~:text=Estima%2Dse%20que%20mais%20de%20R%24%20%20bilh%C3%B5es%20ser%C3%A3o%20investidos,a%20diminui%C3%A7%C3%A3o%20do%20aquecimento%20global](https://insolenergia.com.br/blog/qual-o-futuro-da-energia-solar-no-brasil#:~:text=Estima%2Dse%20que%20mais%20de%20R%24%20%20bilh%C3%B5es%20ser%C3%A3o%20investidos,a%20diminui%C3%A7%C3%A3o%20do%20aquecimento%20global). Acesso em: 18 de abril de 2023.

INSTITUTO BRASILEIRO DE PETRÓLEO E GÁS. **Maiores consumidores de petróleo e lgn em 2021**, s.d. Disponível em: <https://www.ibp.org.br/observatorio-do-setor/snapshots/maiores-consumidores-de-petroleo-e-lgn-em-2020/>. Acesso em: 18 de março de 2023.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Emergency measures can quickly cut global oil demand by 2.7 million barrels a day, reducing the risk of a damaging supply crunch**, 2022. Disponível em: <https://www.iea.org/news/emergency-measures-can-quickly-cut-global-oil-demand-by-2-7-million-barrels-a-day-reducing-the-risk-of-a-damaging-supply-crunch>. Acesso em: 18 de março de 2023.

INVESTSP. **Cana de açúcar**. s.d. Disponível em: <https://www.investe.sp.gov.br/setores-de-negocios/agronegocios/cana-de-acucar/>. Acesso em: 09 de dez de 2022.

JARVIE, P. H; NEAL C.; WITHERS P.J.A; **Sewage effluent phosphorus: A greater risk to river eutrophication than agricultural phosphorus**. Science Direct. Vol. 360, 2006. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969705006066>. Acesso em: 09 de dez de 2022.

LEAL, D. A.; MARTINS, L. C.; NASCIMENTO, F. J.; MENDES, L da S.; CARVALHO, H de P. **Determinação da precipitação efetiva em uma bacia hidrográfica experimental**, 2017. VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2017/VIII-046.pdf>. Acesso em: 09 de dez de 2022.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. **Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão**. 2015. Rev. Virtual Quim. Vol. 7, nº 1 p. 126-143. Disponível em: <https://rvq-sub.sbq.org.br/index.php/rvq/article/view/664/508>. Acesso em: 18 de abril de 2023.

MANZONI, L. P.; BARROS, T. D. **Carvão vegetal**, EMBRAPA. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/tematicas/agroenergia/socioeconomia/florestas/carvao-vegetal>. Acesso em: 25 de março de 2023.

MARI JUNIOR, A.; MARI, A. G.; CABRAL, A. C.; FRIGO, E. P.; SANTOS, R. F. **Vantagens e desvantagens da energia hidráulica**, 2013. v.2, n.4, p 20-28. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/8941/6554>. Acesso em: 17 de abril de 2023.

MARIANO, J.B.; **Impactos ambientais do refino do petróleo**, Rio de Janeiro, 2001. VIII, 216p. (COPPE/UFRJ, M. Sc., Planejamento Energético, 2001). Disponível em: <http://antigo.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/jbmariano.pdf>. Acesso em: 18 de março de 2023.

MARTINS, S.S.S.; SILVA, M.P; AZEVEDO, M.O.; SILVA, V.P. **Produção de petróleo e impactos ambientais: algumas considerações**, vol. 6, 2015, pp 54-76 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil. Disponível em: <https://www.redalyc.org/pdf/4815/481547289005.pdf>. Acesso em: 18 de março de 2023.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **Irriga + Brasil**, 2022. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/arquivos/minuta-irriga-_19_08_2022_-consulta.pdf. Acesso em: 09 de dez de 2022.

NAÇÕES UNIDAS. **Causas e efeitos das mudanças climáticas**. Disponível em: <https://www.un.org/pt/climatechange/science/causes-effects-climate-change#CauseOne>. Acesso em: 18 de março de 2023.

NETAFIM. **Irrigação para cana**, s.d. Disponível em: <https://www.netafim.com.br/noticias/irrigacao-para-cana/>. Acesso em: 19 de maio de 2023.

NETO, J. B. O.; COSTA, A. J. D. **A Petrobrás e a exploração de Petróleo Offshore no Brasil: um approach evolucionário**, 2007. Rio de Janeiro, RBE. v. 61 n.1 / p 95-106. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbe/a/bbJ3zjwJBFyhkthrtMQrvbF/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 18 de março de 2023.

NETO, R. A. A.; SARMENTO, P. L.; FERREIRA JUNIOR, R. A.; SILVA, M. B. P.; ROCHA, A. E. Q.; TEODORO, I. **Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento em cana de açúcar**, 2015. Ciência Agrícola, Rio Largo v. 13, nº1. Disponível em: <https://www.seer.ufal.br/index.php/revistacienciaagricola/article/view/1318/2329>. Acesso em: 09 de dez de 2022.

NOCTULA. **10 países com maior capacidade eólica do mundo**. s.d. Disponível em: <http://noctula.pt/10-paises-com-maior-capacidade-eolica-do-mundo/#:~:text=Hoje%2C%20existem%20743%20GW%20de,de%20energia%20e%C3%B3lica%20do%20mundo>. Acesso em: 24 de abril de 2023.

NOVA CANA. **A produção de cana de açúcar no Brasil (e no mundo)**, s.d. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/producao-cana-de-acucar-brasil-e-mundo>. Acesso em: 19 de maio de 2023.

NOVA CANA. **Colheita da cana para produção de açúcar e etanol**, s.d. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/colheita-da-cana-producao-acucar-etanol>. Acesso em: 19 de maio de 2023.

NOVA CANA. **Usinas brasileiras produziram 34,94 kWh para cada tonelada de cana moída em 2019/20**, 2020. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/usinas-brasileiras-produziram-34-94-kwh-tonelada-cana-moida-2019-20-210720>. Acesso em: 10 de maio de 2023.

NOVA CANA. **Usinas podem produzir mais de 100 toneladas de cana por hectare**. Jornal Paraná; 2015. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/usinas-produzir-100-toneladas-cana-hectare-020215>. Acesso em: 30 de maio de 2023.

NOVACANA. **Ana conclui mapeamento da área com uso de água para cana-de-açúcar no Brasil**, 2019. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/ana-conclui-mapeamento-area-agua-cana-de-acucar-brasil-221119>. Acesso em: 18 de maio de 2023.

NOVACANA. **Cana de açúcar – Tudo sobre esta versátil planta**. s.d. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/cana-de-acucar>. Acesso em: 09 de dez de 2022.

NOVACANA. **Cogeração: como funciona a produção de energia elétrica numa usina sucroalcooleira**, s.d. Disponível em: <https://www.novacana.com/noticias/cogeracao-como-funciona-producao-energia-eletrica>. Acesso em: 10 de dez de 2022.

OBSERVATÓRIO DA CANA E BIOENERGIA. **Bioeletricidade em números**. 2022. Disponível em: <https://observatoriodacana.com.br/listagem.php?idMn=134>. Acesso em: 10 de maio de 2023.

OLIVEIRA, A. P. P de.; LIMA, E.; ANJOS, L. H. C dos.; ZONTA, E.; PEREIRA, M. G. **Sistema de colheita da cana de açúcar: conhecimento atual sobre modificações em atributos de solos de tabuleiro**. 2014. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.18, n.9, p. 939-947. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/YbvtWWcHLn9fsHpFYsnZxSd/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 19 de maio de 2023.

OLIVEIRA, D. A. de; **Evolução da expansão da agricultura irrigada por pivô central e da evapotranspiração incremental no noroeste paulista**, 2020. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/192202/oliveira_da_me_ilha.pdf?sequence=3&isAllowed=y. Acesso em: 09 de dez de 2022.

OLIVEIRA, E.C.A de.; OLIVEIRA, R. I de.; ANDRADE, B. M. T de.; FREIRE, F. J.; LIRA JUNIOR, M. A.; MACHADO, P. R. **Crescimento e acúmulo de matéria seca em variedades de cana-de-açúcar cultivadas sob irrigação plena**. 2010. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.14, n.9, p.951-960. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/vWwgQDLdVLhxvYwrVtZqsmC/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 de maio de 2023.

OLIVEIRA, M. de. **Vinhaça alternativa**, 2011, edição 186. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/vinha%C3%A7a-alternativa/>. Acesso em: 10 de dez de 2022.

PAULINO, A. F.; MEDINA, C de C.; ROBAINA, C. R. P.; LAURANI, R. F. **Produções agrícolas e industrial de cana de açúcar submetida a doses de vinhaça**, 2002. Seminário: Ciências Agrárias, v.23, n.2. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Cristiane-Medina/publication/279487370_Producoes_agricola_e_industrial_de_cana-de-acucar_submetida_a_doses_de_vinhaca/links/55b6894008ae092e9656ed3c/Producoes-agricola-e-industrial-de-cana-de-acucar-submetida-a-doses-de-vinhaca.pdf. Acesso em: 10 de dez de 2022.

PEDROSO, L. L. de A.; SILVA, F. F da.; SILVA, F. F da.; MELO, A. M.; ERTHAL JUNIOR, MILTON.; SHIMOYA, A. **Demandas atuais e futuras da biomassa e da energia renovável no Brasil e no mundo**. 2018. Brazilian Journal of Develop. Curitiba, v.4, n.5, Edição especial, p.1980-1996. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/231/192>. Acesso em: 30 de abril de 2023.

PEIXOTO, R. **Entenda em 5 tópicos os avanços e as pendências da COP 27, 2022.** Disponível em: <https://g1.globo.com/meio-ambiente/cop-27/noticia/2022/11/21/entenda-em-5-topicos-os-avancos-e-as-pendencias-da-cop-27.ghtml>. Acesso em: 18 de março de 2023.

PORTAL SOLAR. **Energia eólica: o que é, como funciona, vantagens e desvantagens, s.d.** Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/energia-eolica>. Acesso em: 24 de abril de 2023.

QUEIROZ, R. de.; GRASSI, P.; LAZZARE, K.; KOPPE, E.; TARTAS, B. R.; KEMERICH, P. D da C. **Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais.** 2013. v.13 n.13, p 2774-2784. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/reget/article/view/9124/pdf>. Acesso em: 17 de abril de 2023.

RAÍZEN. **Energia a partir da biomassa: entenda o que é e para que serve, 2022.** Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/energia-biomassa#:~:text=%C3%89%20a%20energia%20que%20vem,resultar%20em%20captura%20de%20carbono>. Acesso em: 03 de maio de 2023.

REVISTA CULTIVAR. **Fertirrigação em cana de açúcar.**, 2022. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/artigos/fertirrigacao-em-cana-de-acucar>. Acesso em: 09 de dez de 2022.

REVISTA CULTIVAR. **IAC orienta sobre os benefícios da irrigação da cana-de-açúcar,** 2020. Disponível em: <https://revistacultivar.com.br/noticias/iac-orienta-sobre-os-beneficios-da-irrigacao-na-cana-de-acucar>. Acesso em: 19 de maio de 2023.

REVISTA FAPESP. **Motores que não poluem.** 1998. Ed.32. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/motores-que-nao-poluem/>. Acesso em: 18 de março de 2023.

REVISTA FAPESP. **Propriedades do bagaço da cana de açúcar,** ed. 30, 1998. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/propriedades-do-bagaco-da-cana-de-acucar/>. Acesso em: 10 de dez de 2022.

RODRIGUES, A.; SANTOS, R. F.; AVACI, A. B.; ROSA, H. A.; CHAVES, L. I.; GASPARIN, E. **Estimativa do potencial de geração de energia elétrica a partir da vinhaça,** 2012. Acta Iguazu, Cascavel, v.1, n.2, p. 80-93. Disponível em: <https://e-revista.unioeste.br/index.php/actaiguazu/article/view/7040/5192>. Acesso em: 10 de maio de 2023.

ROMAO JÚNIOR, R. A. R. **Análise da viabilidade do aproveitamento da palha da cana de açúcar para cogeração de energia numa usina sucroalcooleira,** 2009. Disponível em: https://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/88868/romaojunior_ra_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 24 de maio de 2023.

RONQUIM, CARLOS CESAR. **Queimadas na colheita da cana de açúcar: impactos ambientais, sociais e econômicos.** EMBRAPA, 2010, documento 77. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/878010/1/Doc77.pdf>. Acesso em: 19 de maio de 2023.

ROSSETTO, R. **A cultura da cana da degradação à conservação**, 2004. Visão agrícola nº1. Disponível em: <https://www.esalq.usp.br/visaoagricola/sites/default/files/cana-impacto-ambiental01.pdf>. Acesso em: 10 de dez de 2022.

ROSSETTO, R.; SANTIAGO, A. D. **Plantio Cana**, EMBRAPA. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/cana/producao/manejo/plantio#:~:text=Para%20a%20cultura%20da%20cana,o%20plantio%20com%20sulcos%20largos>. Acesso em: 19 de maio de 2023.

SANTOS, G. H. F.; NASCIMENTO, R. S. do; ALVES, G. M. **Biomassa como energia renovável no Brasil**, 2017. Revista UNINGÁ, vol.29, n.2, pp.06-13. Disponível em: <https://revista.uninga.br/uningareviews/article/view/1966>. Acesso em: 30 de abril de 2023.

SANTOS, M. I. de S. dos.; BOSO, A. C. M. R.; GABRIEL, C. P. C. **Métodos de irrigação na produtividade da cana de açúcar**, 2017. Fórum Ambiental, Vol. 13, nº 03. Disponível em: <file:///C:/Users/Win10/OneDrive/Leonardo/TCC/Nova%20pasta/administrador,+9++-+ANA+CLAUDIA+MARASS%C3%81+ROZA+BOSO.pdf>. Acesso em: 09 de dez de 2022.

SANTOS, R. S.; BARBOSA, J. J. **Template para produção de trabalhos acadêmicos na Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Unesp**. Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia, Biblioteca, 2021. 40 p.

SENADO NOTÍCIAS. **Pré-sal**, s.d. Disponível em: <https://www12.senado.leg.br/noticias/entenda-o-assunto/pre-sal>. Acesso em: 18 de março de 2023.

SILVA, E. M da; AZEVEDO, J. A de. **Dimensionamento da lateral de irrigação do pivô-central**, Planaltina: EMBRAPA – CPAC, 1998, 54p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/101723/1/doc-71.pdf>. Acesso em: 30 de maio de 2023.

SILVA, J. P N da; SILVA M. R. N da. **Noções da cultura da cana de açúcar**, 2012. Disponível em: https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/413/2018/12/06_nocoos_cultura_cana_acucar.pdf. Acesso em: 09 de dez de 2022.

SILVA, L. G; **Torta de filtro e lodo de esgoto na composição de fertilizantes organominerais para a cultura da soja**, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/23151/5/TortaFiltroLodo.pdf>. Acesso em: 10 de dez de 2022.

SILVA, M. A. S da; GRIEBELER, N. P; BORGES, L. C; **Uso da vinhaça e impactos nas propriedades do solo e lençol freático**, 2007, R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental, v.11, n.1. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/vxTJ6yw3YP7bsCx7qC3Qcdj/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 10 de dez de 2022.

SOUTO, T. J. M. P.; COELHO, A. C. D.; HOLANDA, R. M da.; MORAES, A. S.; PAZ, Y. M.; SILVA, R. A. J da. **Viabilidade da bioeletricidade a partir da cana-de-açúcar**, 2018. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v.11, n.2, p. 402-429. Disponível em:

<https://periodicos.unicesumar.edu.br/index.php/rama/article/view/5098/3196>. Acesso em: 10 de maio de 2023.

SOUZA, Z. J de; AZEVEDO, P. F de. **Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas**, 2006. RER, vol. 44, nº2.

Disponível em:

<https://www.scielo.br/j/resr/a/yZ83qBfTGrrYNZ94Dkd9RwC/?format=pdf&lang=pt>. Acesso em: 24 de maio de 2023.

TATEMOTO, R. **Exploração do pré-sal completa dez anos e sofre com retrocessos do golpe**. 2018. Brasil de Fato. Disponível em:

<https://www.brasildefato.com.br/2018/09/11/exploracao-do-pre-sal-completa-dez-anos-e-sofre-com-retrocessos-do-golpe>. Acesso em: 18 de março de 2023.

TEIXEIRA, F. A; PIRES, A. V; NUNES P. V. **Bagaço de cana de açúcar na alimentação de bovinos**, 2007. Revista eletrônica de veterinária. Disponível em:

<https://www.redalyc.org/pdf/636/63612660008.pdf>. Acesso em: 10 de dez de 2022.

TERCIOTE, R. **A energia eólica e o meio ambiente**. 2002. Enc. Energ. Meio Rural.

Disponível em:

http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000100002&script=sci_arttext&tlng=pt. Acesso em: 24 de abril de 2023.

UOL MUNDO EDUCAÇÃO. **Gás natural**, s.d. Disponível em:

<https://mundoeducacao.uol.com.br/geografia/gas-natural.htm#:~:text=O%20g%C3%A1s%20natural%2C%20mesmo%20sendo,de%20gases%20poluentes%20na%20atmosfera>. Acesso em: 25 de março de 2023.

VELASCO, G. D. N. **Arborização viária X sistemas de distribuição de energia elétrica: avaliação dos custos, estudo das podas e levantamento de problemas fitotécnicos**. 2003.

Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003. DOI:10.11606/D.11.2003.tde-10092003-152108. Acesso em: 2023-06-19.

VISION SMARTER ENERGY SOLUTIONS. **Petróleo e derivados**. Disponível em:

<https://grupovision.com.br/petroleo-e-derivados/>. Acesso em: 18 de março de 2023.

ZAIAT, M; SILVEIRA, E. da. **Vinhaça para gerar energia**, 2015, edição 238. Disponível em: <https://revistapesquisa.fapesp.br/vinhaca-para-gerar-energia/>. Acesso em: 10 de dez de 2022.

ZANCANER, A. **Custo de produção de açúcar ao redor do mundo**, 2022. Disponível em:

<https://www.czapp.com/pt/analyst-insights/custo-de-producao-de-acucar-ao-redor-do-mundo/#:~:text=Brasil%3A%20USD%20350%2Fmt%20para%20a%C3%A7%C3%BAcar%20bruto&text=O%20custo%20agr%C3%ADcola%20no%20Brasil,custo%20de%20produ%C3%A7%C3%A3o%20do%20a%C3%A7%C3%BAcar>. Acesso em: 30 de maio de 2023