



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

ESTUDO DO POTENCIAL ENERGÉTICO DE RESÍDUOS AGROINDUSTRIAIS DO VALE DO SÃO FRANCISCO PARA PRODUÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE: LEVANTAMENTO REGIONAL E ANÁLISE DA VIABILIDADE ENERGÉTICA VIA CONVERSÃO POR BIOMASSA

STUDY OF THE ENERGY POTENTIAL OF AGROINDUSTRIAL WASTE FROM THE SÃO FRANCISCO VALLEY FOR GREEN HYDROGEN PRODUCTION: REGIONAL SURVEY AND ANALYSIS OF ENERGY VIA BIOMASS CONVERSION

Autores: Andressa Feitosa dos Santos¹, Rodrigo José de Carvalho Lopes²

¹UPE- Campus Petrolina – andressa.feitosas@upe.br; ²UFG – rodrigo_jose@discente.ufg.br

RESUMO

Este estudo adota uma abordagem quantitativa para analisar o potencial energético e a viabilidade técnica da utilização de resíduos agroindustriais oriundos da fruticultura irrigada no Vale do São Francisco para a produção de hidrogênio renovável (verde) através de rotas de conversão por biomassa. A pesquisa foi motivada pela crescente necessidade de descarbonização e pela busca por vetores energéticos limpos e estáveis. O Vale do São Francisco, notadamente a Região Administrativa Integrada de Desenvolvimento do Polo Petrolina e Juazeiro (RIDE), se destaca como um importante centro agro energético, possuindo abundantes recursos renováveis e uma intensa atividade de fruticultura irrigada. O levantamento utilizou dados agrícolas regionais para estimar a disponibilidade de resíduos, o potencial energético e a conversão em hidrogênio, considerando culturas como cana-de-açúcar, coco, manga e uva na tentativa de mostrar que o aproveitamento desses resíduos pode transformar o Vale em um importante polo de energia limpa e sustentável no Brasil.

Palavras-chave: Hidrogênio Verde; Resíduos Agroindustriais; Vale do São Francisco; Energia Renovável.

ABSTRACT

This study adopts a quantitative approach to analyze the energy potential and the technique for utilizing agro-industrial waste from irrigated fruit farming in the São Francisco Valley to produce renewable (green) hydrogen through biomass conversion. The research was motivated by the growing need for decarbonization and the search for clean energy sources and results. The São Francisco Valley, particularly the Integrated Administrative Region for the Development of the Petrolina and Juazeiro Hub (RIDE), stands out as an important agro-energy center, possessing abundant renewable resources and intense irrigated fruit farming activity. The study analyzed regional agricultural data to estimate waste availability, energy potential, and hydrogen conversion, considering crops such as sugarcane, coconut, mango, and grapes, in an attempt to demonstrate that the use of this waste can transform the Valley into a major clean and sustainable energy hub in Brazil.

Keywords: Green Hydrogen; Agroindustrial Waste; São Francisco Valley; Renewable Energy.



1 INTRODUÇÃO

A composição energética de uma nação representa a utilização dos recursos disponíveis para atender às demandas energéticas. No Brasil, a matriz energética é variada e inclui uma considerável contribuição de fontes renováveis, o que coloca o país em uma posição privilegiada no contexto da sustentabilidade energética. Em relação à geração de eletricidade, o Brasil tem uma configuração singular quando comparado ao cenário mundial, evidenciando um alto índice de fontes renováveis (Freitas; Gomes e Assis, 2022). Conforme o relatório integrado do Balanço Energético Nacional – BEN (EPE, 2024), aproximadamente 88,2% da eletricidade gerada no Brasil origina-se de fontes renováveis. A energia produzida por hidrelétricas lidera essa fração, embora outras fontes como a energia eólica, solar e de biomassa tenham ganhado importância recentemente. Essa característica coloca o Brasil em uma posição relevante nas discussões sobre a transição energética e a redução das mudanças climáticas (Souza; Silva e Santoyo, 2022).

A crescente necessidade por alternativas energéticas limpas e sustentáveis tem estimulado o progresso de inovações focadas na geração de hidrogênio verde, ou seja, o hidrogênio obtido a partir de fontes renováveis que apresentam baixa ou nenhuma liberação de gases de efeito estufa (Barbosa et al., 2025). O conceito de hidrogênio verde é utilizado para definir o hidrogênio criado por métodos que não geram CO₂, frequentemente ligado à eletrólise da água que utiliza fontes renováveis como energia (FGV ENERGIA, 2023).

A biomassa, formada por resíduos de atividades agrícolas, florestais e urbanos, é uma fonte natural que se renova rapidamente através do ciclo de crescimento das plantas, ao contrário dos combustíveis fósseis. Ao crescer, as plantas que originam a biomassa absorvem CO₂ da atmosfera através do processo de fotossíntese (Dias-Filho, 2006). Quando essa biomassa é transformada em hidrogênio, a quantidade de CO₂ liberada é igual à que foi capturada anteriormente. Isso gera um equilíbrio de carbono que é neutro ou bastante reduzido, tornando-a assim renovável e sustentável (Rangel e Oliveira, 2023).

Uma alternativa promissora entre as novas tecnologias em desenvolvimento é a geração de hidrogênio a partir de biomassa, especialmente em países com abundância de resíduos agrícolas, como o Brasil. Devido à sua composição orgânica, a biomassa pode ser transformada em hidrogênio utilizando diferentes técnicas, sejam elas termoquímicas, bioquímicas ou uma combinação de ambas. Essas abordagens utilizam resíduos provenientes da agroindústria, das florestas e até de áreas urbanas, promovendo não só a produção de energia sustentável, mas também a valorização de resíduos que, de outra forma, poderiam ter efeitos prejudiciais ao meio ambiente (SOARES, 2022).

O Vale do São Francisco se destaca no cenário brasileiro como um importante polo com abundantes recursos naturais e um grande potencial para a produção de energias renováveis. Sua posição geográfica, que apresenta uma forte incidência solar e regiões com ventos constantes, é ideal para a implementação de projetos de energia solar e eólica. Além disso, o Rio São Francisco, que é a principal fonte de água da área, facilita a geração de energia hidrelétrica e fornece o recurso essencial para o equilíbrio dos ecossistemas locais e para o fomento da agricultura (Rodrigues e Domingues, 2017). Essa combinação de elementos naturais coloca o Vale em uma situação vantajosa na transição energética do país, possibilitando o aproveitamento de uma matriz diversificada e com baixa emissão de carbono. A biomassa de resíduos agrícolas, por sua vez, apresenta-se como um recurso complementar, ligando a produção de energia ao gerenciamento sustentável dos resíduos da região.

A fruticultura irrigada é o pilar econômico e social do Vale do São Francisco, notadamente nas regiões de Petrolina (PE), Juazeiro (BA), Casa Nova (BA), Curaçá (BA), Sobradinho (BA) Lagoa Grande (PE), Orocó (PE) e Santa Maria da Boa Vista (PE).



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Graças à disponibilidade de água do Rio São Francisco, complementada por projetos de irrigação de grande escala, como o Projeto Senador Nilo Coelho, a região alcançou patamares de excelência na produção de frutas de clima tropical e temperado, como a uva, coco, manga e banana (Souza et al., 2001).

A alta produtividade e a qualidade dos frutos colhidos, muitas vezes em mais de um ciclo por ano devido às condições climáticas favoráveis, impulsionam não apenas o mercado interno, mas também as exportações, consolidando o Vale como um dos principais hubs agrícolas do Brasil (DINC, 2025). Essa intensa atividade, no entanto, exige um gerenciamento rigoroso dos recursos hídricos e energéticos, demandando a implementação de tecnologias de irrigação eficientes e o uso de energias renováveis na operação dos sistemas produtivos, garantindo a sustentabilidade a longo prazo.

Embora a matriz energética do Brasil seja principalmente composta por fontes renováveis, a dependência de recursos intermitentes (como hidrelétricas que variam conforme as chuvas e fontes eólicas/solares) e a necessidade urgente de reduzir as emissões de carbono em setores de difícil controle demandam a criação de vetores energéticos limpos e estáveis. No Vale do São Francisco, a alta atividade de agricultura irrigada produz grandes quantidades de resíduos agroindustriais que são subaproveitados ou geridos de forma ineficaz, representando tanto um problema ambiental quanto um custo para os produtores. Assim, o principal desafio é avaliar a viabilidade técnica e energética de transformar esses resíduos, que são uma fonte contínua e abundante de biomassa, em hidrogênio renovável (verde). A ausência de um estudo detalhado sobre a composição, a real disponibilidade e as melhores formas de conversão para esses resíduos locais impedem a valorização desse subproduto e a inclusão da região na cadeia de produção de hidrogênio com baixas emissões de carbono.

A pesquisa se justifica pela sua importância ambiental, econômica e estratégica na mudança energética do país. Do ponto de vista ambiental, ela apresenta uma abordagem de economia circular para lidar com a questão dos resíduos, transformando um resíduo (subprodutos da agricultura) em uma fonte de energia valiosa, ajudando assim a diminuir a liberação de gases de efeito estufa e promovendo a sustentabilidade da cadeia agroindustrial. No aspecto econômico, a pesquisa trará informações concretas sobre a capacidade de produção de hidrogênio e seus subprodutos a partir de uma fonte local e constante, o que pode chamar a atenção de investidores, diversificar a economia da região, gerar novas fontes de renda para os agricultores e estabelecer um novo centro de energia limpa no semiárido. Em termos estratégicos, ao concentrar-se na conversão através da biomassa, o estudo investiga um método de produção de hidrogênio que complementa a eletrólise (comumente considerada "verde"), tirando proveito da vantagem competitiva do Brasil em bioenergia e assegurando uma fonte de hidrogênio que seja estável e contínua, essencial para o futuro da descarbonização nos setores de transporte e industrial.

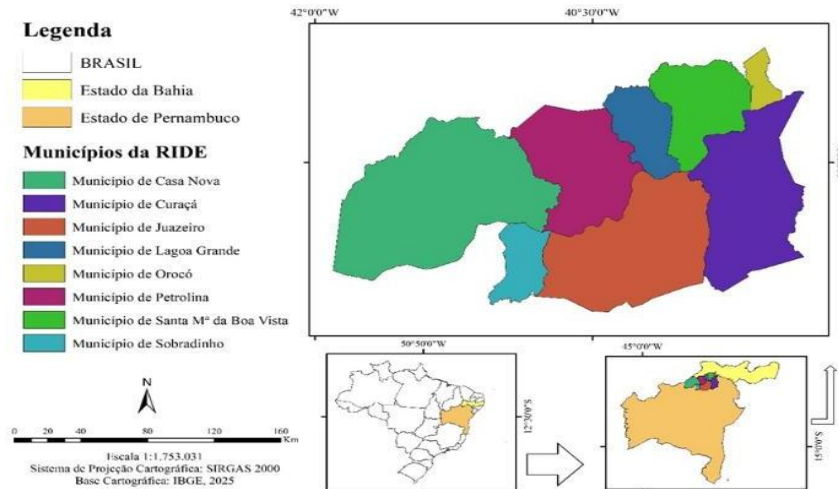
Diante disso, o principal objetivo deste estudo é analisar o potencial energético e a viabilidade técnica da utilização de resíduos agroindustriais oriundos da agricultura irrigada no Vale do São Francisco para a produção de hidrogênio renovável (verde) através de rotas de conversão por biomassa.

2 METODOLOGIA

Este estudo adota uma abordagem quantitativa para estimar o potencial energético dos resíduos agroindustriais na geração de hidrogênio verde, com base no IBGE (2025) sobre os dados da produção agrícola municipal da Região Administrativa Integrada de Desenvolvimento do Polo Petrolina e Juazeiro (RIDE). A seguir, são descritas as etapas metodológicas para o levantamento de dados, estimativas de biomassa disponível, cálculo de energia potencial e conversão em hidrogênio.



Figura 1 - Mapa de Localização da RIDE do Polo Petrolina e Juazeiro



Fonte: Autores, 2025

A Região Administrativa Integrada de Desenvolvimento do Polo Petrolina e Juazeiro teve sua constituição com base na Lei Complementar nº 113/2001 e também pelo Decreto nº 4.366/2002, estando dentro seu território os municípios; Lagoa Grande, Orocó e Santa Maria da Boa Vista de Pernambuco e do estado da Bahia Casa Nova, Curaçá e Sobradinho mostrado na Figura 1. Tem seu propósito articulação com base em ações que priorizem projetos de dinamização com conexão entre a união, estados e municípios (Oliveira e Pacheco, 2024)

2.2 Levantamento de Dados

Foi realizado um mapeamento das agroindústrias situadas na região do Vale do São Francisco, com foco naquelas que produzem significativas quantidades de resíduos, como: Cana-de-açúcar, Coco verde/maduro, Uva e Manga.

A coleta de dados incluiu a quantidade anual de matéria-prima processada (toneladas/ano), os tipos de resíduos gerados (bagaço, casca, palha, etc.), proporção de resíduos por tonelada de matéria-prima e a características físico-químicas dos resíduos (umidade e Poder Calorífico Inferior-PCI).

2.2.1 Estimativa da Quantidade de Biomassa

Para cada tipo de resíduo, foi estimado a quantidade anual de biomassa com base na fração gerada por tonelada de matéria-prima processada: $Biomassa\ (t/ano) = Matéria-prima\ (t/ano) \times Fr$

Onde:

Fr = Fator de resíduo (ex: 0,28 para bagaço de cana; 0,62 para casca de coco)

2.2.2 Cálculo do Potencial Energético

A energia contida nos resíduos foi estimada utilizando o Poder Calorífico Inferior (PCI) dos resíduos secos, expressos em MJ/kg (megajoules por quilograma) ou kWh/t (quilowatt-hora por tonelada): $Ebruta = Mb \times PCI$

Onde:

$Ebruta$ = Energia bruta contida nos resíduos (kWh/ano)

Mb = Massa da biomassa (t/ano)



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

PCI = Poder Calorífico Inferior (kWh/t)

Caso o PCI esteja em MJ/t (megajoule por tonelada), será feita a conversão: $1\text{MJ}=0,2778\text{kWh}$

2.2.3 Cálculo da Energia Útil

A energia efetivamente aproveitável foi estimada considerando a eficiência do processo de conversão energética:

$$E_{\text{útil}} = E_{\text{bruta}} \times \eta$$

Onde:

η = Eficiência do processo (valor adotado: 0,45 ou 45%).

2.2.4 Estimativa de Produção de Hidrogênio Verde

A quantidade de hidrogênio gerada foi estimada com base na produtividade média do processo de conversão da biomassa em H_2 (em kg de H_2 por tonelada de biomassa seca): $H_2 = Mb \times Rh$

Onde:

H_2 = Massa de hidrogênio produzida [kg/ano (quilograma por ano)]

Rh = Rendimento do processo {kg H_2 /t [quilogramas de hidrogênio (H_2) por tonelada] biomassa} Valor médio adotado: 90 kg H_2 /t

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tabela detalha a produção em toneladas (t), o potencial energético em Gigawatts-hora (GWh) e o potencial de produção de Hidrogênio (H_2) em milhares de toneladas (mil t) para quatro culturas (Cana-de-açúcar, Coco, Manga e Uva) ao longo dos anos de 2016, 2022, 2023 e 2024, podemos observar e entender vários pontos cruciais sobre o potencial agroindustrial da região:

A observação mais importante é a forte predominância da Cana-de-açúcar na composição de resíduos agroindustriais. O volume de Produção (t) continuamente demonstra a maior quantidade de produção isolada em todos os anos, sendo a principal fonte do total. Sua capacidade energética (GWh) se destaca claramente e, em 2024, proporcionou mais de 1.411 GWh, além de ser a que apresenta o maior potencial para a produção de Hidrogênio.

Para o aumento significativo da Produção Global e de H_2 , observou-se que há uma tendência clara de crescimento na produção de resíduos e no seu potencial energético e de Hidrogênio. Para o crescimento total da produção (t), o volume total de resíduos passou de 1.981.492 toneladas em 2016 para 3.936.103 toneladas em 2024, o que representa um aumento de quase 100% no volume de matéria-prima disponível para conversão energética. Para o crescimento total de H_2 (mil t), o potencial total de H_2 subiu de aproximadamente 38,9 mil toneladas em 2016 para 91,8 mil toneladas em 2024. Esse crescimento expressivo reforça a proposta de estudo onde a quantidade de resíduos agroindustriais está se tornando um fator cada vez mais relevante na produção de hidrogênio renovável.

Para a relevância crescente da Manga e Uva (Fruticultura), embora a Cana-de-açúcar domine em volume, o potencial energético e de H_2 da fruticultura (Manga e Uva) é notável e crescente. Para a Manga: entre 2016 e 2024, a produção da Manga saltou de 15.866 t para 997.828 t. Este aumento na produção de resíduos de manga em 2024 a coloca com um potencial de H_2 (31.032 mil t) que supera o da Cana-de-açúcar (28.270 mil t), de acordo com os dados de 2024. Isso pode indicar uma eficiência de conversão energética por tonelada mais alta ou um uso otimizado do resíduo desta cultura específica. Para a Uva: também



mostra um crescimento substancial em 2024, alcançando um potencial de H₂ de 28.164 mil t, comparável ao da Cana-de-açúcar.

Figura 2 – Tabela de resultados obtidos através dos cálculos

Ano	Cultura	Produção (t)	Energia (GWh)	H2 (mil t)
2016	Cana-de-açúcar	1413898	1030,731642	20642,9108
2016	Coco	120362	175,487796	3514,5704
2016	Manga	15866	24,687496	493,4326
2016	Uva	431366	713,047998	14278,2146
2022	Cana-de-açúcar	1724658	1257.2756820000002	25180.006800000003
2022	Coco	141503	206,311374	4131,8876
2022	Manga	860636	1339.1496160000002	26765.779599999998
2022	Uva	396267	655,029351	13116,4377
2023	Cana-de-açúcar	1922444	1401,461676	28067.682399999998
2023	Coco	162192	236,475936	4736,0064
2023	Manga	538322	837,629032	16741,8142
2023	Uva	631311	1043,557083	20896,3941
2024	Cana-de-açúcar	1936330	1411,58457	28270.417999999998
2024	Coco	151041	220,217778	4410,3972
2024	Manga	997828	1552,620368	31032.450800000002
2024	Uva	850904	1406,544312	28164.922400000003
2016	Total	1981492	1943,954932	38929,1284
2022	Total	3123064	3457,766023	69194,1117
2023	Total	3254269	3519,123727	70441,8971
2024	Total	3936103	4590,967028	91878,1884

Fonte: Autores, 2025

É importante ressaltar que a fruticultura (Manga e Uva) é o principal motor de crescimento no potencial de H₂ dos últimos anos, validando a escolha do Vale do São Francisco como foco da pesquisa. O Coco apresentou volumes de produção, energia e H₂ relativamente pequenos e estáveis ao longo do período, sendo o menor contribuinte entre as quatro culturas.

A tabela demonstra que o Vale do São Francisco possui uma base de resíduos agroindustriais robusta e em forte crescimento, com um potencial de geração de Hidrogênio que mais do que dobrou entre 2016 e 2024. Do ângulo da capacidade energética, as projeções de conversão demonstram que os resíduos examinados têm o potencial de produzir quantidades significativas de energia elétrica e térmica, ao mesmo tempo que permitem a fabricação de hidrogênio verde em uma escala regional. Essa situação destaca a relevância estratégica da região do Vale do São Francisco como um centro agroenergético, apto a unir cadeias produtivas do setor agrícola e industrial com novas tecnologias de transição energética.

4 CONCLUSÕES

Os valores obtidos são altamente relevantes para um Estudo do Potencial Energético de Resíduos Agroindustriais do Vale do São Francisco. A região apresenta condições favoráveis tanto em termos de disponibilidade de matéria-prima quanto em infraestrutura logística e vocação agroexportadora, o que pode viabilizar economicamente o aproveitamento energético e a inserção do hidrogênio verde na matriz energética nacional.



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Contudo, para transformar esse potencial em realidade, será necessário aprofundar a caracterização físico-química dos resíduos, avaliar a eficiência das rotas de conversão e estimar custos associados, de modo a consolidar a viabilidade técnica e econômica dos processos propostos.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, G. B.; ARAUJO, J. C.; INOCÊNCIO, L. S.; DELGADO, M. P.; OLIVEIRA, R. S.; SOARES, J. A. Panorama do Hidrogênio Verde no Brasil: Oportunidades e Desafios para o Futuro Energético. *Revista de Gestão e Secretariado - GeSec*, São José dos Pinhais, v. 16, n. 5, p. 01-15, 2025. DOI: 10.7769/gesec.v16i5.4969.

DIAS-FILHO, Moacyr Bernardino. *A fotossíntese e o aquecimento global*. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2006. p. : il. 21 cm. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 234). ISSN 1517-2201

DISTRITO DE IRRIGAÇÃO SENADOR NILO COELHO (DINC). Plano Operativo 2025. Petrolina: DINC, 2025. Disponível em: https://www.dinc.org.br/anexo/POA_2025_RES.pdf.

EPE. Matriz Energética: ano base 2024. [S. l.], 2024. Disponível em: https://www.epe.gov.br/_layouts/download.aspx?sourceURL=%2Fsites-pt%2Fpublicacoes-dados-abertos%2Fpublicacoes%2FPublicacoesArquivos%2Fpublicacao-885%2Ftopico-766%2FMatriz%2520ab2024.xlsx. Acesso em: 28 ago. 2025

FREITAS, R. D.; GOMES, K. R. M.; ASSIS, J. C. S. Análise do potencial da eficiência energética na indústria do Nordeste brasileiro. *RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar*, v. 3, n. 6, art. e3135, 2022. Disponível em: <https://recima21.com.br/recima21/article/view/3135/2282>. Acesso em: 28 ago. 2025.

FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS. FGV ENERGIA. Caderno FGV Energia de Hidrogênio de Baixo Carbono: a importância dos avanços em questões estruturantes. Rio de Janeiro: FGV Energia, 2023.

IBGE – Produção agrícola municipal: Produção de Cana de açúcar e coco da baía 2016 a 2024. Rio de Janeiro, 2025. Acesso em 25 de agosto de 2025 < <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?edicao=37886&t=o-que-e>>

OLIVEIRA, Lidiany Cavalcante de; PACHECO, Clecia Simone Gonçalves Rosa. A região administrativa integrada de desenvolvimento do polo Petrolina/PE –Juazeiro/BA, Brasil e as suas cidades criativas. *Diversitas Journal*, [S. l.], v. 9, n. 1, p. 408-425, 2024. DOI: 10.48017/dj.v9i1.2344. Disponível em: https://diversitasjournal.com.br/diversitas_journal/article/view/2344. Acesso em: 29 agosto. 2025.

RANGEL, Maurício C.; OLIVEIRA, Rogério B. V. de. Hidrogênio Carbono-Neutro: oportunidades para o agronegócio e para a transição energética. Brasília: Embrapa, 2023

RODRIGUES, Lineu Neiva; DOMINGUES, Antonio Félix (Ed.). *Agricultura irrigada: desafios e oportunidades para o desenvolvimento sustentável*. Brasília, DF: INOVAGRI, 2017.

SOUZA, Andrea de; SILVA, Christian Luiz da; SANTOYO, Alain Hernández. Hidroeletricidade no Estado do Paraná: uma análise da dimensão social da energia. *REJ - Revista de Estudos Jurídicos*, v. 11, n. 4, p. 153-169, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.21664/2238-8869.2022v11i4.p153-169>

SOARES, Itânia Pinheiro et al. Biogás e suas contribuições para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Brasília, DF: Embrapa Agroenergia, 2022. PDF (29 p.) : il. color. (Documentos / Embrapa Agroenergia, ISSN 2177-4439 ; 49).

SOUZA, G. H. F. de et al. Desempenho do Distrito de Irrigação Senador Nilo Coelho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, PB, v. 5, n. 2, p. 204-209, 2001.