

Polarization in the Forest Bioelectricity Generation in Brazil

Edvaldo P. Santos Júnior, Anna M. M. Nunes, Luiz M. Coelho Junior

Abstract— The expansion of forest bioelectricity is associated with the insertion of the bioeconomy, providing efficiency gains and improving the use of resources. This paper analyzed the polarization of forest bioelectricity generation in Brazil, between 2000 and 2019. The data used were from the granting of forest biomass thermolectric plants obtained from the National Electric Energy Agency (ANEEL). To measure the polarization, the Lorenz curve, the polarization measures of Foster and Wolfson (P_{FW}) and Esteban and Ray (P_{ER}), were used. The main results showed that the use of Brazilian forest bioelectricity increased from 562.90 MW and 11 thermolectric plants in 2000 to 3,532.61 MW and 115 thermolectric plants in 2019. For the regional level, there was a decrease for P_{FW} and P_{ER} , being the greater polarization in the period from 2002 to 2008, where it highlighted the Southeast region as the main player. There was an increase in state polarization ($P_{FW_{avg.}} = 0.3002$ and $P_{ER(1.6)_{avg.}} = 0.1530$), as a result of the granting of large black liquor plants in the states of Mato Grosso do Sul and Paraná, as of 2013. For level 2 sources, the domain of black liquor and forest residues was registered over the national supply, leading to the existence of hubs ($P_{FW_{avg.}} = 0.5349$ and $P_{ER(1.6)_{avg.}} = 0.1870$). The polarization proved to be relevant to the object of study, being its unprecedented application for energy analysis in Brazil.

Index Terms— Bioenergy, Forest biomass, Bipolarization, Multigroup polarization.

I. INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética mundial, associada às emissões de gases de efeito estufa e o esgotamento das reservas fósseis, vem despertando o interesse por alternativas energéticas, como a bioenergia. Os recursos de biomassa advêm, principalmente, da agropecuária, das florestas e dos resíduos urbanos. A biomassa florestal pode ser utilizada como combustível residencial (cocção e aquecimento) e industrial a partir da geração combinada (calor e eletricidade), tornando-a um componente acessível às energias renováveis [1], [2]. A bioeconomia trata-se do desenvolvimento tecnológico e econômico com contribuição das biotecnologias. O Brasil tem vocação florestal e possui vantagens comparativas e competitivas neste setor. A biomassa florestal é uma das alternativas de transição energética sustentável [3],[4]. Em 2018, o segmento florestal brasileiro colaborou com um Produto Interno Bruto (PIB) setorial de R\$ 86,6 bilhões, representando 1,3% do PIB brasileiro e 6,9% do PIB industrial [5].

E. P. Santos Júnior and A. M. M. Melo are with Graduate Program in Renewable Energy (PPGER), Federal University of Paraíba, João Pessoa, Brazil.

L. M. Coelho Junior is with Department of Renewable Energy Engineering, Federal University of Paraíba, João Pessoa, Brazil (email: luiz@cear.ufpb.br).

Também em 2018, a produção mundial de madeira para fins energéticos foi 1,542 bilhão de m^3 e os principais países produtores foram a Índia (303,34 milhões de m^3), a China (163,01 milhões de m^3) e o Brasil (123,44 milhões de m^3).

No Brasil, a produção florestal advém, principalmente, da silvicultura com uma área de florestas plantadas de 7,83 milhões de hectares ($\times 10^6$ ha), com destaque para o eucalipto, com $5,7 \times 10^6$ ha (72,80%) e o pinus, com $1,6 \times 10^6$ ha (20,43%) [5], [6]. Os subprodutos florestais gerados na indústria são utilizados na geração de calor e cogeração, fornecendo energia mecânica e elétrica no processo produtivo [7]. À exemplo da indústria brasileira de papel e celulose, em 2018, a demanda energética do setor foi distribuída na proporção de 64% com licor negro, 18% com resíduos florestais, 13% gás natural, 3% com óleo combustível e 2% com outras fontes [5], [8]. A oferta de bioeletricidade outorgada no Brasil concentra-se nos setores sucroalcooleiro e florestal. Em 2019, a potência instalada a partir da biomassa foi de 14,97 GW (Giga Watts), representado 8,60% da oferta interna de eletricidade. Destes, 11,54 GW (77,08%) são agroindustriais, 3,24 GW (2,16%) florestais e 0,19 GW (1,27%) agrupado em biocombustíveis líquidos, resíduos urbanos e animais. Na biomassa florestal estiveram o licor negro (2,53 GW), os resíduos florestais (0,45 GW), o gás de alto forno (0,13 GW), o carvão vegetal (0,05 GW) e a lenha (0,08 GW) [9]–[11].

Sacirovic, Ketin e Vignjevic [12] ressaltaram que em razão das características locais, diferentes regiões fornecem condições favoráveis para o desenvolvimento de uma atividade econômica. Para a bioeletricidade florestal são observados restrições espaciais e edafoclimáticas, que impactam na disponibilidade, nos custos de produção e logística [13], [14]. Para Duro e Padilla [15] polarização é um grau de agrupamento em polos homogêneos de uma distribuição, distantes um do outro. Esteban e Ray [16] diferencia este conceito mostrando que a desigualdade mede apenas o grau de dispersão das observações, enquanto que a polarização infere a adversidade entre grupos. A diminuição da desigualdade não implica, necessariamente, em queda da polarização, posto que pode existir uma maior homogeneidade dos polos.

Segundo Duro [17], a análise de polarização auxilia no entendimento de conflitos e discrepâncias entre população, regiões e empresas, como uma ferramenta capaz de avaliar a distribuição espacial e o mercado de um determinado setor. Os ensaios abordando esta temática foram de Molnar [18] avaliando a economia da Romênia, D'Ambrosio [19] observando a distribuição de renda da Itália, Ezcurra [20], nos Estados Unidos e Hoffmann [21], no Brasil. Também avaliaram

a polarização: Li [22] para os crimes na China, Duro e Padilla [15] para emissões de gases de efeito estufa nos países da União Europeia (EU) e Duro [17] para intensidade energética na EU.

Este trabalho apresentou, de forma inédita, a aplicação metodológica das medidas de polarização voltadas ao setor energético, em especial da bioeletricidade florestal no Brasil, entre 2000 e 2019. Os resultados podem auxiliar na compreensão da distribuição espacial e identificar a existência de polos geográficos na oferta nacional, assim como indicar áreas propícias para investimentos e orientar políticas públicas para o desenvolvimento da bioenergia florestal.

II. MATERIAL E MÉTODOS

A. Objeto de Estudo

As termelétricas de biomassa florestal estão disponíveis nos Sistema de Informações da Aneel (SIGA) da ANEEL, no período de 2000 a 2019. As usinas estão classificadas em nível 1 (biomassa florestal) e nível 2 (lenha, carvão vegetal, gás de alto forno, licor negro e resíduos florestais). As informações das outorgas dessas térmicas foram obtidas da biblioteca digital (Sophia) da ANEEL. Foi realizada uma análise de conjuntura da quantidade de termelétricas e da potência outorgada (MW) nas regiões e estados brasileiros, para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019. Utilizou-se a Taxa geométrica de crescimento (TGC) (1) para observar as alterações (aumento e diminuição) na potência outorgada entre 2000 e 2019 [23].

$$TGC[\%] = \left[\sqrt[\Delta t]{\frac{V_F}{V_0}} - 1 \right] * 100 \quad (1)$$

em que, V_F = quantidade ou potência outorgada (MW) da biomassa florestal no ano final; V_0 = quantidade ou potência do ano inicial; Δt = variação temporal (expressa em anos).

B. Curva de Lorenz

A curva de Lorenz (Fig. 1) trata-se de uma representação gráfica da distribuição de desigualdade [24]. O eixo da abscissa (eixo X) é a participação acumulada da potência instalada outorgada e o eixo da ordenada (eixo Y), a participação acumulada das termelétricas ou estados brasileiros com oferta de bioeletricidade florestal. O comportamento da curva de Lorenz varia entre um único participante até uma distribuição perfeita (igual para os participantes) ou linha de equidade, ou seja, o segmento de reta OB da Fig. 1.

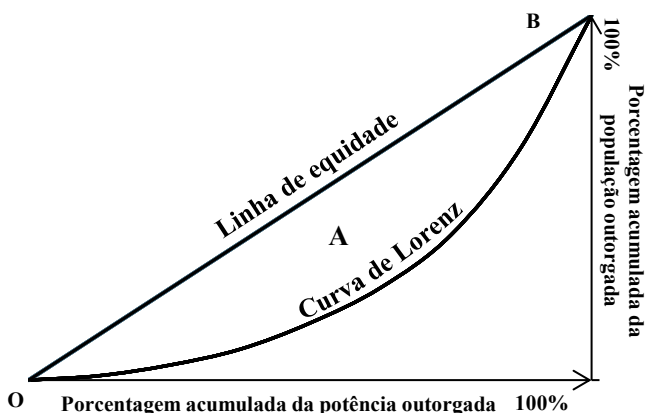


Fig. 1. Curva de Lorenz para outorga da bioeletricidade florestal no Brasil. Fonte: Adaptado de Coulter [24].

C. Medidas de Polarização

De acordo com Wang, Caminada e Wang [25] as medidas de polarização são classificadas em dois grupos: bipolarização e polarização multigrupo. A bipolarização descreve o processo no qual a classe média diminui enquanto os aglomerados se movem para os dois polos opostos, representado pelo índice de Foster e Wolfson. A polarização multigrupo expressa a formação de polarização em grupos arbitrários, conforme o índice de Esteban e Ray [16], [26].

Foster e Wolfson [26] trataram a bipolarização e este indicador é uma das principais das medidas de polarização. O índice de Foster e Wolfson (P) é modelado a partir da mediana como separatriz, conforme (2).

$$P = 4 \frac{\mu(Y)}{m(Y)} \left(\frac{1}{2} - L(0,5) - \frac{G}{2} \right) \quad (2)$$

em que, $\mu(Y)$ = a média da potência outorgada de bioeletricidade florestal (regiões ou estados); $m(Y)$ = a mediana da distribuição de potência outorgada de bioeletricidade florestal (regiões ou estados); $L(0,5)$ = o valor acumulado da curva de Lorenz para a mediana da distribuição e G = o índice de Gini de toda a distribuição.

Para um melhor ajuste da polarização, Foster e Wolfson [26] afirmaram que se os grupos são definidos por faixas não sobrepostas, pode decompor o índice de Gini em dois componentes, $G = G^B + G^W$. Onde, G^B = o índice de Gini entre os grupos, separados pela mediana [$L(0,5)$] e G^W = o coeficiente no interior dos grupos. Os índices de Gini (G^W e G^B) são calculados pelas Eq. 3 e 4, respectivamente e a bipolarização de Foster e Wolfson (P_{FW}) na Eq. 5. Ambas medidas de polarização variam entre 0 (zero) e 1 (um), sendo 1 a polarização máxima.

$$G^W = \frac{1}{4} \left(\frac{\mu(Y_B)}{\mu(Y)} G(Y_B) + \frac{\mu(Y_R)}{\mu(Y)} G(Y_R) \right) \quad (3)$$

$$G^B = \frac{1}{4} \left(\frac{\mu(Y_R)}{\mu(Y)} - \frac{\mu(Y_P)}{\mu(Y)} \right) \quad (4)$$

em que, $\mu(Y_B)$ = a potência média entre as regiões ou estados do grupo de baixa e $\mu(Y_A)$ = a potência média entre as regiões ou estados do grupo de alta, $G(Y_B)$ o coeficiente de Gini entre o grupo de baixa oferta, $G(Y_A)$ o coeficiente de Gini entre o grupo de alta e $G(Y)$ é o Gini geral.

$$P_{FW} = (G^B - G^W) \frac{\mu(Y)}{m(Y)} \quad (5)$$

Esteban e Ray [16] apresentaram o conceito de polarização em grupos (Eq. 6), atribuindo uma relação do grau de identificação entre participantes de um mesmo nível de renda e uma alienação aos demais grupos distintos.

$$P_{ER} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \pi_i^{1+\alpha} \pi_j |\mu_i - \mu_j| \quad (6)$$

em que, P_{ER} = índice de polarização de Esteban e Ray, α = parâmetro de sensibilidade, $0 \leq \alpha \leq 1,6$, sendo $\alpha = 1,6$, resultado de alta homogeneidade intra grupo, n = o número de níveis de potência da biomassa florestal, $[\pi_i^{1+\alpha}]$ = identificação (ID) intra grupo, e $|\mu_i - \mu_j|$ = alienação intergrupo [25]. Utilizou-se a P_{ER} com amplitude de 0,05 no logaritmo do rendimento real e

com os parâmetros de sensibilidade (α) = 1,00, 1,30 e 1,60. A formação dos grupos ocorreu de forma exógena: utilizou os quartis de potência outorgada, tomando grupos de potência baixa (Q_1), média (Q_2), alta (Q_3) e muito alta (Q_4) por estados e termelétricas. Para os estados ou termelétricas pertencentes ao mesmo quartil, utilizou o valor médio do intervalo. Os quartis foram categorizados pela primeira quarta parte da potência outorgada, o Q_1 ($0 < Q_1 \leq 25\%$), segunda quarta parte, o Q_2 ($25\% < Q_2 \leq 50\%$), terceira quarta parte, o Q_3 ($50\% < Q_3 \leq 75\%$) e quarta parte final, o Q_4 ($75\% < Q_4 \leq 100\%$) [27].

III. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 1 apresenta a evolução das termelétricas de base florestal do potencial instalado outorgado (Mega Watts - MW), nas regiões e estados brasileiros, para 2000, 2005, 2010, 2015 e 2019. Em 2000, registrou 11 termelétricas da bioeletricidade florestal gerando 562,90 MW, distribuídas nas regiões Sul (45,45% com 144,38 MW, Sudeste (27,27%) com 257,92 MW, Nordeste (18,18%) com 102,33 MW e Norte (9,09%) com 51,1 MW. Apesar da região Sul ter mais termelétricas registradas na ANEEL, foi o Sudeste que deteve maior potência instalada com 45,82%, seguido do Sul (25,65%), Nordeste (18,76%) e Norte (9,77%). Os principais estados e firmas foram: 25,38% no Espírito Santo (Aracruz Celulose), 18,76% na Bahia (Suzano Mucuri) e 17,76% Minas Gerais (Cenibra).

Entre 2000 e 2005, a TGC foi de 17,30% a.a. para capacidade instalada e de 46,01% a.a. para usinas. Mais cinco estados (MT, MS, MA, AM e RO) entraram na oferta de bioeletricidade florestal. Em 2005, a potência outorgada foi 1.065,65 MW, com 50 termelétricas, sendo a região Sudeste (43,40%) a principal região para potência instalada e o Sul para quantidade de empreendimentos (44,00%). Dentre os estados, destacou-se para potência, a Bahia (20,89%) e o Espírito Santo (19,74%) e para a quantidade, Santa Catarina (24,00%) e Minas Gerais

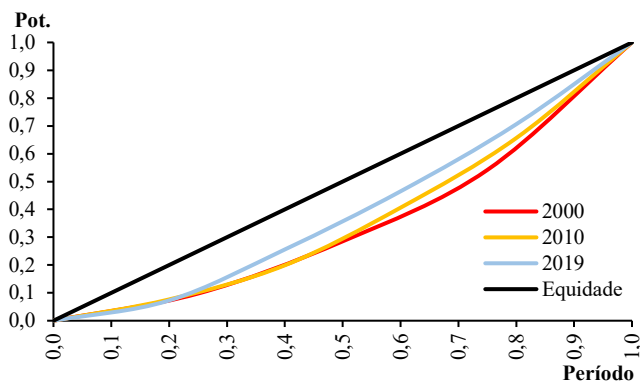
(16,00%). As principais entradas de firmas foram a Veracel – BA (117,05 MW), Lages – SC (28,00 MW) e Lwarcel – SC (25,70 MW), além da expansão da Aracruz – ES (para 231,88MW) e Ripasa – SP (para 49,63 MW). De 2005 a 2010, a outorga para a bioeletricidade florestal cresceu 12,23% a.a. em potência e 9,16% a.a. em quantitativo de empresas, chegando a 1.690,93 MW e 71 usinas. Em 2010, o potencial outorgado distribui nas regiões: Sul (25,19), Sudeste (34,58%), Nordeste (20,84%), Centro-Oeste (12,35%) e Norte (7,03%); e para a quantidade de termelétricas, o ranking foi: Sul (36,62%), Sudeste (29,58%), Norte (14,08%), Centro-Oeste (11,27%) e Nordeste (8,45%). A região Centro-Oeste cresceu 125,89% a.a., passando de 8,02 MW (2005) para 208,84 MW (2010). Dentre os estados, para potência, notabilizou: Bahia (19,35%), Minas Gerais (14,74%) e Espírito Santo (12,44%). Das termelétricas, a VCP – MS (atual Fibria-MS) outorgou 175,10 MW, em 2008.

De 2010 a 2015 observou-se aumento na potência outorgada de 15,26% a.a., com crescimento nas regiões Sul (22,38% a.a.), Nordeste (20,62% a.a.) e Centro-Oeste (2,99% a.a.). Em 2015, entre os estados, o Paraná ocupou a primeira posição, com 17,22% da oferta nacional (MW); para a quantidade de usinas, destacou Minas Gerais, com 19 termelétricas (26,76%). As principais outorgas foram a da Klabin Celulose – PR (330,00 MW), Suzano Maranhão – MA (254,84 MW) e a Eldorado Celulose – MS (226,00 MW). Entre 2015 e 2019, foram outorgados 548,64 MW, em 21 novas termelétricas. A região Centro-Oeste continuou com o maior crescimento (15,79% a.a. na potência e 9,32% a.a. na quantidade). O Nordeste foi a região que houve diminuição de potência instalada por meio da termelétrica Viena, em Açailândia – MA. O ranking da potência instalada entre as regiões foi: Sul (30,05%), Centro-Oeste (24,32%), Nordeste (21,06%), Sudeste (18,33%) e Norte (6,24%). Dos estados, destacou o Mato Grosso do Sul (20,71%) com 731,72 MW, a instalação da Fibria MS II e outorga da Onça Pintada, somando 319,58 MW.

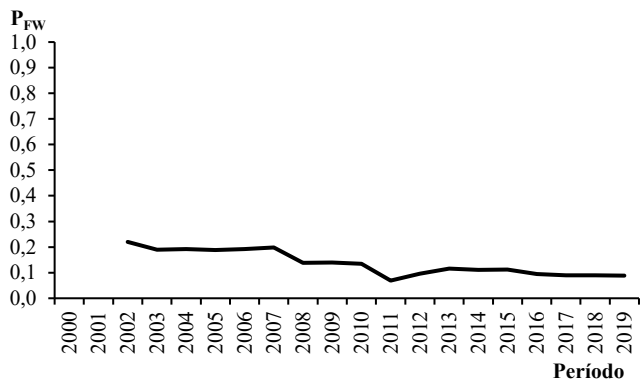
TABELA I
EVOLUÇÃO DO POTENCIAL OUTORGADO (MEGA WATTS - MW) DAS TERMELÉTRICAS DE BASE FLORESTAL, NAS REGIÕES E ESTADOS BRASILEIROS, PARA 2000, 2005, 2010, 2015 E 2019.

| | 2000 | | 2005 | | 2010 | | 2015 | | 2019 | |
|---------------------|---------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|-----------|-----------------|------------|
| | Pot | Qde | Pot | Qde | Pot | Qde | Pot | Qde | Pot | Qde |
| Sul | 144,40 | 5 | 272,75 | 22 | 425,96 | 26 | 955,49 | 28 | 1.061,51 | 35 |
| Paraná | 48,85 | 1 | 96,85 | 8 | 180,58 | 10 | 513,98 | 11 | 513,98 | 11 |
| Rio Grande do Sul | 48,80 | 2 | 58,80 | 3 | 69,76 | 3 | 262,79 | 3 | 354,51 | 9 |
| Santa Catarina | 46,75 | 2 | 117,10 | 11 | 175,62 | 13 | 178,72 | 14 | 193,02 | 15 |
| Centro-Oeste | - | - | 8,02 | 3 | 208,84 | 8 | 477,94 | 14 | 859,12 | 20 |
| Goiás | - | - | - | - | 5,00 | 1 | 5,00 | 1 | 18,20 | 3 |
| Mato Grosso | - | - | 4,52 | 2 | 11,80 | 4 | 48,90 | 8 | 109,20 | 10 |
| Mato Grosso do Sul | - | - | 3,50 | 1 | 192,04 | 3 | 424,04 | 5 | 731,72 | 7 |
| Nordeste | 105,60 | 2 | 229,85 | 4 | 352,40 | 6 | 746,11 | 8 | 743,96 | 9 |
| Bahia | 105,60 | 2 | 222,65 | 3 | 327,20 | 3 | 466,07 | 4 | 456,52 | 4 |
| Maranhão | - | - | 7,20 | 1 | 25,20 | 3 | 280,04 | 4 | 287,44 | 5 |
| Sudeste | 257,90 | 3 | 462,46 | 15 | 584,80 | 21 | 633,92 | 28 | 647,42 | 31 |
| Espírito Santo | 142,90 | 1 | 210,40 | 1 | 210,40 | 1 | 213,90 | 2 | 213,90 | 2 |
| Minas Gerais | 100,00 | 1 | 144,22 | 8 | 249,19 | 14 | 316,98 | 19 | 314,23 | 20 |
| Rio de Janeiro | - | - | - | - | - | - | 2,70 | 1 | 2,70 | 1 |
| São Paulo | 15,00 | 1 | 107,84 | 6 | 125,22 | 6 | 100,34 | 6 | 116,59 | 8 |
| Norte | 55,00 | 1 | 92,58 | 6 | 118,94 | 10 | 170,61 | 15 | 220,61 | 20 |
| Acre | - | - | - | - | 1,50 | 1 | 30,47 | 2 | 30,47 | 2 |
| Amazonas | - | - | 17,03 | 3 | 17,03 | 3 | 17,03 | 3 | 17,03 | 3 |
| Pará | 55,00 | 1 | 55,55 | 2 | 55,61 | 3 | 78,31 | 7 | 78,31 | 7 |
| Rondônia | - | - | 20,00 | 1 | 24,00 | 1 | 24,00 | 1 | 24,00 | 1 |
| Roraima | - | - | - | - | 20,80 | 2 | 20,80 | 2 | 59,30 | 6 |
| Tocantins | - | - | - | - | - | - | - | - | 11,50 | 1 |
| BRASIL | 562,90 | 11 | 1.065,65 | 50 | 1.690,93 | 71 | 2.984,07 | 93 | 3.532,61 | 115 |

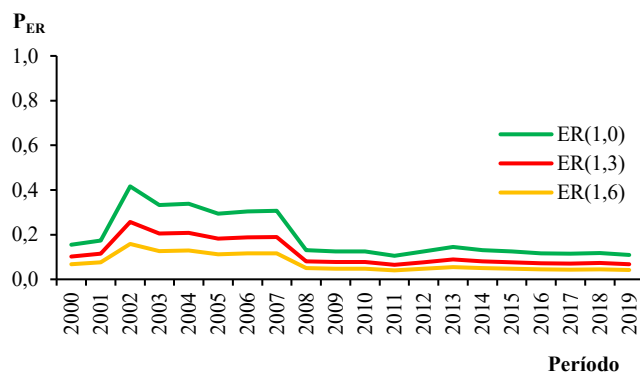
A Fig. 2 apresenta a evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nas regiões brasileiras. A curva de Lorenz, Fig. 2.a, infere queda na desigualdade entre as regiões. Em 2000, apenas quatro regiões participavam da oferta e o Sudeste correspondeu com 55,82%. A partir de 2010, com todas as regiões, a disparidade diminuiu, sendo o Norte, Centro-Oeste e Nordeste com 40,22% da potência outorgada, e o restante (59,78%) pelo Sul e Sudeste. Em 2019, apresentou a maior proximidade da linha de equidade; as regiões com menor participação apresentaram elevado aumento da oferta. O Centro-Oeste teve potência quatro vezes superior à apresentada em 2010. O Sudeste com pouco aumento e a região Sul tornou-se o principal polo.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nas regiões brasileiras, de 2000 a 2019. (a) Curva de Lorenz; (b) Foster e Wolfson e (c) Esteban e Ray.

A Fig. 2.b representa a bipolarização de Foster e Wolfson. Observou-se queda na polarização entre as regiões,

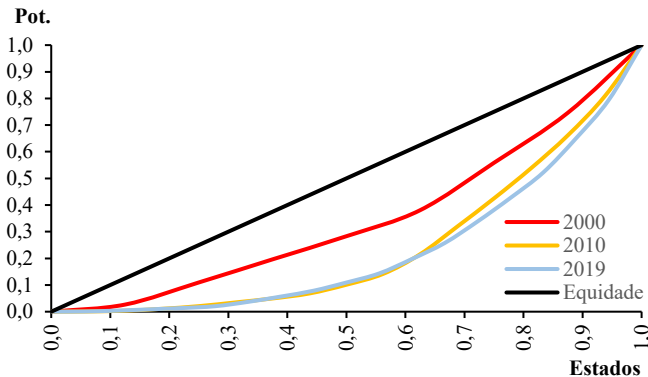
considerando a existência de um grupo de alta potência e um de baixa, todavia não houve polarização alta. Para 2000 e 2001 os resultados foram inconsistentes, dado o número de participantes. Entre 2002 e 2006, a bipolarização apresentou os maiores valores para a série, devido ao incremento de potência nas regiões Sul e Sudeste, e estagnação, principalmente, no Norte do país, além da entrada do Centro-Oeste, com baixa participação na potência outorgada. A construção de novas usinas entre 2007, 2008 e 2017 resultou em breve queda para a bipolarização. A P_{FW} apresentou média de 0,1345 (2002 a 2019), com a maior polarização registrada em 2013 ($P_{FW} = 0,1366$), ocasionada por forte aumento de potência outorgada no Sul do país. O menor registro foi em 2011 ($P_{FW} = 0,069$), ano em que houve aumento na capacidade outorgada nas regiões, exceto no Norte [Sudeste (587,00 MW - 28,75%), Nordeste (474,48 MW - 23,24%), Centro-Oeste (434,84 MW - 21,29%), Sul (425,96 MW - 20,86%) e Norte (119,74 MW - 5,86%)].

A Fig. 2.c apresenta a polarização de Esteban e Ray para a potência outorgada da bioeletricidade florestal nas regiões brasileiras entre 2000 a 2019. Observou-se um comportamento semelhante ao obtido pela medida de Foster e Wolfson, todavia com valores elevados de polarização entre os anos de 2002 e 2008, resultante do domínio da região Sudeste sobre a oferta de bioeletricidade nacional. Outro destaque diz respeito ao fator de sensibilidade (α), para a análise regional, cada observação foi tratada como um grupo específico, portanto, o segmento ER(1,6), que sugere alta coesão intra-grupo, pode ser indicado como o mais representativo [25]. A média da P_{ER} (1,6) foi 0,0730 (2000 a 2019), a maior polarização ocorreu em 2002 ($P_{ER} = 0,1584$), ano que entrou a região Centro-Oeste e teve aumento de potência para o Sudeste. Assim como para a P_{FW} , o menor valor da P_{ER} foi 0,0400, em 2011.

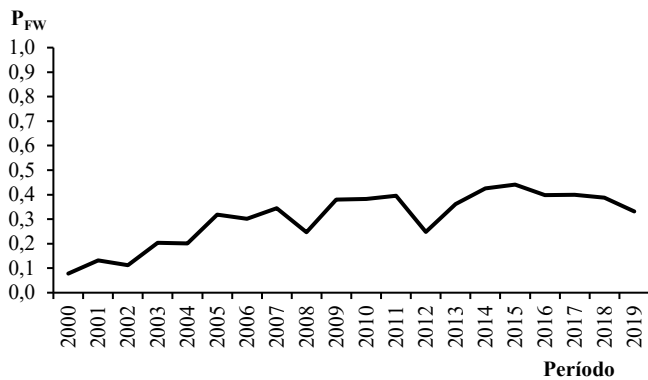
A Figura 3 apresenta a evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nos estados brasileiros, de 2000 a 2019. Da curva de Lorenz, Fig. 3.a, foi possível notar aumento da desigualdade entre os estados. Em 2000, os 3 maiores estados (37,50%) (ES, BA e MG), representaram 61,91% (348,50 MW) do potencial outorgado no país. Para 2010, a distribuição mais concentrada para as unidades com maior disponibilidade, os últimos 25% da distribuição (BA, MG, ES e MS), representaram 68,56% (978,82 MW) da potência outorgada. Em 2019, notou aumento significativo para a extremidade de maior recurso, 57,41% (2.041,73 MW) da capacidade nacional e esteve associada aos 22,22% dos estados mais importantes (MS, PR, BA e RS). A avaliação da bipolarização de Foster e Wolfson entre os estados brasileiros, Fig. 3.b, inferiu aumento da polarização. Nos anos iniciais a bipolarização apresentou valores baixos; entre 2000 e 2004, a P_{FW} teve média de 0,1454, devido a baixa participação das unidades federativas. A partir de 2004, a inserção de novos recursos como a lenha, carvão vegetal e GAF, em estados com baixa capacidade outorgada, ocasionou aumento ao índice.

O aumento a partir de 2008 foi ocasionado pela elevada potência nos estados do Mato Grosso do Sul, Paraná e Bahia; Coelho Junior et al. [28] também identificaram agrupamentos de usinas para estas unidades. Entre os anos de 2010 e 2012 houve nova diminuição para a bipolarização, ocasionada pelo aumento da participação dos estados do Mato Grosso do Sul e Maranhão na oferta nacional. A partir de 2013, a outorga de

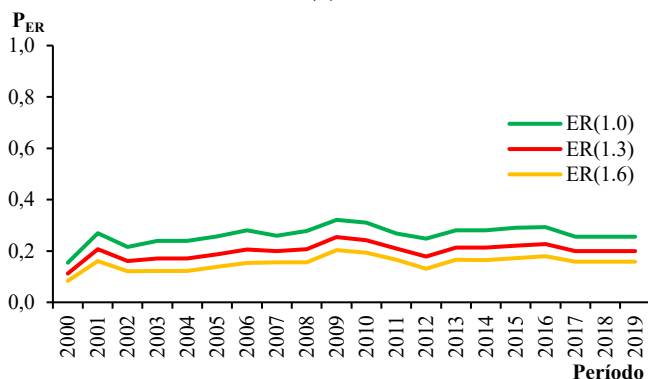
grandes usinas do licor negro resultou no segundo grande aumento da polarização no período estudado. A bipolarização apresentou média de 0,3002 (2000 a 2019), com maior registro em 2011 ($P_{FW} = 0,4550$) e o menor em 2000 ($P_{FW} = 0,078$).



(a)



(b)



(c)

Fig. 3. Evolução dos indicadores de polarização da potência outorgada da bioeletricidade florestal nos estados brasileiros. (a) Curva de Lorenz; (b) Foster e Wolfson e (c) Esteban e Ray, de 2000 a 2019.

A Fig. 3.c apresenta a medida de polarização de Esteban e Ray para a oferta de bioeletricidade florestal nos estados brasileiros, de 2000 a 2019. Entre os estados, a P_{ER} apresentou comportamento semelhante a P_{FW} . A bipolarização P_{ER} apresentou os menores valores nos anos iniciais (2000 a 2002). O fator de sensibilidade $\alpha = 1,6$ apresentou a menor média ($P_{ER} = 0,1530$) e menor desvio padrão ($P_{ER} = 0,0260$), os fatores que impactaram nas variações da medida foram os mesmos apontados para a P_{FW} .

IV. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a metodologia da polarização para a bioeletricidade florestal no Brasil, entre 2000 e 2019. O método utilizado mostrou adaptabilidade ao objeto de estudo, com aplicação inédita para análises energéticas no Brasil. A partir dos resultados alcançados, pode-se concluir que, embora o uso da bioeletricidade florestal no Brasil tenha aumentado, esse crescimento proporcionou a expansão e domínio das usinas de licor negro no cenário nacional.

A análise de conjuntura e a avaliação para as regiões apresentou queda na polarização, associada ao notório crescimento da oferta na região Centro-Oeste do país. Para o nível regional observou-se queda para a P_{FW} e P_{ER} , com maior polarização no período de 2002 a 2008, onde se destacou a região Sudeste como principal participante. A partir de 2013 o incremento no Sul e Centro-Oeste resultou na diminuição dos índices. Para o nível estadual houve aumento na polarização, resultado da outorga de grandes usinas do licor negro nos estados do Mato Grosso do Sul e Paraná, a partir de 2013.

Os resultados obtidos somam-se a outros estudos voltados a bioeletricidade e podem auxiliar na decisão, sob aspecto espacial, de novos investimentos no setor, assim como políticas públicas que aumentem o desenvolvimento da geração florestal em regiões com menor participação. O crescimento da oferta a partir de recursos florestais favorece a instituição de uma bioeconomia e o fortalecimento e diversidade da matriz elétrica nacional. Embora o sistema elétrico nacional seja interligado, a diversidade de fontes de energia resulta no aumento de sua segurança energética e colabora com a transição energética sustentável.

Estudos futuros podem abordar a polarização entre os agentes, considerando a potência instalada em cada termelétrica da bioeletricidade florestal. Outra necessidade será avaliar a existência de polarização entre as demais fontes de geração de energia renovável no Brasil, a fim compreender a dinâmica da oferta de eletricidade nacional, e destacar seus polos regionais.

REFERENCES

- [1] R. Lundmark, D. Athanassiadis, and E. Wetterlund, "Supply assessment of forest biomass - A bottom-up approach for Sweden," *Biomass and Bioenergy*, vol. 75, pp. 213–226, 2015, doi: 10.1016/j.biombioe.2015.02.022.
- [2] J. de Castro Reis, R. dos Santos Constant, L. Angulo Meza, and J. C. Soares de Mello, "Multiobjective Linear Programming to Determine the Most Suitable Electrical Energy Matrix for Countries: a Case Study at Brazil," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 17, no. 03, pp. 426–433, Mar. 2019, doi: 10.1109/TLA.2019.8863313.
- [3] M. Tedesco, F. J. Simioni, S. Sehnem, J. F. Soares, and L. M. Coelho Junior, "Assessment of the circular economy in the Brazilian planted tree sector using the ReSOLVE framework," *Sustain. Prod. Consum.*, vol. 31, pp. 397–406, May 2022.
- [4] F. J. Simioni, G. L. Jarenkow, K. F. da Silva, R. C. Brutti, and L. M. Coelho Junior, "Eco-efficiency in the transformation of forest biomass residues in electrical energy," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 23, no. 5, pp. 1443–1456, Jul. 2021.
- [5] Indústria brasileira de árvores, "Relatório 2019," 2019. [Online]. Available: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>.
- [6] Food and Agriculture Organization of the United Nations - FAO, "FAOSTAT," Forestry Production and Trade, 2020. <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>.
- [7] L. M. Coelho Junior, E. P. Santos Junior, A. M. M. Nunes, A. N. de Souza, L. A. C. Borges, and F. J. Simioni, "Concentration and

- Clusters of Black Liquor Thermolectric Plants in Brazil," *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 19, no. 12, pp. 2122–2129, Dec. 2021, doi: 10.1109/TLA.2021.9480155.
- [8] Serviço Florestal Brasileiro, "Produção Florestal," Sistema Nacional de Informações Florestais, 2021.
- [9] Agência Nacional de Energia Elétrica, "Sistema de Informações de Geração da ANEEL," 2020. <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.cfm> (accessed Sep. 05, 2018).
- [10] E. P. Santos Júnior, A. M. M. Nunes, M. Nunes, Y. R. V. Araújo, K. L. C. Martins, and L. M. Coelho Junior, "Concentração da oferta de bioeletricidade no Brasil," *Rev. Bras. Planej. e Desenvolv.*, vol. 10, no. 04, pp. 648–665, 2021.
- [11] E. P. Santos Júnior, M. V. B. da Silva, F. J. Simioni, P. Rotella Junior, R. S. C. Menezes, and L. M. Coelho Junior, "Location and concentration of the forest bioelectricity supply in Brazil: A space-time analysis," *Renew. Energy*, vol. 199, pp. 710–719, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.renene.2022.09.001.
- [12] S. Sacirovic, S. Ketin, and N. Vignjevic, "Eco-industrial zones in the context of sustainability development of urban areas," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 26, no. 24, pp. 24346–24356, Aug. 2019, doi: 10.1007/s11356-018-1390-y.
- [13] U. F. Hernández, D. Jaeger, and J. I. Samperio, "Evaluating economic alternatives for wood energy supply based on stochastic simulation," *Sustain.*, vol. 10, no. 4, pp. 1–19, 2018, doi: 10.3390/su10041161.
- [14] L. M. Coelho Junior and E. P. Santos Júnior, "Space-Time Conglomerates Analysis of the Forest-Based Power Plants in Brazil (2000–2019)," *Energies*, vol. 15, no. 11, p. 4113, Jun. 2022, doi: 10.3390/en15114113.
- [15] J. A. Duro and E. Padilla, "Cross-Country Polarisation in CO2 Emissions Per Capita in the European Union: Changes and Explanatory Factors," *Environ. Resour. Econ.*, vol. 54, no. 4, pp. 571–591, Apr. 2013, doi: 10.1007/s10640-012-9607-x.
- [16] J.-M. Esteban and D. Ray, "On the Measurement of Polarization," *Econometrica*, vol. 62, no. 4, p. 819, Jul. 1994, doi: 10.2307/2951734.
- [17] J. A. Duro, "The international distribution of energy intensities: Some synthetic results," *Energy Policy*, vol. 83, pp. 257–266, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.enpol.2015.03.022.
- [18] M. Molnar, "Income Polarization In Romania," *Rom. J. Econ. Forecast.*, vol. 14, no. 2, pp. 64–83, 2011.
- [19] C. D'ambrosio, "Household Characteristics and the Distribution of Income In Italy: An Application of Social Distance Measures," *Rev. Income Wealth*, vol. 47, no. 1, pp. 43–64, Mar. 2001, doi: 10.1111/1475-4991.00003.
- [20] R. Ezcurra, "Polarization trends across the US states," *Appl. Econ. Lett.*, vol. 16, no. 9, pp. 897–902, May 2009, doi: 10.1080/13504850701222194.
- [21] R. Hoffmann, "Medidas de polarização da distribuição da renda e sua evolução no Brasil de 1995 a 2013," *Econ. e Soc.*, vol. 26, no. 1, pp. 165–187, Apr. 2017, doi: 10.1590/1982-3533.2017v26n1art6.
- [22] J. Li, G. Wan, C. Wang, and X. Zhang, "Which indicator of income distribution explains crime better? Evidence from China," *China Econ. Rev.*, vol. 54, pp. 51–72, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.chieco.2018.10.008.
- [23] G. M. A. Cuenca and M. H. G. Dompieri, "Dinâmica espacial da canavicultura e análise dos efeitos sobre o valor bruto da produção, na região dos tabuleiros costeiros da Paraíba, Pernambuco e Alagoas," *Rev. Econ. NE*, vol. 47, no. 4, pp. 91–106, 2016.
- [24] P. B. Coulter, *Measuring inequality: A methodological handbook*. 2019.
- [25] J. Wang, K. Caminada, and C. Wang, "Measuring Income Polarization for Twenty European Countries, 2004–13: A Shapley Growth-Redistribution Decomposition," *East. Europ. Econ.*, vol. 55, no. 6, pp. 477–499, Nov. 2017, doi: 10.1080/00128775.2017.1345637.
- [26] J. E. Foster and M. C. Wolfson, "Polarization and the decline of the middle class: Canada and the U.S.," *J. Econ. Inequal.*, vol. 8, no. 2, pp. 247–273, Jun. 2010, doi: 10.1007/s10888-009-9122-7.
- [27] R. Dawson, "How Significant is a Boxplot Outlier?," *J. Stat. Educ.*, vol. 19, no. 2, Jul. 2011, doi: 10.1080/10691898.2011.11889610.
- [28] L. M. Coelho Junior, E. P. Santos Junior, A. M. M. Nunes, F. J. Simioni, R. Abrahao, and P. R. Junior, "Concentration and Spatial Clustering of Forest-Based Thermolectric Plants in Brazil," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 221932–221941, 2020, doi:

10.1109/ACCESS.2020.3042945.



Edvaldo Pereira Santos Júnior possui graduação em Engenharia de Energias Renováveis (2018) e mestrado em Energias Renováveis (2020) pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Atualmente é doutorando em Tecnologias Energéticas e Nucleares pela Universidade Federal do Pernambuco (UFPE). Tem experiência na área de Engenharia Econômica, com ênfase em estudos de mercado, atuando principalmente nos temas: bioenergia, concentração industrial, análises regionais e espaciais.



Anna Manuella Melo Nunes possui graduação em Direito (2006) pela Faculdade Estácio do Recife, com especialização profissional em Direito Energético (2015) pelo Instituto Brasileiro de Direito Energético - IBDE/SP. Mestrado em Energias Renováveis (2021) pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Desde 2011 atua em empresas do setor elétrico. Tem experiência na área de direito de energia, com experiência na área empresarial, regulatória e ambiental do setor de distribuição, geração e transmissão.



Luiz Moreira Coelho Junior possui graduação em Ciências Econômicas (2001) pela Universidade de Vila Velha (UVV), mestrado (2004) e doutorado (2010) em Engenharia Florestal pela Universidade Federal de Lavras (UFLA). Desde 2013 é Professor do Departamento de Engenharia de Energias Renováveis, do Centro de Energias Alternativas e Renováveis, da Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Tem experiência na área de Economia Aplicada, atuando principalmente nos seguintes temas: Bioeconomia, economia circular, economia regional e espacial, energias renováveis e aproveitamento energético, com ênfase em bioenergia.