



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: www.ufpe.br/rbgfe



Viabilidade Econômica do Uso Energético de Lenha da Caatinga sob Manejo Sustentável

Claudemiro de Lima Júnior¹; Regina Lúcia Félix de Lima²; Bruno Guimarães Liberal³; Jorge Recarte Henriquez Guerrero⁴; Everardo Valadares de Sa Barretto Sampaio⁵, Rômulo Simões Cezar Menezes⁶

¹Prof. Dr. da Universidade de Pernambuco-UPE, Petrolina, Pernambuco, Brasil; ²Prof. Dr. da UPE, Petrolina, Pernambuco, Brasil, regina.aguiar@upe.br; ³Prof. Especialista, Faculdade de Ciências Aplicadas e Sociais de Petrolina, Petrolina, Pernambuco, Brasil, bruno@deltageologia.com.br; ⁴Prof. Dr. da Universidade Federal de Pernambuco-UFPE, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Recife, Pernambuco, Brasil, rjorgeh@gmail.com; ⁵Prof. Dr. da UFPE, Programa de Pós-Graduação em Tecnologias Energéticas e Nucleares-PROTEN, Recife, Pernambuco, Brasil, esampaio@ufpe.br; ⁶Prof. Dr. da UFPE-PROTEN, Recife, Pernambuco, Brasil, rmenezes@ufpe.br.

Artigo submetido em 04/02/2015 e aceito em 25/03/2015

RESUMO

Com o objetivo de avaliar a viabilidade econômica de aproveitamento energético da lenha de Caatinga sob manejo florestal sustentável foi feita uma análise econômica considerando o aproveitamento da lenha em diferentes rotas tecnológicas: comercialização direta da lenha (1), produção de carvão por fornos tradicionais (2) e por fornos cilíndricos (3), e a produção de energia em termelétricas com ciclo a vapor com turbinas de condensação (4) e ciclo combinado integrado a gaseificação da biomassa (5). Na análise econômica foram incluídos para cada rota os custos com: compra da área, implantação de manejo florestal sustentável, equipamentos e manutenção, tributos e impostos, valor presente líquido, taxa mínima de atratividade, período de retorno de investimento e taxa interna de retorno. As rotas de produção de carvão apresentaram maior viabilidade econômica, com o prazo de retorno de investimento variando de 2,4 anos (fornos cilíndricos) a 3 anos (fornos tradicionais). A análise de sensibilidade mostrou que é possível tornar as rotas de comercialização direta da lenha e de uso da lenha para geração de energia em termelétricas, com o aumento dos parâmetros: produtividade de lenha, preço de energia e preço de lenha, ou com a diminuição do custo de investimento inicial ou do preço da terra.

Palavras-chave: biomassa, carvão vegetal, geração termelétrica.

Economic Viability of the Energetic Use of the Wood from Caatinga Under Sustainable Forest Management

ABSTRACT

Aiming to evaluate the economic viability of energetic use of the wood from Caatinga under sustainable forest management was made an economic analysis considering the use of wood in different technological routes: direct commercialization of wood (1), coal production by traditional furnaces (2) and by cylindrical furnaces (3), production of energy in thermoelectric with steam cycle and condensing turbines (4) and combined cycle integrated the gasification of biomass (5). In economic analysis were included for each route costs with: purchase of the area, implementation of sustainable forest management, equipment and maintenance, tributes and taxes, current net value, minimum rate of the attractiveness, payback period of investment and internal rate of return. Routes coal production presented greater economic viability, with the investment payback period ranging from 2.4 years (cylindrical furnaces) and three years (traditional furnaces). Sensitivity analysis showed that it is possible make direct commercialization routes of wood and use of wood for energy generation in thermoelectric with increased wood productivity parameters: fuel productivity, price of the energy and fuel, or decrease in the cost of initial investment or of the price of land.

Keywords: Biomass, charcoal, thermal generation.

Introdução

O Nordeste do Brasil apresenta grande dependência energética dos recursos florestais, especialmente da Caatinga. A lenha da Caatinga é utilizada tanto para o

* E-mail para correspondência: claudemiro.lima@upe.br. (Lima Júnior, C.).

consumo doméstico quanto para o consumo industrial. Essa prática põe em risco esse bioma devido à extração da lenha que é feita geralmente de forma predatória. Além disso, a vegetação também é retirada para uso da área na atividade agropecuária. Em substituição à forma de exploração atual da biomassa, é preciso adotar um sistema de manejo florestal sustentável, no qual esteja

incluída a preservação dos recursos naturais e do meio físico (Brand et al. 2010).

O fornecimento de lenha na região pode ser feito de forma sustentável pelo uso de florestas energéticas, sejam elas nativas ou exóticas. A extração de lenha da Caatinga pode ser feita de forma planejada para permitir a recomposição de áreas exploradas, para isso é importante conhecer o potencial energético das espécies nativas. O uso de floresta cultivada de eucalipto com fins energéticos foi implantado na Chapada do Araripe sendo economicamente viável para atender tanto à demanda de lenha necessária para o polo gesso da região (Riegelhaupt & Pareyn, 2010) quanto às questões ambientais. O eucalipto tem poder calorífico igual a 3100 kcal/kg (Brasil, 2012a) e a sua cultura encontrou na região do Araripe condições edafoclimáticas favoráveis, como solos profundos e precipitações anuais em torno de 1000 mm, porém são atípicas no bioma com precipitações entre 300 e 1000 mm, variáveis no tempo e no espaço e solos com profundidades variáveis (Gariglio et al., 2010). A variabilidade das condições ambientais na Caatinga aponta para maior eficiência na produção de biomassa com fins energéticos, com o uso de espécies vegetais nativas que tenham rápido desenvolvimento e alto poder calorífico e/ou exóticas com essas características, mas que estejam adaptadas às condições prevalentes.

A extração da lenha da Caatinga seguindo um plano de manejo florestal sustentável (MFS) pode ser uma solução eficaz para conciliar o fornecimento de energia para o desenvolvimento da região e a diminuição do processo de degradação da vegetação do semiárido. Essa lenha pode ser usada para combustão direta e aproveitamento da energia térmica, mas também pode ser utilizada para a produção de carvão (Cruz & Nogueira, 2004). Outra possibilidade, ainda de conversão energética da lenha, é a geração de energia através de termelétricas, seja por ciclo de geração de vapor, ou através de ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa (Brand, 2010). A avaliação da viabilidade de exploração energética da Caatinga deve abranger, além do aspecto ecológico, o econômico e o tecnológico.

O estudo da viabilidade do aproveitamento da lenha da Caatinga para uso energético é realizado de forma sustentável e é um tema amplo com diferentes cenários de aproveitamento energético e envolve muitas variáveis, como a quantificação de biomassa da área a ser explorada, o poder calorífico das espécies locais e os custos e receitas das possíveis rotas de processamento da lenha.

Assim, o objetivo desse estudo foi avaliar a disponibilidade de biomassa em uma área de Caatinga para implantação de extração sustentável de lenha, determinação da qualidade energética de espécies da Caatinga e viabilidade econômica do aproveitamento energético da lenha de Caatinga sob manejo florestal sustentável. Admitimos que a lenha extraída tenha os seguintes destinos energéticos: comercialização direta, conversão em carvão ou uso como combustível para geração de energia termelétrica.

Material e Métodos

A análise da viabilidade econômica da exploração sustentável de lenha da Caatinga para uso energético foi realizada em três etapas sequenciais: estimativa da biomassa lenhosa de uma área de Caatinga localizada em Petrolina (PE); medição do poder calorífico das principais espécies arbóreas da Caatinga; avaliação econômica da exploração sustentável de lenha em uma área de Caatinga. As duas primeiras etapas forneceram os dados de produtividade de biomassa e de potencial energético para a estimativa econômica da exploração sustentável de lenha da Caatinga. A avaliação econômica foi feita considerando as seguintes rotas tecnológicas: extração de lenha para comercialização destinada à combustão direta, uso da lenha para produção de carvão em fornos tradicionais ou em fornos cilíndricos, e uso da lenha para a produção de energia em termelétricas com ciclo a vapor com turbinas de condensação ou com ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa.

A estimativa para exploração da lenha foi realizada considerando uma área com 2600 hectares, submetida ao Manejo Florestal Sustentável (MFS). O tempo de regeneração da vegetação utilizado nessa análise foi igual a 13 anos, informação obtida a partir de estudos anteriores nesse bioma (Sampaio et al., 1998). Nesta área, a vegetação é do tipo Caatinga hiperxerófila, com cobertura vegetal que varia de predominantemente arbustiva a arbustiva e arbórea. A precipitação média anual é igual a 500 mm, concentrada nos meses de fevereiro a abril. A temperatura média mensal é igual a 26°C, a umidade relativa varia entre 50 e 70%, a insolação média igual a 2.800 h.ano⁻¹ e a evaporação média igual a 2.000 mm.ano⁻¹ (Lima Júnior et al., 2014).

Considerou-se que a exploração da lenha tenha sido realizada em conformidade com o Código Florestal Brasileiro (Brasil, 2012b), que prevê a preservação de 20% da área total. Assim, foram reservados para preservação 520 ha (20%) da área total, restando para exploração de lenha uma área igual a 2080 ha, que foi utilizada para os cálculos relativos à exploração por manejo sustentável.

Estimativa da quantidade de biomassa na Caatinga

A quantificação da biomassa da área de Caatinga foi feita utilizando o modelo de regressão linear desenvolvido por Lima Júnior et al. (2014), ajustado com base na relação entre o Índice de Vegetação pela Diferença Normalizada (IVDN) e a estimativa da biomassa com uso de equações alométricas (1).

$$Biomassa (t. ha^{-1}) = 121,29.IVDN - 36,08 \quad (1)$$

O modelo linear para estimar a biomassa foi utilizado aplicando-se a todos os pixels da imagem de IVDN da cena (órbita/ponto) 217/66 do sensor LANDSAT 5 TM, com data de passagem em 7 de abril de 2011, resultando em uma imagem na qual cada pixel equivale a um valor de biomassa. Esta cena foi escolhida porque a data coincidiu com um período após as chuvas, e, conseqüentemente, com o rebrotamento das folhas verdes que apresentam melhor resposta ao IVDN.

Energia disponível da biomassa

A estimativa da Energia Disponível por Hectare (EDH) foi realizada utilizando-se dados de Poder Calorífico Inferior (PCI) de algumas espécies identificadas na área de estudo e da produção média de biomassa em tMS por hectare (tMS.ha⁻¹). O PCI das espécies foi calculado a partir do poder calorífico superior (PCS), que foi medido com bomba calorimétrica a volume constante. O PCI (kcal.kg⁻¹) foi calculado utilizando a Equação 2, onde H é a porcentagem média de hidrogênio (H) da madeira, que na madeira tem valor médio igual a 6% (Brand, 2010).

$$PCI = PCS - 600 \times \frac{9H}{100} \quad (2)$$

Análise da viabilidade econômica de uso de lenha da caatinga em diferentes rotas

A avaliação da viabilidade econômica foi realizada considerando a exploração de lenha da caatinga em uma área de 2600 ha, submetida ao MFS, em cinco cenários diferentes: 1) extração de lenha para comercialização direta; 2) uso de lenha para produção de carvão em fornos tradicionais; 3) uso de lenha para produção de carvão em fornos cilíndricos; 4) uso de lenha para geração termelétrica utilizando ciclo a vapor com turbinas de condensação; e 5) uso de lenha para geração termelétrica utilizando ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa.

A análise de cada cenário foi realizada incluindo custos com aquisição da área, implantação de plano de MFS, extração de lenha, instalação e manutenção de equipamentos específicos de cada rota de uso energético da lenha e, por fim, com os tributos e impostos também específicos para cada rota de uso da lenha. Os custos com aquisição da área, implantação de plano de manejo florestal sustentável e extração de lenha foram comuns a todos os cenários, enquanto os custos de instalação e manutenção de equipamentos e os encargos foram específicos para cada rota.

O custo da aquisição da área foi estimado tomando por base o preço do hectare de caatinga no segundo semestre de 2012, que variou de R\$ 250,00 a R\$ 300,00, para área de caatinga em propriedades afastadas dos centros urbanos, sem benfeitorias e com características de fisionomia e quantidade de biomassa semelhantes àquelas da área estudada.

A implantação do manejo sustentável em uma área de caatinga requer um investimento inicial que varia de 12 a 18 US\$.ha⁻¹, incluindo-se os custos de formulação e aprovação do plano de manejo e assistência técnica para o seu acompanhamento. Neste trabalho foram considerados o preço do hectare R\$ 250,00 e o custo de 18 US\$.ha⁻¹ para colocar a área em MFS (Riegelhaupt & Pareyn, 2010).

A extração anual da lenha nos lotes de 160 ha, com produção média de lenha igual a 30 t.ha⁻¹, requer investimento inicial de cerca de R\$ 150.000,00 destinados à construção de um galpão, aquisição de um caminhão de pequeno porte, compra de ferramentas para a retirada da lenha e pagamento de três funcionários.

Os tributos e encargos incluídos para os cálculos da análise de viabilidade econômica foram: a) Contribuição para o Financiamento da Seguridade Social (CONFINS)

- alíquota de 7,6%, sobre o faturamento mensal; b) Contribuição para o Programa de integração social (PIS) - alíquota de 1,65% sobre o faturamento mensal; c) Taxa de Fiscalização de Serviços de Energia Elétrica (TFSEE) - alíquota de 0,5% sobre a receita; d) Imposto de Renda de Pessoa Jurídica (IRPJ) - alíquota de 25% sobre a receita; e) Contribuição Social Sobre o Lucro Líquido (CSSL) - alíquota de 9%; f) Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços (ICMS) de transporte interestadual, intermunicipal e de comunicação - alíquota de 12% (Brasil, 2007).

Custos para produção de lenha para comercialização direta

A avaliação da extração e comercialização direta da lenha incluiu custos com a aquisição da área, implantação do MFS e extração de lenha. O preço médio nacional para comercialização da lenha nativa em 2011 foi de 8,1 US\$.m⁻³, de acordo com o Relatório Final do Balanço Energético Nacional de 2012, relativo ao ano de 2011 (Brasil, 2012a). Entretanto, os valores de lenha praticados atualmente em assentamentos no sertão pernambucano, que possuem plano de MFS, com assistência da Associação de Plantas do Nordeste (APNE), variam de R\$ 55,00 a 65,00 (US\$ 27,5 a 32,5). Este custo se refere ao preço da lenha no assentamento, sem os custos com transporte. A avaliação dessa rota considerou o valor de venda de uma tonelada de lenha igual a US\$ 27,50.

Custos para produção de carvão

A avaliação do uso da lenha para produção de carvão foi desenvolvida considerando os custos com a terra, a implantação do MFS, a extração da lenha, equipamentos, instalações e manutenção de dois sistemas de produção de carvão: o sistema tradicional, com uso de fornos tradicionais de alvenaria e o sistema de fornos cilíndricos verticais.

Os fornos tradicionais (rabo quente) possuem capacidade para 16 estereos de lenha com produção de 8 a 10 m³ de carvão vegetal, em um ciclo de até 10 dias, com rendimento gravimétrico variando de 25 a 30 %, com produção média de carvão igual a 2250 kg de carvão em 10 dias (Colombo et al., 2006). A análise do sistema tradicional de produção de carvão considerou o rendimento gravimétrico igual a 25 %, a produtividade mensal de um forno de 6750 kg de carvão vegetal, o custo da construção de um forno de R\$ 1530,00, a manutenção mensal de um forno de R\$ 50,00 (Colombo et al., 2006). Assim, considerando a produtividade de lenha da área de estudo, são necessários 15 fornos tradicionais para a conversão da lenha em carvão e cinco funcionários para operar os fornos.

Os fornos cilíndricos têm ciclos de carbonização de 8 a 10 horas, com rendimento gravimétrico na faixa de 35% a 40%, devido à requeima dos gases (Santos & Hatakeyama, 2012). A análise do sistema de produção com fornos cilíndricos considerou o rendimento gravimétrico igual a 0,35%, a produtividade mensal de um forno de 27 toneladas, o custo de um forno de R\$ 37.500, a taxa de manutenção de 5% do faturamento anual e o custo da energia elétrica de R\$ 5,96 para a produção de 1 m³ de carvão (Colombo et al., 2006).

Assim, para a área de estudo são necessários seis fornos cilíndricos verticais e oito funcionários para operação dos fornos.

O preço da tonelada de carvão vegetal comercializado considerado foi igual a R\$ 700, que é o valor médio dos preços praticados na região.

Custos para uso da lenha na geração termelétrica

A avaliação do uso da lenha para geração termelétrica considerou os custos com a terra, o MFS, a extração da lenha, os encargos e impostos, os equipamentos, as instalações e a manutenção para duas vias tecnológicas: ciclo a vapor com turbinas de condensação e ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa. Vale ressaltar a dificuldade em determinar esses valores de forma precisa, uma vez que esses custos variam em função da tecnologia adotada.

Os custos para uso de lenha da Caatinga para geração termelétrica com uso de ciclo a vapor com turbinas de condensação foram estimados considerando a capacidade de produção de biomassa da área de estudo. Assim, foi dimensionada uma usina termelétrica utilizando o ciclo a vapor com turbinas de condensação com capacidade de 1MW e eficiência de geração termelétrica de 23%. O custo de investimento de um projeto de geração de energia elétrica pode ser decomposto em custo direto e custo indireto. No direto, estão incluídos a aquisição do terreno, a realização das obras civis, a aquisição dos equipamentos, os custos da montagem e a subestação. No indireto, incluem-se os custos com acampamento e administração. O custo de investimento inicial com instalações e equipamentos, considerado como referência neste estudo, foi igual a 1100 US\$.kW⁻¹ (Brasil, 2007). Os custos de Operação e Manutenção (O&M) são classificados em fixos e variáveis, os custos fixos tiveram valor referencial médio igual a 40 US\$.kW⁻¹.ano⁻¹ e os variáveis igual a 4,3 US\$.MWh⁻¹ (Larson et al., 2001; Bain et al., 2003). O custo com Tarifas de Uso do Sistema de Transmissão (TUST) foi considerado igual a 2,50 US\$.MWh⁻¹ (Tolmasquim, 2005).

Os custos para uso de lenha da Caatinga para geração termelétrica com uso de ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa foram estimados com base em tecnologia que integra um sistema de gaseificação a um ciclo combinado com eficiência de geração termelétrica entre 36% e 45% (Bain et al., 2003). Considerando a eficiência de 36% e a disponibilidade energética de biomassa da área de estudo, é possível acionar uma usina de 1,5 MW. Isto representa um investimento inicial de R\$ 4.500.000,00. Os custos fixos de O&M foram iguais a 55 US\$.ano⁻¹ por kilowatt instalado e os custos variáveis de O&M iguais a 6×10^{-3} US\$.kWh⁻¹ gerados. O valor da TUST foi igual ao do ciclo a vapor com turbinas de condensação (Brasil, 2007; Bain et al., 2003).

O valor de venda de referência da energia gerada pelas termelétricas hipotética desse estudo, por MWh, foi igual a 103,06 R\$.MWh⁻¹, valor praticado em um leilão de energia elétrica recente (A5/2011), o qual contemplou dois projetos de geração termelétrica a partir da biomassa. Esse é o preço inicial a ser praticado e como os contratos firmados têm vigência de vinte

anos, e levando em conta que o preço futuro da energia elétrica possui grande variabilidade, a correção do valor pago por MWh gerado será corrigido pelo Índice de Preço ao Consumidor Amplo (IPCA).

A taxa de crescimento anual é estabelecida em contrato e, geralmente, o IPCA é utilizado como referência. A taxa utilizada, de 5,45%, equivale ao acumulado entre outubro de 2011 e outubro de 2012. Este mesmo índice foi utilizado para correção anual do valor fixado pelo leilão de energia.

Análise econômica

O Valor Presente Líquido (VPL) é o somatório dos valores presentes dos fluxos estimados de uma aplicação, calculados a partir de uma taxa de juros apropriada e seu período de duração (Equação 3). Os fluxos estimados podem ser positivos ou negativos, de acordo com as entradas ou saídas de caixa. A Taxa Mínima de Atratividade (TMA) fornecida na função representa o rendimento esperado do projeto. Caso seja positivo, o valor obtido no projeto pagará o investimento inicial, tornando-o viável.

$$VPL = CF_0 + \sum_{j=1}^n \frac{FC_j}{(1+i)^j} \quad (3)$$

Onde VPL = Valor Presente Líquido; CF₀ = Investimento Inicial; FC = Fluxo de Caixa do Período; i = TMA e j = Tempo.

O Período de Recuperação de Investimento (PRI), também conhecido como “pay-back”, representa o tempo necessário para recuperar o investimento realizado (Clemente, 2008). Esse indicador é medido em anos, indicando o tempo de retorno do investimento.

A TMA representa o custo de oportunidade do projeto, ou seja, a taxa de juros que deixa de ser obtida na melhor aplicação alternativa, quando há emprego de capital próprio (Kuhnen & Bauer, 2001). A TMA para esta análise foi considerada sobre 100% do Certificado de Depósito Interfinanceiro (CDI) de novembro de 2012 (9,14% ao ano), mais um cupom de 3% ao ano, totalizando uma taxa de 12,14% ao ano. Essa é a taxa de retorno para o capital próprio exigida por um investidor como prêmio/risco ao investir seu capital em determinado ativo.

A Taxa Interna de Retorno (TIR) é uma taxa de desconto hipotética que, quando aplicada a um fluxo de caixa, faz com que os valores atualizados das despesas sejam iguais aos também atualizados valores dos retornos dos investimentos. Quando comparada com a TMA, a TIR é um importante parâmetro para indicar a viabilidade de um projeto, se o valor da TIR for maior que o da TMA significa que o investimento é economicamente viável, se for menor, não é atrativo economicamente. Para o cálculo destes parâmetros é necessário calcular os valores de fluxo de caixa operacional ao longo dos 20 anos futuros, que foi o tempo de vida útil para um projeto deste porte. Para encontrar o valor da TIR é necessário calcular a taxa que satisfaz a Equação 4 (Souza & Clemente, 2000).

$$\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} - I_0 = 0 \quad (4)$$

Onde FC_t = valor presente das entradas de caixa; I_0 = investimento inicial; TIR = Taxa de Interna de Retorno; t = tempo de desconto de cada entrada de caixa; n = tempo de desconto do último fluxo de caixa.

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade foi realizada por meio de simulações, nas quais os parâmetros mais importantes de cada rota foram submetidos a uma variação de -50% e +50% do valor-base para verificar a influência desses parâmetros na variação dos resultados e nos indicadores de viabilidade, permitindo traçar diversos cenários na análise da viabilidade econômica, verificando a

viabilidade do projeto face às alterações. Os valores anuais de receitas, impostos, tributos, manutenção e outras taxas levantadas para os cinco cenários de uso energético da biomassa da Caatinga, consideraram que o dólar americano está cotado em R\$ 2,00.

Resultados e Discussão

A biomassa aérea da Caatinga, na área de estudo, apresentou variação na distribuição espacial, apresentando locais com baixa densidade de biomassa e outros com alta densidade e valores máximos de, até, 53 t.ha⁻¹. A biomassa aérea média, quantificada com uso do modelo matemático (Equação 1), foi igual a 33,7 tMS.ha⁻¹, com desvio padrão de 11,16, com os valores variando entre 1 e 52 tMS.ha⁻¹ (Figura 1).

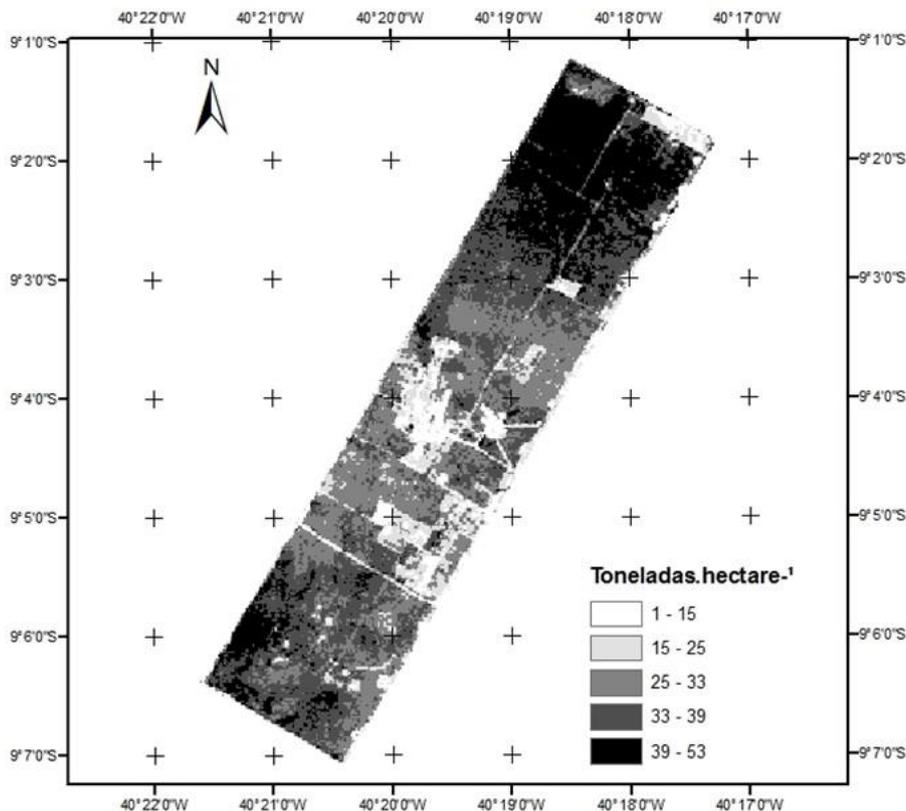


Figura 1. Estoques de biomassa vegetal (ton.ha-1) em uma área de Caatinga, em Petrolina-PE, estimados com uso do IVDN.

Na área de estudo ocorrem com maior frequência locais com biomassa entre 30 e 45 toneladas de matéria seca (tMS) (Figura 2a) e 54% das áreas apresentam biomassa superior a 32 tMS por hectare (Figura 2b). Os 10% de áreas com biomassa de até 5 t.ha⁻¹ equivalem aos pixels localizados próximos à estrada e aos pixels correspondentes às áreas abertas para cultivos experimentais.

Estes valores de produção de biomassa corroboram os indicados por Sampaio & Freitas (2008), os quais verificaram que na maioria das áreas de Caatinga, a biomassa aérea varia de 30 a 50 t.ha⁻¹. Entretanto, no bioma Caatinga existem locais com valores médios mais altos e locais com valores médios mais baixos que os da área estudada.

O valor médio de biomassa aérea da área estudada foi menor que o encontrado por Brand et al. (2009), que apresentou valor médio de biomassa aérea igual a 106 t.ha⁻¹ e também que o encontrado por Brandão et al. (2007), em uma área de Caatinga no Ceará, com biomassa variando de 270 a 334 ton.ha⁻¹, esses valores são altos para o bioma, mas justificados pelas características edafoclimáticas locais.

Por outro lado, a quantidade estimada de biomassa por hectare foi superior aos valores encontrados por Costa et al. (2009), que quantificaram a biomassa aérea em duas microrregiões do semiárido do Rio Grande do Norte, onde o valor médio de biomassa foi cerca de 9 t.ha⁻¹.

A quantificação final da lenha da biomassa foi determinada considerando que cerca de 10% da biomassa aérea da Caatinga é formada por folhas e galhos finos, com menos de 1 cm de diâmetro (Silva &

Sampaio, 2008), resultando em um estoque de lenha médio de 30 tMS.ha⁻¹ na área de estudo.

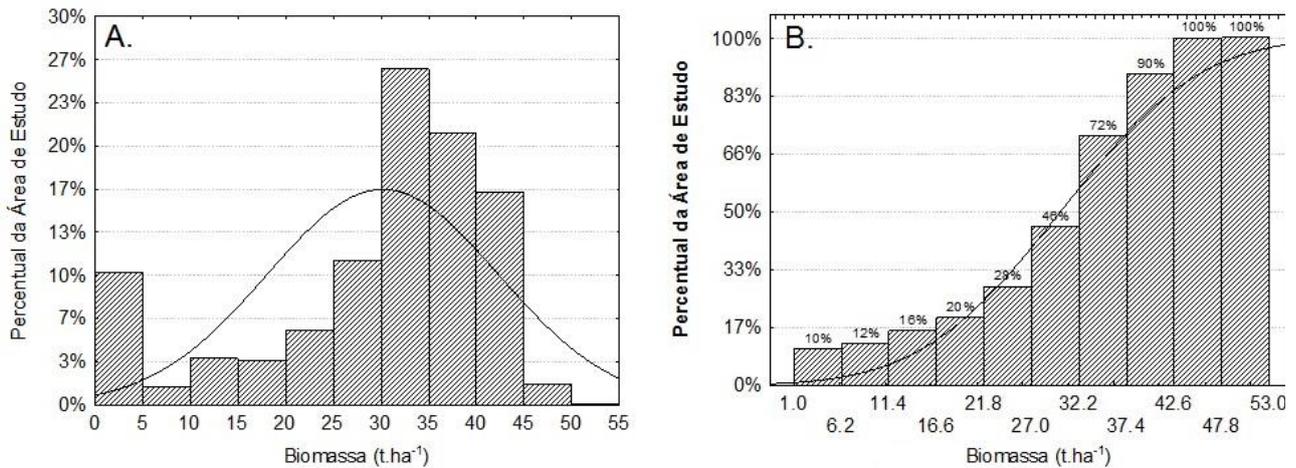


Figura 1. Distribuições de frequência simples (A) e acumulada (B) da quantidade de biomassa estimada em plantas da Caatinga em Petrolina-PE.

O PCI da lenha das sete espécies vegetais mais frequentes nas parcelas analisadas variou de 3648 a 4327 kcal.kg⁻¹, valores que correspondem à maniçoba e à jurema preta, respectivamente (Tabela 1). Estes valores são semelhantes aos encontrados por Lima et al. (1996) em uma avaliação sobre as características físico-mecânicas e energéticas de plantas da Caatinga. A jurema preta apresenta alta densidade e dominância com

maior valor de biomassa.ha⁻¹ na área de estudo, sendo um forte indicativo do valor energético da vegetação local (Lima Júnior et al., 2014). Para simplificação dos cálculos de conversão energética da biomassa foi considerado o PCI de 3910 kcal.kg⁻¹, média dos valores encontrados na área de estudo (Tabela 1).

Tabela 1. Espécies vegetais estabelecidas em áreas da Caatinga em Petrolina-PE e poder calorífico superior e inferior. PCS = Poder Calorífico Superior; PCI = Poder Calorífico Inferior.

| Nome popular | Nome científico | PCS | PCI |
|----------------|---|--------------------------|------|
| | | (kcal.kg ⁻¹) | |
| Jurema preta | <i>Mimosa tenuiflora</i> (Willd.) Poir. | 4651 | 4327 |
| Umburana | <i>Amburana cearensis</i> (Allemão) A.C.Sm. | 4456 | 4132 |
| Catingueira | <i>Caesalpinia pyramidalis</i> Tul. | 4190 | 3866 |
| Burra leiteira | <i>Sapium glandulosum</i> (L.) Morong | 4079 | 3755 |
| Baraúna | <i>Schinopsis glabra</i> Burkl. ex Mey. ou <i>Schinopsis brasiliensis</i> Engl. | 4070 | 3746 |
| Maniçoba | <i>Manihot pseudoglaziovii</i> Pax & K.Hoffm | 3972 | 3648 |

As espécies vegetais da Caatinga apresentam elevado PCI, com destaque para a *Mimosa tenuiflora*, com valor igual a 4327 kcal.kg⁻¹, e *Amburana cearensis*, com valor igual a 4132 kcal.kg⁻¹, valores bem mais elevados que a lenha de eucalipto, com PCI igual a 3100 kcal.kg⁻¹ (Brasil, 2012a).

Os valores anuais de receitas, impostos, tributos, manutenção, e outras taxas levantadas para os cinco cenários de uso energético da biomassa da Caatinga, foram estimados considerando o dólar americano cotado em R\$ 2,00. Os custos iniciais para a implantação das rotas de processamento, como aquisição de terra, implantação do manejo florestal sustentável, equipamentos e estrutura para extração de lenha estão

incluídos, não só na rota de produção de lenha, como também nas rotas de geração de energia e produção de carvão (Tabela 2).

O custo inicial para a extração de lenha de uma área de Caatinga de 2600 hectares, com 30 t.ha⁻¹ de biomassa, sob manejo florestal ficou em torno de R\$ 893.600,00 (Tabela 2). Caso a lenha seja destinada para a produção de carvão, este custo pode variar entre 0,9 e 1,1 milhões de reais, dependendo do tipo de forno que será utilizado. Entretanto, se a lenha for usada para a geração de energia em termelétricas, os custos totais poderão chegar a R\$ 5.393.600,00 com a instalação do ciclo combinado à gaseificação.

Tabela 2. Custos com investimento inicial para exploração energética da lenha da Caatinga em diferentes rotas energéticas. MFS = Manejo Florestal Sustentável.

| Investimentos | Rotas energéticas | | | | |
|----------------------------|-------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------|--------------------|
| | Produção de lenha (R\$) | Geração de energia (R\$) | | Produção de carvão (R\$) | |
| | | Ciclo a vapor condensado | Ciclo combinado à gaseificação | Fornos tradicionais | Fornos cilíndricos |
| Aquisição da terra | 650.000,00 | 650.000,00 | 650.000,00 | 650.000,00 | 650.000,00 |
| Implantação de MFS | 93.600,00 | 93.600,00 | 93.600,00 | 93.600,00 | 93.600,00 |
| Extração de lenha | 150.000,00 | 150.000,00 | 150.000,00 | 150.000,00 | 150.000,00 |
| Instalação e equipamentos. | — | 2.200.000,00 | 4.500.000,00 | 22.950,00 | 225.000,00 |
| Inicial total | 893.600,00 | 3.093.600,00 | 5.393.600,00 | 916.550,00 | 1.118.600,00 |

O lucro líquido da exploração energética da lenha, calculado considerando a incidência dos tributos e encargos sobre a receita bruta, variou de 70 a 470 mil reais, dependendo da rota de conversão energética, que corresponde a um lucro de 26 a 180 R\$.ha⁻¹ (Tabela 3). O lucro líquido da produção de lenha tem os menores

valores e os cenários que incluem a produção de carvão apresentam os maiores valores (Tabela 3).

A produção de carvão considerando as duas rotas tecnológicas avaliadas apresentaram os maiores valores de lucro líquido (300 a 470 mil reais), isto porque são processos com alto rendimento gravimétrico, custos iniciais relativamente baixos e produto final valorizado.

Tabela 3. Receitas e custos anuais para diferentes rotas energéticas de uso de lenha da caatinga sob manejo sustentável. O&M = Operação e Manutenção.

| Receitas/Custos anuais | Produção de lenha (R\$) | Geração de energia (R\$) | | Produção de carvão (R\$) | |
|-------------------------------|-------------------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|--------------------|
| | | Ciclo a vapor condensado | Ciclo combinado | Fornos tradicionais | Fornos cilíndricos |
| | | | | | |
| Impostos | - 57.420,00 | - 50.445,25 | - 78.957,79 | 182.700,00 | 255.780,00 |
| Receita líquida | 206.580,00 | 466.941,95 | 730.865,66 | 657.300,00 | 920.220,00 |
| Encargos da extração de lenha | - 100.400,00 | - 100.400,00 | - 100.400,00 | -100.400,00 | -100.400,00 |
| O&M fixos | — | - 40.000,00 | - 165.000,00 | -91.933,20 | -67.508,00 |
| O&M variáveis | — | - 10.040,50 | - 15.715,57 | — | -40.051,20 |
| Transmissão | — | - 12.550,63 | - 19.644,47 | — | — |
| Lucro operacional | 106.180,00 | 343.950,82 | 595.105,63 | 464.966,80 | 712.260,80 |
| IR/Contr. Social | - 36.101,20 | - 116.943,28 | - 202.335,91 | -158.088,71 | -242.168,67 |
| Lucro líquido | 70.078,80 | 227.007,54 | 392.769,71 | 306.878,09 | 470.092,13 |

O lucro líquido da geração de energia pelos processos termelétricos variou entre 200 e 400 mil reais (Tabela 3), valores intermediários entre a produção de carvão e de lenha, devido ao alto custo de instalação e aos baixos valores conseguidos em leilões de energia de biomassa, oneram a geração de energia elétrica. O alto investimento inicial nas termelétricas e o baixo valor de compra da energia elétrica definidos nos leilões de energia diminuem a atratividade da geração termelétrica acionada pela lenha da caatinga.

O lucro líquido da comercialização direta de lenha tem os menores valores e os cenários que incluem o uso da lenha para produção de carvão apresentamos maiores valores (Tabela 3). A TIR foi menor que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), indicando que o investimento nessas rotas não é economicamente atrativo, pois a TIR dessas rotas é superado pela TMA (Tabela 5).

Na análise de fluxo de caixa para o período de 20 anos (Tabela 4), o ano zero incorpora os custos iniciais de cada rota, sendo considerado um valor negativo. A partir do ano 1 é gerada a receita líquida, que nos anos seguintes é acrescida de juros pré-estabelecidos, neste caso o IPCA igual a 5,45%, apresentando biomassa superior a 32 tMS por hectare (Figura 2b). Os 10% de áreas com biomassa de até 5 t.ha⁻¹ equivalem aos pixels localizados próximos à estrada e aos pixels correspondentes às áreas abertas para cultivos experimentais.

Os valores de fluxo de caixa ao longo de 20 anos, tempo de vida útil considerado neste estudo, apontam para um valor negativo de VPL para a produção de lenha e também para a geração elétrica através de termelétricas (Tabela 5). A TIR foi menor que a TMA, indicando que o investimento nessas rotas não é economicamente atrativo, pois a TIR dessas rotas é superado pela TMA.

Tabela 4. Valores de fluxo de caixa anual para as cinco rotas energéticas de uso de lenha da Caatinga, sob manejo sustentável em um período de 20 anos.

| Ano | Produção de lenha (R\$) | Geração termelétrica (R\$) | | Produção de carvão vegetal (R\$) | |
|-----|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| | | Ciclo a vapor condensado | Ciclo combinado à gaseificação | Fornos tradicionais | Fornos cilíndricos |
| 0 | -893.600,00 | -3.093.600,00 | -5.393.600,00 | -916.550,00 | -1.118.600,00 |
| 1 | 70.078,80 | 227.007,54 | 392.769,71 | 306.878,09 | 470.092,13 |
| 2 | 73.898,09 | 239.379,45 | 414.175,66 | 323.602,94 | 495.712,15 |
| 3 | 77.925,54 | 252.425,63 | 436.748,24 | 341.239,30 | 522.728,46 |
| 4 | 82.172,48 | 266.182,83 | 460.551,01 | 359.836,85 | 551.217,16 |
| 5 | 86.650,88 | 280.689,79 | 485.651,04 | 379.447,95 | 581.258,50 |
| 6 | 91.373,36 | 295.987,38 | 512.119,03 | 400.127,87 | 612.937,09 |
| 7 | 96.353,20 | 312.118,70 | 540.029,51 | 421.934,84 | 646.342,16 |
| 8 | 101.604,45 | 329.129,17 | 569.461,12 | 444.930,29 | 681.567,80 |
| 9 | 107.141,90 | 347.066,70 | 600.496,75 | 469.178,99 | 718.713,25 |
| 10 | 112.981,13 | 365.981,84 | 633.223,83 | 494.749,24 | 757.883,12 |
| 11 | 119.138,60 | 385.927,85 | 667.734,53 | 521.713,07 | 799.187,75 |
| 12 | 125.631,66 | 406.960,92 | 704.126,06 | 550.146,44 | 842.743,48 |
| 13 | 132.478,58 | 429.140,29 | 742.500,93 | 580.129,42 | 888.673,00 |
| 14 | 139.698,66 | 452.528,43 | 782.967,23 | 611.746,47 | 937.105,68 |
| 15 | 147.312,24 | 477.191,23 | 825.638,94 | 645.086,65 | 988.177,94 |
| 16 | 155.340,76 | 503.198,16 | 870.636,26 | 680.243,88 | 1.042.033,64 |
| 17 | 163.806,83 | 530.622,46 | 918.085,94 | 717.317,17 | 1.098.824,47 |
| 18 | 172.734,30 | 559.541,38 | 968.121,62 | 756.410,95 | 1.158.710,41 |
| 19 | 182.148,32 | 590.036,38 | 1.020.884,25 | 797.635,35 | 1.221.860,13 |
| 20 | 192.075,40 | 622.193,37 | 1.076.522,44 | 841.106,48 | 1.288.451,50 |

Considerando a relação entre TIR e TMA, a produção de carvão em forno tradicional ou cilíndrico são as únicas rotas que têm valor de TIR maior que de TMA, tornando-se, assim, os investimentos economicamente mais atrativos. A produção de carvão em fornos cilíndricos verticais é, economicamente, mais viável que a produção em fornos tradicionais, mesmo com um custo de investimento inicial maior, e tem, ainda, a vantagem de ser uma alternativa sustentável, do ponto de vista ambiental, econômico e social (Colombo et al., 2006).

Os Prazos de Retorno de Investimento (PRI) para a produção de carvão em fornos cilíndricos (2,4 anos) e tradicionais (3 anos) (Tabela 5) mostraram um tempo superior ao encontrado por Colombo et al. (2006), ao comparar esses dois sistemas produtivos de carvão vegetal a partir da lenha de eucalipto e obter PRI de 1,45 para fornos cilíndricos e 0,74 para fornos tipo rabo quente.

O VPL das diferentes rotas de exploração energética da caatinga é indicativo da sua viabilidade comercial, sendo viáveis aqueles que apresentam números positivos, como é o caso da produção de carvão, seja em fornos tradicionais seja em fornos cilíndricos. A relação

entre a TMA e a TIR, neste caso a TMA é maior que a TIR, também indica que a produção de carvão é viável economicamente. O VPL e a relação entre a TIR e a TMA da comercialização direta de lenha e das rotas de geração de energia indicam a baixa viabilidade econômica destas rotas energéticas (Tabela 5). A análise de viabilidade econômica da produção de lenha para comercialização direta foi feita incluindo os custos da terra. Considerando que a produção de lenha seja feita pelo proprietário da terra, a TIR passa a 33,98 %, superior à TMA de 12,14 %, com VPL igual a R\$ 497.803,11 e período de retorno de investimento de 3,5 anos, tomando o investimento mais atrativo.

A análise de sensibilidade da comercialização direta da lenha permitiu verificar que a variação dos parâmetros produtividade de lenha, preço da lenha e custo da terra podem tornar positivo o VPL desta rota (Figura 3). Se o preço da terra baixar a 70% do valor considerado neste estudo, equivalendo a R\$175,00 o hectare, ou a produção de lenha e o preço da lenha aumentarem em 20% o VPL da comercialização direta da lenha será positivo, indicando a viabilidade econômica da rota

Tabela 5. Parâmetros da análise da viabilidade econômica do uso energético de lenha da Caatinga. TMA = Taxa Mínima de Atratividade; VPL = Valor Presente Líquido; TIR = Taxa Interna de Retorno; PRI = Prazos de Retorno de Investimento.

| Parâmetros | Produção de lenha (R\$) | Geração termelétrica (R\$) | | Produção de carvão vegetal (R\$) | |
|------------|-------------------------|----------------------------|--------------------------------|----------------------------------|--------------------|
| | | Ciclo à vapor condensado | Ciclo combinado à gaseificação | Fornos tradicionais | Fornos cilíndricos |
| TMA | 12,14% | 12,14% | 12,14% | 12,14% | 12,14% |
| VPL (R\$) | -152.196,89 | - 691.959,34 | - 1.238.267,91 | - 2.330.086,20 | - 3.854.769,49 |
| TIR | 9,80% | 9,01% | 8,92% | 38,79% | 47,42% |
| PRI | 12,75 | 13,63 | 13,73 | 2,99 | 2,38 |

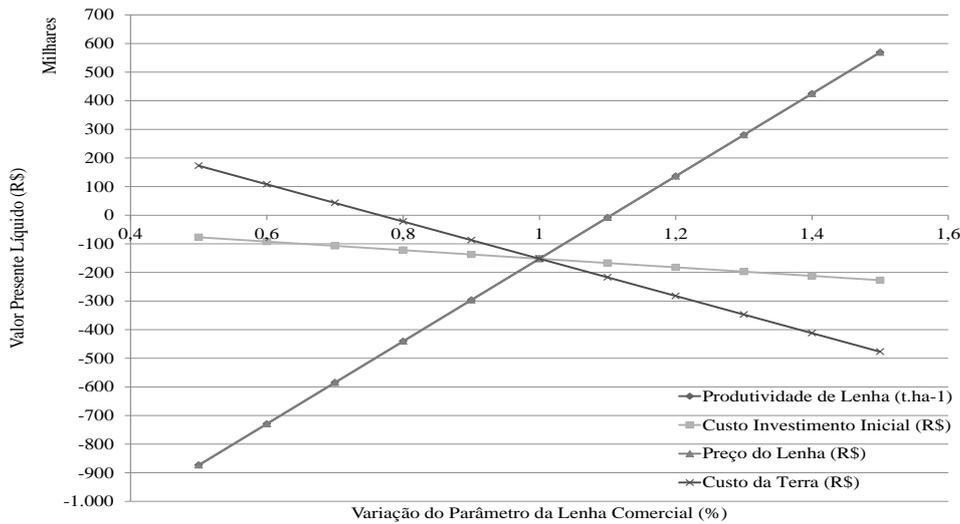


Figura 3. Análise de sensibilidade financeira da comercialização direta da lenha. A curva produtividade de lenha coincide com o preço da lenha.

Nas termelétricas, a variação dos parâmetros: produtividade de lenha, custo inicial de instalação e preço de venda de energia podem tornar o investimento mais atrativo, obtendo-se um VPL positivo (Figura 4). Esta variação poderia ser uma redução em 60% do custo inicial de instalação, que, para o ciclo combinado, equivale a R\$ 2.700.000,00 e, para o ciclo a vapor condensado, equivale a R\$ 1.320.000,00. O aumento de 30% na produtividade de biomassa passaria a 39.000 t.ha⁻¹ ou, ainda, o aumento de 30% no valor de venda da energia, correspondendo a R\$ 134,00 por megawatt-hora produzido.

A geração de energia elétrica a partir da lenha da Caatinga, sob MFS, pode ser viabilizada pela adoção de

medidas governamentais que favoreçam a inserção desta atividade no semiárido como, por exemplo, o aumento do valor fixado nos leilões pela energia gerada a partir da biomassa e maiores subsídios para a compra de equipamentos, diminuindo o investimento inicial.

Na produção de carvão, a variação em 50% dos parâmetros produtividade de lenha, custo inicial, preço do carvão ou custo da terra não inviabiliza, economicamente, a rota tecnológica, pois o VPL permanece positivo (Figura 5).

Entretanto, pode-se observar pelos gráficos da Figura 5 que os parâmetros mais importantes para a viabilidade econômica da produção de carvão são produtividade de lenha e preço de venda do carvão.

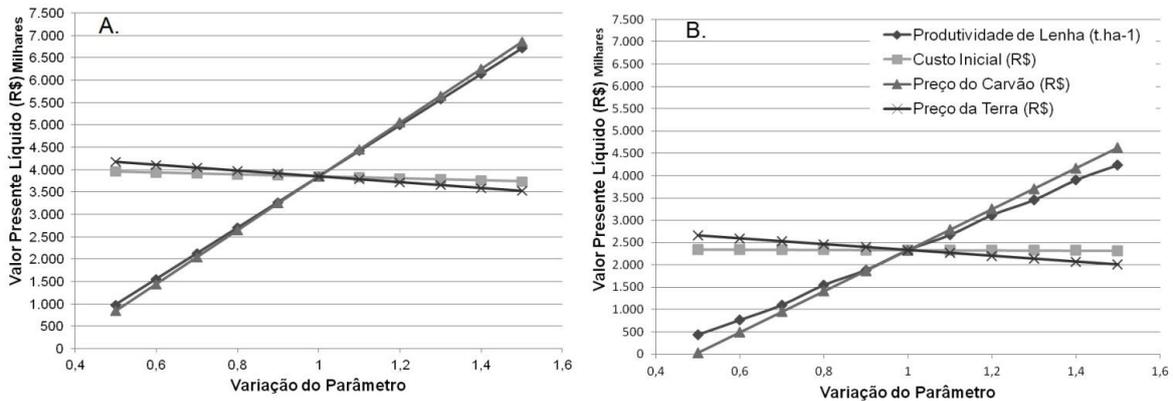


Figura 4. Análise de sensibilidade financeira da produção de carvão em fornos cilíndricos (A) ou em fornos tradicionais (B).

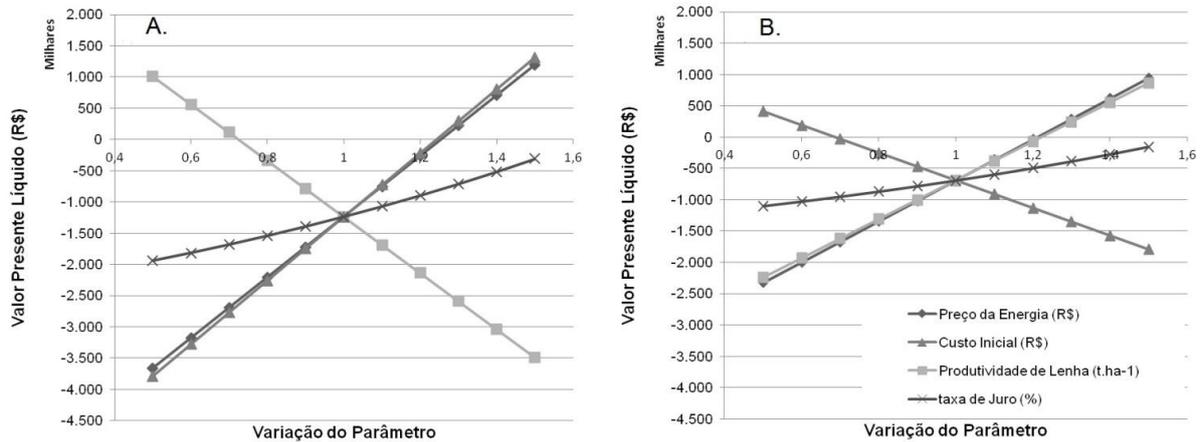


Figura 5. Análise de sensibilidade financeira da produção de energia por termelétricas com ciclo combinado (A) e com ciclo a vapor condensado (B).

Conclusões

As espécies vegetais estudadas apresentaram poder calorífico inferior relativamente alto, variando entre 3600 e 4600 kcal.kg⁻¹. Esses valores ressaltam a importância energética da vegetação nativa da Caatinga e a necessidade de pesquisas que venham acrescentar novas perspectivas de aproveitamento sustentável desta fonte de energia.

Atualmente, a produção de carvão em forno tradicional ou cilíndrico são as únicas rotas que têm valor de TIR maior que de TMA, sendo assim são os investimentos economicamente atrativos.

Se o aproveitamento da lenha da Caatinga sob MFS para conversão energética em termelétricas receber subsídios para sua implantação, como melhor valor pago pela energia e diminuição de impostos durante a implantação de termelétricas para geração de energia a partir da lenha da caatinga, esta tecnologia seria favorecida, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico no semiárido, onde ocorre a exploração predatória de lenha, sem o uso de manejo florestal sustentável.

A produção de lenha da Caatinga para comercialização direta em uma área sob MFS também é pouco atrativa, considerando o valor da terra. Contudo, esses custos podem ser minimizados quando o MFS é implantado em terras próprias sob a administração de cooperativas, podendo o sistema se tornar viável nesse contexto.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio financeiro da Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia de Pernambuco - Facepe (APQ 0077-5.01/09).

Referências

Bain, R.L.; Amos, W.A.; Downing, M.; Erlack, R.L. 2003. Biopower technical assessment: state of the industry and technology, NREL/TP-510-33 123. National Renewable Energy Laboratory, Golden/Colorado, 277p.

Brand, M.A. 2010. Energia de Biomassa Florestal. Rio de Janeiro, Editora Interciência, 114p.

Brandão, Z.N.; Bezerra, M.V.C.; Silva, B.B. 2007. Uso do NDVI para determinação da biomassa na

Chapada do Araripe. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 13. (SBSR), Florianópolis. Anais... São José dos Campos: Brasil. 2007. Plano Nacional de Energia 2030. Brasília: Ministério de Minas e Energia.

Brasil. 2012a. Balanço energético nacional 2011. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética.

Brasil. 2012b. Decreto 7.404 de 23 de Dezembro de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, Cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Poder executivo, Brasília, DF.

Clemente, A. 2008. Projetos empresariais e públicos. 3ª ed., São Paulo: Editora Atlas. 344p.

Colombo, S.F.O.; Pimenta, A.S.; Hatakeyama, K. 2006. Produção de carvão vegetal em fornos cilíndricos verticais: um modelo sustentável. Simpósio de Engenharia de Produção, 13, Bauru. Anais...

Costa, C.C.T.; Oliveira, M.A.J.; Accioly, L.J.O.; Silva, F. H. B. B. 2009. Análise da degradação da caatinga no núcleo de desertificação do Seridó (RN/PB). Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental v.13, p.961-974.

Cruz, P.T.A.; Nogueira, M.F.M. 2004. Oportunidades para o desenvolvimento da biomassa energética no Brasil. Biomassa & Energia v.1, n.1, p.37-44.

Gariglio, M.A.; Sampaio, E.V.S.B.; Cestaro, L.A.; Kageyama, P.Y. 2010. (Eds.). Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro, pp.65-75.

Kuhnen, O.L.; Bauer, U.R. 2001. Matemática financeira aplicada e análise de investimentos. 3ª ed., São Paulo: Editora Atlas.

Larson, E.D., Williams, R.H., Leal, M.R.L.V. 2001. A Review of biomass integrated-gasifier/gas turbine combined cycle technology and its application in sugarcane industries, with an analysis for Cuba, Energy for Sustainable Development, v.1, p.54-76.

Lima Júnior, C.; Accioly, L.J.O.; Giongo, V.; Lima, R.L.F.A.; Sampaio, E.V.S.B.; Menezes, R.S.C. 2014. Estimativa de biomassa lenhosa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de

- vegetação. *Sciencia Forestalis* v.42, n.102, p.289-298.
- Lima, J.L.S.; Sá, I.B.; Serpa, F.G.; Mendonça, A.L.; Duarte, E.S. 1996. Características físico-mecânicas e energéticas de madeiras do trópico semi-árido do Nordeste do Brasil. Comunicado Técnico. Embrapa Cpatsa, Petrolina, v.1, n.1, p.1-14.
- Riegelhaupt, E.M.; Pareyn, F.G.C.A. 2010. A Questão Energética. In: Gariglio, M.A.; Sampaio, E.V.S.B.; Cestaro, L.A.; Kageyama, P.Y. (Eds.). Uso sustentável e conservação dos recursos florestais da caatinga. Brasília: Serviço Florestal Brasileiro 65-75.
- Sampaio, E.V.S.B.; Araújo, E.L.; Salcedo, I.H.; Tiessen, H. 1998. Regeneração da vegetação de caatinga após corte e queima, em Serra Talhada, PE, Pesquisa Agropecuária Brasileira v.33, n.5, p.621-632.
- Sampaio, E.V.S.B.; Freitas, A.D.S. 2008. Produção de biomassa na vegetação nativa do semi-árido nordestino. In: Menezes, R.S.C.; Sampaio, E.V.S.B.; Salcedo, I.H. (Eds.). Fertilidade do solo e produção de biomassa no semi-árido. Recife, pp.11-25.
- Santos, S.F.O.M., Hatakeyama, K. 2012. Processo sustentável de produção de carvão vegetal quanto aos aspectos: ambiental, econômico, social e cultural. *Produção* v.22, n.2, p.309-321.
- Silva, G.C.; Sampaio, E.V.S.B. 2008. Biomassas de partes aéreas em plantas da caatinga. *Revista Árvore* v.32, n.3, p.567-575.
- Souza, A.; Clemente, A. 2000. *Matemática Financeira*. 5. ed. São Paulo, Editora Atlas, 120p.
- Tolmasquim, M.T. 2005. *Geração de Energia Elétrica no Brasil*. Rio de Janeiro, Editora Interciência, 198p.