

## **ARMAZENAMENTO EM CULTURAS ENERGÉTICAS: SOLUÇÃO PARA A IMPREVISIBILIDADE DA GERAÇÃO HIDRELÉTRICA**

Julian David Hunt  
Marcos Aurélio Vasconcelos de Freitas  
Amaro Olímpio Pereira Junior

*IVIG/COPPE/UFRJ*

### **RESUMO**

Devido à falta de armazenamento energético nas novas usinas hidrelétricas na região amazônica, usinas termelétricas serão necessárias para gerar eletricidade durante o período seco (maio-outubro). A geração elétrica com base na biomassa, especialmente eucalipto, pode ser usada para substituir o gás natural liquefeito, usado para gerar eletricidade durante a estação seca e como geração de emergência durante anos secos no Brasil. Este artigo apresenta um novo esquema de geração elétrica chamado “Armazenamento em Culturas Energéticas”. Neste esquema, durante um ano úmido, a termelétricidade não é necessária durante o período úmido, então parte da plantação de eucalipto não é consumida, permitindo que a plantação continue crescendo. Durante anos secos, a biomassa é consumida com mais intensidade para gerar termelétricidade durante todo o ano. Isto consumirá a biomassa que não foi utilizada posteriormente. O objetivo do esquema de armazenamento é diminuir a quantidade de área necessária para a plantação de eucalipto e remover a necessidade de estocagem de madeira. Ao invés de cortar as árvores de eucalipto depois de 5 anos e criar estoques para armazenar as madeiras, a idade de corte do cultivo de eucalipto teria uma flexibilidade de 4 a 8 anos, dependendo da necessidade de geração térmica do país, permitindo assim que a madeira seja armazenada na própria plantação. Estima-se a necessidade de geração de 10 GW de eucalipto com Armazenamento em Culturas de Energia para complementar o excesso de geração hidrelétrica durante o período chuvoso na Amazônia nos próximos 10 anos. O esquema de Armazenamento em Culturas Energéticas tem o potencial de aumentar o armazenamento energético do Brasil em 49,5%, ou seja 145 GWmed. Em um ano com baixa disponibilidade hídrica, este regime seria capaz de gerar 48 GWmed adicionais durante o período úmido, proveniente da biomassa armazenada. Seriam necessários 3 anos secos con-

secutivos para utilizar toda a biomassa armazenada nas culturas energéticas. A área plantada necessária para prestar o serviço energético acima é de 2,7 milhões de hectares, o que representa 36,8% do plantio de eucalipto já existente no Brasil. O artigo conclui que o gás natural é um investimento de risco no Brasil pois, se houver vários anos chuvosos consecutivos, a infraestrutura dedicada à geração de eletricidade com base a gás natural permanecerá sem uso. A plantação de biomassa, por outro lado, é um investimento flexível que pode variar de acordo com a necessidade de geração.

Palavras-chave: Armazenamento Energético, Biomassa, Eucalipto, Culturas Energéticas

### ABSTRACT

Due to lack of energy storage in new hydroelectric plants in the Amazon region, thermal power plants will be needed to generate electricity during the dry season (May to October). Electricity generation based on biomass, especially eucalyptus, can be used to replace liquefied natural gas used to generate electricity during the dry season and as emergency generation during dry years in Brazil. This article presents a new electric generation scheme called "Energy Crops Storage". In this scheme, during a wet year, thermoelectricity is not required in the wet season, then part of the eucalyptus plantation is not consumed allowing the plantation to continue growing. During dry years, the biomass is consumed more intensively to generate thermoelectric throughout the year. This consumes the biomass that was not used previously. The purpose of the storage scheme is to reduce the amount of area required for the plantation eucalyptus and remove the need for timber storage. Rather than cutting the trees of eucalyptus after 5 years and create inventory to store the woods, the eucalyptus plantations would be allowed to grow from 4 to 8 years, depending on the need for thermal generation in the country, allowing the timber to be stored on the crop itself. It is estimated the need to generate 10 GW with eucalyptus Energy Crops Storage to complement the excess hydroelectric generation during the rainy season in the Amazon over the next 10 years. This scheme has the potential to increase the Brazilian energy storage potential in 49.5%, or 145 GWmed. In a year with low water availability, this regime would be able to generate 48 additional GWmed during the wet season, from the stored biomass. It would take three consecutive dry years to use all biomass stored in the energy crops. The planted area needed to provide the energy service above is 2.7 million hectares, representing 36.8% of the existing eucalyptus plantations in Brazil. The article concludes that natural gas is a risky investment in Brazil because, if there are multiple consecutive wet years, the expensive infrastructure

dedicated to generate electricity with natural gas base remains unused. The biomass with Energy Crop Storage, on the other hand, is a flexible investment that can vary according to the need for electricity generation.

Keywords: Energy Storage, Biomass, Eucalyptus, Energy Crops

## 1. INTRODUÇÃO

O Sudeste brasileiro está passando por uma de suas piores estiagens [1]. Isso está colocando em questão a credibilidade de sua geração hidrelétrica e sua capacidade de armazenamento energético. Ao longo dos próximos 10 anos, a capacidade de armazenamento energético aumentará somente 0,91% à medida que a demanda por eletricidade aumentará 44,9%, com a maior parte do novo potencial de geração elétrica vindo de hidrelétricas na Amazônia, que geram maior parte de sua eletricidade durante o período úmido [2]. Outras alternativas, como eólica e solar, irão complementar parcialmente a geração de eletricidade no Brasil. O potencial eólico brasileiro começou a ser explorado e atingirá 24 GW até 2024.

A geração elétrica baseada em gás natural no Brasil teve um custo estimado em R\$ 3,7 milhões/MW e um custo operacional de R\$ 230/MWh em 2014 [3] para cobrir a infraestrutura para explorar, extrair, processar e transportar o gás para a usina e gerar eletricidade com o gás. Este investimento deverá cobrir o pior cenário, a fim de garantir que haverá geração de eletricidade suficiente em caso de um ano seco no Brasil.

Considerando os últimos anos, esta infraestrutura foi usada em apenas cerca de 28% de sua capacidade, de acordo com a Figura 1. Este não é um investimento adequado, pois a capacidade é subutilizada. Além disso, aumenta o custo do gás natural para as indústrias, residências e comércio, com o intuito de garantir o fornecimento de gás natural para geração de eletricidade. O programa prioritário das termicas foi criado especialmente para subsidiar o gás natural para geração de eletricidade e tem sido amplamente criticado [4]

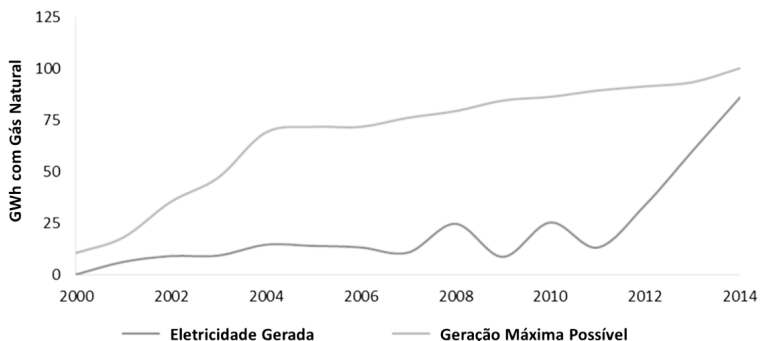


Figura 1 – Eletricidade gerada e geração máxima a partir de gás natural no Brasil [2, 5]

A geração elétrica com base em plantações de eucalipto teve um custo de capital estimado em R\$ 1 milhões/MW e custo operacional flexível de R\$ 154/MWh em 2014 para cobrir o custo das mudas, plantio, terra, colheita, corte, transporte de biomassa, gaseificação ou queima da biomassa e geração elétrica [6]. Um dos benefícios dessa rota tecnológica é que os custos de operação variam com a necessidade de gerar eletricidade. Por exemplo, caso haja 4 anos chuvosos seguidos, o investimento na plantação de eucalipto diminuirá e as árvores continuarão crescendo, reduzindo a necessidade de investir durante futuros anos secos.

Este artigo propõe uma solução para a falta de potencial de armazenamento hidrelétrico brasileiro por meio de plantações de eucalipto em larga escala, garantindo a geração elétrica durante anos seguidos de estiagem.

### 1.1 Geração de Eletricidade no Brasil nas Próximas Décadas

O Brasil gera cerca de 70% da sua eletricidade a partir da energia hídrica e ainda tem um enorme potencial de energia hidrelétrica a ser desenvolvida na Bacia Amazônica. No entanto, devido à sua geologia plana, grandes reservatórios de armazenamento não podem ser construídos na região amazônica [7]. Desta forma, essas hidrelétricas só gerarão eletricidade durante a estação chuvosa (novembro-abril).

Estudos atuais propõem o desenvolvimento do potencial hidrelétrico Amazônico com a inclusão de Centrais Hidrelétricas Reversíveis Sazonais, nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste para armazenar energia durante os seis meses de chuva e gerar eletricidade durante os seis meses de estiagem [8]. As regiões Sul, Sudeste e Nordeste do Brasil tem a geologia apropriada para a construção de reservatórios de armazenamento e podem ser usadas para armazenar a energia gerada na Amazônia. A Figura 2 mostra como Centrais Hidrelétricas Rever-

síveis podem ser usadas para permitir que o Brasil desenvolva o potencial hidrelétrico Amazônico, por meio do aumento da capacidade de armazenamento nas outras regiões.

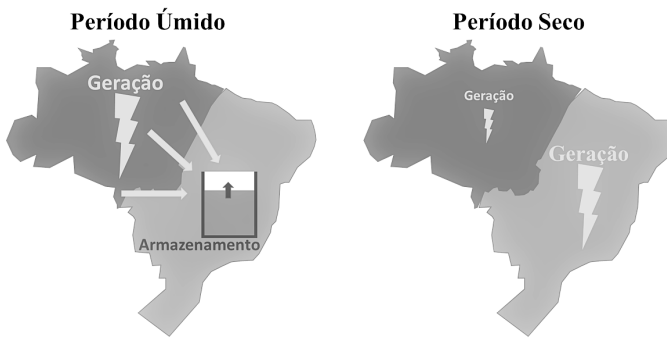


Figura 2 – Aproveitamento hidrelétrico na Amazônia com o armazenamento energético nas outras bacias [8]

A solução atual Governamental para este dilema é gerar termeletricidade durante os seis meses de seca, especialmente com usinas movidas a gás natural liquefeito. Além disso, em caso de um ano excepcionalmente seco, como em 2013, 2014 e 2015, as usinas operariam como carga de base durante todo o ano para substituir a falta de energia hidrelétrica.

A solução proposta neste artigo é semelhante ao da solução Governamental. No entanto, em vez da geração elétrica com gás natural liquefeito, a termeletricidade seria gerada com plantações de eucalipto usando o esquema de Armazenamento em Culturas Energéticas.

## 2. ARMAZENAMENTO EM CULTURAS ENERGÉTICAS (ACE)

O Armazenamento em Culturas Energéticas é um conceito que permite o armazenamento de longo prazo em culturas energéticas, com a intenção de fornecer uma quantidade de termeletricidade variável durante os anos. Este é um problema especialmente em países que têm um percentual grande de geração hidrelétrica imprevisível e para os países onde o consumo de eletricidade varia consideravelmente com o clima.

Devido à sua flexibilidade de mercado (madeira para construção, energia, celulose), alta produtividade (mais de 60 m<sup>3</sup>/ha/ano [9]) e características físicas (densidade da madeira e poder calorífico), o eucalipto é o mais utilizado para a implementação de florestas para fins energéticos. O gênero tem sido aclamado como uma das melhores opções para a produção de energia devido principalmente, ao grande

número de espécies, o que permite uma ampla distribuição ecológica, favorecendo a sua introdução em diversas regiões com solos diferentes e condições climáticas variadas [10]. Nesse artigo são consideradas duas espécies (*Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*), um espaçamento de 3m x 0,5m e localização no Município de Três Lagoas [11].

O principal conceito por trás de esquemas de Armazenamento em Culturas Energéticas é deixar as plantações de eucaliptos crescerem quando há menos necessidade de gerar termelétricidade e consumir o eucalipto quando há urgência na geração de eletricidade. Por exemplo, em um ano com boas chuvas, durante o período úmido as termelétricas não gerariam, resultando em um fator de capacidade anual de 50%. Isso permitiria que as plantações de eucalipto continuassem crescendo, armazenando biomassa para o futuro. Em um ano seco, a usina operaria em plena capacidade durante todo o ano, o que poderia resultar em um fator de capacidade de cerca de 90%. Desta forma, a biomassa, previamente armazenada, seria consumida. Este esquema é explicado na Figura 3.

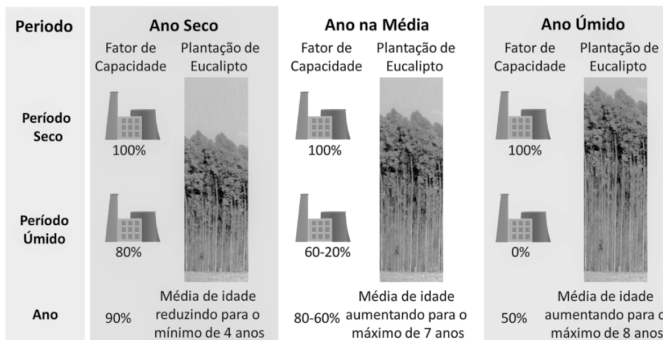


Figura 3 – Esquema de Armazenamento em Cultura Energética com o objetivo de resolver problemas causados pela imprevisibilidade na geração hidrelétrica no Brasil

## 2.1 Armazenamento em Culturas Energéticas no Brasil

Culturas energéticas baseadas em eucalipto no Brasil, cujo interesse de produção é a maior tonelagem de madeira por hectare, tem sua idade de corte alcançada quando o Incremento Corrente Anual (ICA) de massa seca é igual ao valor do Incremento Médio Anual (IMA), como apresentado na Figura 4. Nesta idade, o eucalipto atinge o valor máximo de produção de madeira por unidade de área por ano [11], o que corresponde ao quinto ano na Figura 4. Normalmente, este é o ano em que as árvores são cortadas.

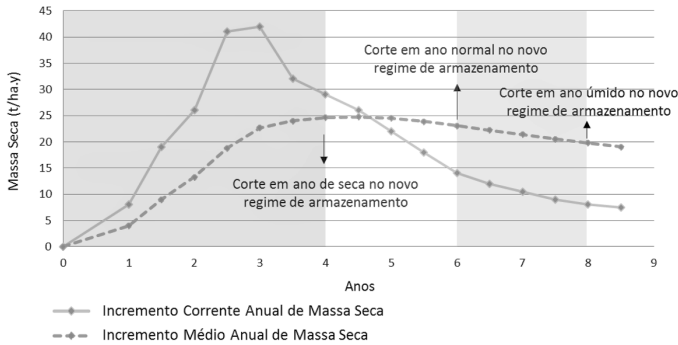


Figura 4 – Incremento corrente anual e incremento médio anual de massa seca por hectare de plantações de eucalipto [11]

Este artigo propõe um novo esquema para cortar os eucaliptos com a intenção de aumentar a capacidade de armazenamento de energia do Brasil. Deste modo, o ano de corte mudará de 5 anos para um intervalo de 4 a 8 anos, de acordo com a Figura 4. Durante anos úmidos, como a necessidade de gerar termelétricidade reduz, a plantação cresce, chegando a uma idade máxima de 8 anos. Durante anos secos, como há urgência na produção de eletricidade, a plantação é consumida até uma idade mínima de 4 anos de idade.

No caso de uma série de anos secos seguidos, quando há a necessidade de gerar energia elétrica a plena capacidade, as árvores mais antigas serão cortadas primeiro, e quando as árvores chegarem a um mínimo de 4 anos, a usina terá que reduzir sua capacidade para 50%. Isso ocorre porque não haverá mais biomassa armazenada nas plantações de eucalipto para manter a operação das termelétricas em 90% de sua capacidade.

Esse esquema permite que o país tenha um sistema para diminuir o impacto das variações anuais na geração hidrelétrica e também pode funcionar como um amortecedor para dar tempo ao país para criar medidas para solucionar a falta de energia.

As estimativas de custo para plantio de eucalipto estão referenciadas no Guia Prático de Manejo de Plantações de Eucalipto [12] e foram atualizadas para 2015 utilizando uma taxa de inflação de 6%. O custo de terra fértil para o plantio de eucalipto é estimado em R\$1.500 por hectare.

### 3. RESULTADOS: CUSTO DE ARMAZENAMENTO EM CULTURAS ENERGÉTICAS NO BRASIL

Assumindo um investimento inicial de R\$5.826,00 por hectare, e que uma tonelada seca de eucalipto é vendida por R\$100,00, o proprietário da fazenda terá um retorno médio sobre o seu investimento de 21,5% incluindo uma taxa de juros de 6% e aluguel da terra de

R\$1.500,00/ha. Este é um retorno razoável para o investimento. Um preço de R\$100,00 por tonelada seca de madeira resultará em um custo de combustível de 62 R\$/MWh na usina assumindo um LHV de 5,4 MWh/t e uma eficiência de geração elétrica de 30%.

Em um ano seco o eucalipto é cortado em 4 anos e o proprietário da plantação terá um retorno de 27,2% no investimento, que é melhor, comparando com o corte em 8 anos. Isto é conveniente para o operador da usina termelétrica, pois o agricultor tem maior interesse em cortar a biomassa após 4 anos, mas é o operador decidirá quando a madeira será cortada. Os proprietários das plantações terão o retorno do seu investimento garantido caso o corte seja feito com 4 ou 8 anos. Na Figura 5 estão representados os fluxos de caixa anual e médio por hectare em plantações de eucalipto.

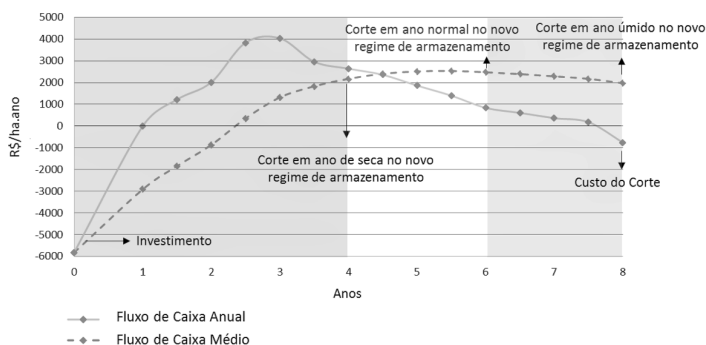


Figura 5 – Fluxo de caixa anual e médio por hectare em plantações de eucaliptos [11]

### 3.1 Aumentando o Potencial de Armazenamento Energético Brasileiro

As usinas hidrelétricas a serem construídas no lado direito do Rio Amazonas gerarão a maior parte de sua eletricidade durante dezembro a maio e tem 40GW de geração inventariados [13]. Assumindo que a geração diminui em 70% durante o período seco, haverá a necessidade de 28GW de geração termelétrica de junho a novembro.

Partindo do princípio de que existem 10GW de geração termelétrica com armazenamento em culturas de eucalipto para complementar parte do excesso de geração durante o período chuvoso na Amazônia, e que a idade de plantio do eucalipto chega a 8 anos, estima-se que haverá cerca de 145GWmed de biomassa armazenada para gerar 10GW com uma capacidade de 90% durante 3 anos secos. Isso é equivalente a 49,5% da capacidade de armazenamento energético brasileiro. Em um ano, este regime seria capaz de consumir 48GWmed de energia da biomassa armazenada. Isto é equivalente à



energia hidrelétrica armazenada no Reservatório de Furnas, o segundo maior reservatório de armazenamento energético do Brasil.

A área necessária para plantação de eucalipto para prestar os serviços de armazenamento energético mencionados acima é de 2,7 milhões de hectares. Isto é equivalente à 36,8% do plantio de eucalipto já existente no Brasil.

#### **4. CONCLUSÃO**

Este artigo apresentou um novo esquema para armazenar energia na forma de plantações de eucalipto. Durante os anos que termelétricidade não é necessária, a biomassa é acumulada em plantações de eucalipto. Esta biomassa é então usada para gerar eletricidade durante os anos quando há uma necessidade urgente para a geração de termelétricidade.

Este esquema combina com o setor energético brasileiro, porque o Brasil gera maior parte de sua eletricidade com energia hidrelétrica. Há duas temporadas fortemente marcadas, a seca (maio-outubro) e úmida (novembro-abril). Como as novas usinas na Amazônia não terão reservatórios de armazenamento, o Brasil terá que gerar termelétricidade durante o período seco. Além disso, há anos que a média de precipitação é baixa, reduzindo a geração de energia hidrelétrica no país.

O esquema de Armazenamento em Culturas de Energia pode resolver esse dilema. Durante anos com muita chuva, as usinas termelétricas só funcionarão no período seco e as plantações de eucalipto continuarão crescendo. Quando há um ano seco, em geral, as usinas termelétricas operarão a plena capacidade durante todo o ano, consumindo a biomassa estocada nas plantações de eucalipto.

#### **5. AGRADECIMENTOS**

Gostaríamos de agradecer a CAPES/BRASIL pela concessão de pesquisa como parte do programa Ciência sem Fronteiras e o Instituto Virtual Internacional de Mudanças Globais pela possibilidade de interagir com especialistas na área.

#### **REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

[1] COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS, Acompanhamento da Estiagem na Região Sudeste do Brasil, Brasília: CPRM, 2015.

[2] EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, “Plano Decenal de Expansão de Energia 2023,” EPE, Rio de Janeiro, 2014.

- [3] N. CASTRO, "Alternativas de suprimento para o setor termelétrico no Brasil," em *Visão 2030: Cenário, tendências e novos paradigmas do setor elétrico*, Rio Branco, Babilonia, 2015, pp. 137-167.
- [4] A. STRAPASSON, "A energia térmica e o paradoxo da eficiência energética," Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.
- [5] OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO, "Dados Relevantes - Operações do SIN," ONS, 2012. [Online]. Available: [http://www.ons.org.br/biblioteca\\_virtual/publicacoes\\_operacao\\_sin.aspx](http://www.ons.org.br/biblioteca_virtual/publicacoes_operacao_sin.aspx).
- [6] LOG, "Eucalipto: Realidade Energética em Alagoas," FIEA, Maceió, 2014.
- [7] J. D. HUNT, M. A. V. FREITAS E A. O. PEREIRA JUNIOR, "Enhanced-Pumped-Storage: Combining pumped-storage in a yearly storage cycle with dams in cascade in Brazil," *Energy*, vol. 78, pp. 513-523, 2014.
- [8] J. D. HUNT, M. A. V. FREITAS E A. O. PEREIRA JUNIOR, "Aumentando a Capacidade de Armazenamento Energético do Brasil," em IX Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, Florianópolis, 2014.
- [9] L. COUTO, I. NICHOLAS E L. WRIGHT, "Short Rotation Eucalypt Plantations for Energy in Brazil," IEA Bioenergy, Viçosa, 2011.
- [10] L. COUTO E M. D. MÜLLER, "Florestas Energéticas no Brasil," em *Biomassa para Energia*, São Paulo, UNICAMP, 2008, pp. 93-111.
- [11] I. P. SARTÓRIO, "Avaliação e Modelagem do Crescimento de Florestas Energéticas de Eucalipto Plantadas em Diferentes Densidades," Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- [12] C. F. WILCHEN, A. C. V. LIMA, T. K. R. DIAS, M. V. MASSON, P. J. FERREIRA FILHO E M. H. POGETTO, *Guia Prático de Manejo de Plantações de Eucalipto*, Botucatu: Fundação de Estudos e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2008.
- [13] FUNDACIÓN PROTEGER, INTERNATIONAL RIVERS AND ECO, "Dams in Amazona," 06 July 2015. [Online]. Available: <http://dams-info.org/en>.

