

revista brasileira de
ENERGIA



Sociedade Brasileira de
Planejamento Energético

Volume 25, Nº 2, 2º Trimestre de 2019

Diagramação

Kelly Fernanda dos Reis

Revisão

Célio Bermann e Kelly Fernanda dos Reis

**Revista Brasileira de Energia
Vol. 25 - nº 2**

Itajubá, 2019 - SBPE

Editor: Célio Bermann
132 p.

1 - Energia - artigos

2 - Publicação científica

ISSN: 2317-6652

É permitida a reprodução parcial ou total da obra, desde que citada a fonte.

revista brasileira de
ENERGIA

A Revista Brasileira de Energia tem como missão:

“Divulgar trabalhos acadêmicos, estudos técnicos e resultados de pesquisas relacionadas ao planejamento energético do país e das suas relações regionais e internacionais.”

Editor Responsável

Célio Bermann

Comitê Editorial

Annemarlen Gehrke Castagna

Edmilson Moutinho dos Santos

Edmar Luiz Fagundes de Almeida

Edson da Costa Bortoni

Eduardo Mirko V. Turdera

Elizabeth Cartaxo

Ivo Leandro Dorileo

Jamil Haddad

Luiz Augusto Horta Nogueira

Mauro Donizeti Berni

Sergio Valdir Bajay

Virginia Parente

A Revista Brasileira de Energia (RBE) é uma publicação da Sociedade Brasileira de Planejamento Energético (SBPE), editada trimestralmente.

Diretoria da SBPE

Presidente: Ivo Leandro Dorileo

Vice-Presidente: Edson da Costa Bortoni

Diretora de Eventos: Annemarlen Gehrke Castagna

Diretor de Publicações: Célio Bermann

Diretor Administrativo: Mauro Donizeti Berni

Conselho Fiscal

Edmilson Moutinho dos Santos

Jamil Haddad

Sérgio Valdir Bajay

Conselho Consultivo

Afonso Henriques Moreira Santos

Célio Bermann

Edmilson Moutinho dos Santos

Ivan Marques de Toledo Camargo

Jamil Haddad

José Roberto Moreira

Luiz Pinguelli Rosa

Maurício Tiommo Tolmasquim

Oswaldo Lívio Soliano Pereira

Sergio Valdir Bajay

Secretaria Executiva da SBPE

Kelly Fernanda dos Reis e Lúcia Garrido Rios

Endereço: Av. BPS, 1303 – Pinheirinho

Itajubá – MG – CEP:37.500-903

E-mail: exec@sbpe.org.br

Os artigos podem ser enviados por meio do site da SBPE

www.sbpe.org.br

EDITORIAL

Neste segundo número no ano de 2019, a Revista Brasileira de Energia traz 5 artigos que cobrem um amplo espectro do planejamento energético no Brasil e no contexto internacional.

No primeiro artigo “A study of the nuclear natural resources utilization in open and closed fuel cycles”, seus autores *Letícia Caroline Gonçalves* e *José Rubens Maiorino* propõem uma metodologia para análise do uso de recursos naturais em quatro tipologias distintas de reatores e procuram avaliar a sustentabilidade da fonte nuclear e a eficiência no uso desses recursos.

A perspectiva da inserção de fontes fósseis não convencionais no nosso país é analisada no artigo “Avaliação do potencial de geração de Gás e Óleo Não convencional dos folhelhos negros da Formação Irati na Região de Goiás e Mato Grosso, Centro-Oeste do Brasil”, pelos autores *Fastudo Jorge Mabecua*, *Colombo Celso Gaeta Tassinari* e *Egberto Pereira*, que desenvolvem um método de avaliação através da caracterização geoquímica orgânica dos folhelhos, determinação do potencial gerador e grau de maturação da matéria orgânica dos folhelhos.

Por sua vez, a necessidade de se ter disponível séries de valores adicionados dos setores e segmentos industriais energo-intensivos para a previsão da demanda de energia conduziu os autores *Roberta Ferreira Carrijo Sharma*, *Orlando Frederico José Godoy Bordoni* e *Sérgio Valdir Bajay* à elaboração do artigo “Compatibilização das classificações do IBGE e do MME para a projeção da demanda de energia dos segmentos Industriais energo-intensivos”.

O quarto artigo “Investimento em infraestrutura energética e o crescimento econômico brasileiro no período de 2003 a 2018”, de autoria de *Andréia Ferreira Prestes* se dispõe a investigar se existe relação entre o investimento em infraestrutura e crescimento econômico no Brasil, enfatizando o setor de energia elétrica.

Por fim, o potencial do bagaço da cana-de-açúcar e da vinhaça, sub-produtos do processo de produção do açúcar e do etanol, são analisados por *Isabela Zanon Pereira*, *Ivan Felipe Silva dos Santos*, *Hellen Luisa de Castro e Silva* e *Regina Mambeli Barros* no artigo “Uma breve revisão sobre a indústria sucroalcooleira no Brasil com enfoque no potencial de geração de energia”.

Boa leitura!

Célio Bermann

Editor Responsável da Revista Brasileira de Energia

SUMÁRIO

A STUDY OF THE NUCLEAR NATURAL RESOURCES UTILIZATION IN OPEN AND CLOSED FUEL CYCLES.....07

Letícia Caroline Gonçalves, José Rubens Maiorino

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE GÁS E ÓLEO NÃO CONVENCIONAL DOS FOLHELHOS NEGROS DA FORMAÇÃO IRATI NA REGIÃO DE GOIÁS E MATO GROSSO, CENTRO-OESTE DO BRASIL.....21

Fastudo Jorge Mabecua, Colombo Celso Gaeta Tassinari, Egberto Pereira

COMPATIBILIZAÇÃO DAS CLASSIFICAÇÕES DO IBGE E DO MME PARA A PROJEÇÃO DA DEMANDA DE ENERGIA DOS SEGMENTOS INDUSTRIAIS ENERGO-INTENSIVOS.....54

Roberta Ferreira Carrijo Sharma, Orlando Frederico José Godoy Bordoni, Sérgio Valdir Bajay

INVESTIMENTO EM INFRAESTRUTURA ENERGÉTICA E O CRESCIMENTO ECONÔMICO BRASILEIRO NO PERÍODO DE 2003 A 2018.....92

Andréia Ferreira Prestes

UMA BREVE REVISÃO SOBRE A INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA NO BRASIL COM ENFOQUE NO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....111

Isabela Zanon Pereira, Ivan Felipe Silva dos Santos, Hellen Luisa de Castro e Silva, Regina Mambeli Barros

A STUDY OF THE NUCLEAR NATURAL RESOURCES UTILIZATION IN OPEN AND CLOSED FUEL CYCLES

Letícia Caroline Gonçalves¹
José Rubens Maiorino¹

¹*Universidade Federal do ABC*

DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i2.416>

RESUMO

Neste trabalho, o uso de recursos naturais foi analisado usando uma metodologia simplificada e assumindo condições de cálculo próximas às reais, a fim de avaliar a sustentabilidade da fonte nuclear e a eficiência no uso desses recursos. Para a análise de ciclos de combustível aberto foram selecionados quatro reatores, sendo os Reator de Água Pressurizada (PWR) e Reator de Água Pesada Pressurizada (PHWR), dois reatores de Geração II comumente usados até hoje, o reator avançado da Geração III AP1000 e o reator conceitual AP-Th 1000. Para ciclos fechados de combustível, avaliou-se a variação da utilização do recurso natural com a variação do fator de conversão, parametrizado pela queima. Observou-se que os reatores de Geração II utilizam apenas 1% do recurso natural e, apesar dos avanços tecnológicos, o reator da Geração III não apresentou aumento significativo em comparação ao primeiro. O ciclo fechado de combustível, apesar de reciclar o combustível queimado de reatores térmicos, explora apenas cerca de 10% do recurso. Grandes melhorias são observadas nos Fast Breeder Reactors, podendo obter um uso próximo a 100% com o aumento da queima e a minimização de perdas. Embora tenha sido comprovada a viabilidade técnica do uso do tório como combustível nuclear, este seria mais bem usado em ciclo fechado, como no autossustentável Liquid Fluoride Thorium Reactor (LFTR), um reator de Geração IV que pode transformar a energia nuclear em uma fonte de energia sustentável e renovável.

Palavras-chave: Utilização de Recursos Naturais, Reatores Nucleares, Ciclos de Combustível, Tório.

ABSTRACT

In this work, the use of natural resources was analyzed using a simplified methodology and assuming calculation conditions close to the real ones, to assess the sustainability of the nuclear source and the efficiency in the use of these resources. For the analysis of open fuel cycles, four reactors were selected, these being the Pressurized Water Reactor (PWR) and Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR), two Generation II reactors commonly used until today, the advanced Generation III reactor AP1000 and the conceptual reactor AP-Th 1000. For closed fuel cycles, the variation of the utilization of the natural resource alongside with the variation of the conversion factor were evaluated, parameterized by the burnup. It was observed that the Generation II reactors use only 1% of the natural resources and, despite technological advances, the Generation III reactor did not show a significant increase in comparison to the former. Although the closed fuel cycle includes recycling the burnt fuel from thermal reactors, it exploits only about 10% of the resources. Major improvements are observed in Fast Breeder Reactors, being able to obtain a use of almost 100% with the increase of the burning and the minimization of losses. Although the feasibility of using thorium as a nuclear fuel has been proven, it would be better used in a closed cycle, as in the self-sustainable Liquid Fluoride Thorium Reactor (LFTR), a Generation IV reactor that can transform the nuclear energy in a sustainable and renewable source of energy.

Keywords: Natural Resources Utilization, Nuclear Reactors, Fuel Cycle, Thorium.

1. INTRODUÇÃO: A REVIEW OF NUCLEAR REACTORS TOWARD A SUSTAINABLE AND RENEWABLE SOURCE OF ENERGY

Most of the commercial nuclear reactors in operation in the world are Generation II reactors, which were built in the 20th century. They use uranium as a primary source of energy and operate in a once-through cycle (OTC). The main representatives of this generation are the Pressurized Water Reactor (PWR), with a share of almost 70% of nuclear power plants in commercial operation, and the Boiling Water Reactor (BWR) and Pressurized Heavy Water Reactor (PHWR), with 15 and 11% participation, respectively (WNA, 2020). The extraction burnup (B), defined as the energy generated in an equilibrium cycle by the input mass of uranium in the reactor, is approximately 30 MWD/kg U for PWR and BWR reactors, and approximately 7 MWD/kg U for PHWR reactors, which uses natural uranium as input feed.

Figure 1 illustrates a typical mass balance for a PWR, with 1000 MWe and $B=30$ MWD/kg U, and an average enrichment of 3% in mass of the input UO_2 , as calculated by the code IAEA VISTA code (IAEA, 2007). We notice that in this reactor the spent fuel is stored in interim storage - usually a pool adjacent to the reactor building - until sent to a final storage (deep repository).

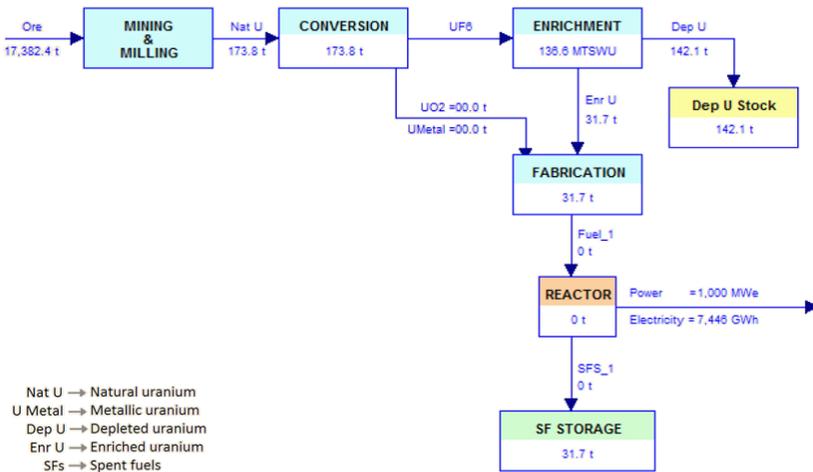


Figure 1 - Mass balance of a typical Generation II PWR (1000 MWe) operating in an OTC (Maiorino, D'Auria and Akbari-Jeyhouni, 2018)

Given the loss of competitiveness of the nuclear industry, the public opinion against nuclear generation, and safety issues, since the beginning of the century the industry has launched new innovative designs to be competitive and safety improvement. These reactors, denominated as Generation III, are already in an advanced stage of projects, many of them in construction and operation, as AP1000, that soon will replace the previous generation (World Nuclear Association, 2017a).

These are large reactors designed to operate with powers in the range of 1000 MWe, although, more recently, compact reactors called Small Modular Reactors (SMR) are also being developed, built to generate up to 300 MWe (IAEA, 2016). Even though they still use the same type of fuel, i.e., UO_2 , and the main characteristics remain almost the same as the reactors of the previous generation, Generation III has advanced improvements related to safety, economy and operational performance, such as:

- Design standardization to expedite licensing, diminishing construction time and implying in reducing the capital cost (economics criteria);
- Simplified design that reduce the operational faults;
- Greater availability increases the time between refueling and, also, the plant lifetime (60 years);
- Minimization of the possibility of core meltdown;
- Passive emergency coolant system;
- Higher burnup rates (60 MWD/kg U) and reduction of waste production;
- Utilization of advanced fixed burnup poison to increase the fuel lifetime.

In addition to the improvements mentioned, there is a small advance in the natural resources utilization by a factor of approximately 2 (IAEA, 2007), as illustrated in the mass balance of Figure 2 for the thermal reactor Advanced PWR (1000 MWe), with a burn up of 60 MWD/kg U and an average enrichment of approximately 4% in mass of ²³⁵U. The operation in an OTC was calculated by VISTA.

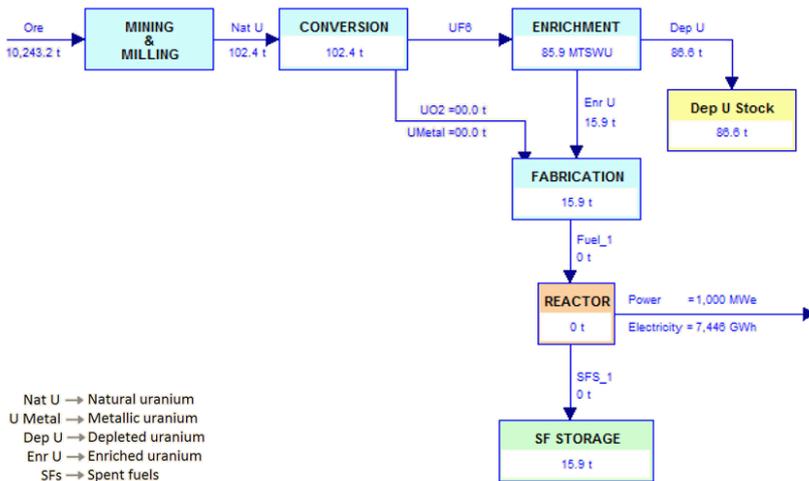


Figure 2 - Mass balance of a Generation III 1000 MWe PWR operating in an OTC (Maiorino, D’Auria and Akbari-Jeyhouni, 2018)

Several countries are working on the reprocessing of spent fuel from thermal reactors aiming at the extraction of uranium and plutonium for MOX (mixed oxide fuel) production in a closed fuel cycle, thus increasing the utilization of the energy content in the natural resources.

Depending on the conversion ratio (C), which is defined as the ratio of the mass of fissile nuclides at the end of cycle (EOC) by the mass of fissile nuclides at the beginning of cycle (BOC), the utilization of natural resources could achieve meaningful results. For thermal reactors, the conversion ratio is less than 1 ($C < 1$), but for a Fast Breeder Reactor (FBR) the conversion ratio is greater than 1 ($C > 1$), i.e., produces more fissile material over time than it consumes and, therefore, turning, in principle, nuclear energy independent of natural resources (renewable). Although the technical feasibility of the FBR has already been demonstrated, it is not yet economically competitive, and it is only now as the Generation IV reactors are being considered (World Nuclear Association, 2017b).

Another option is to utilize thorium as a primary source of energy. Although not fissile, upon thermal neutron interaction ^{232}Th produces ^{233}U , which is one of the best fissile nuclides (number of neutrons produced per neutron absorbed). Its use aims at the reduction of high-level waste (minor actinides), improving the nuclear power sustainability and fuel utilization. Also, thorium is three times more abundant than uranium in nature and the fuel $(\text{U-Th})\text{O}_2$ (mixed thorium-uranium oxide) presents better thermal and physical properties than traditional UO_2 (Ashley et al., 2014; Lindley et al., 2014; Baldova and Shwageraus, 2016).

Several Th/U fuel cycles using thermal and fast reactors were proposed and are still under investigation (OECD, 2015). The technical feasibility to use thorium was proven in PWR Indian Point Reactor, utilizing a core load with $(\text{Th}0.9/\text{U}0.1)\text{O}_2$, with highly enriched U (93w/o) and achieving a maximum burnup of 32 MWD/kg HM. Recently, a study to convert the Advanced PWR AP1000 for $(\text{U-Th})\text{O}_2$ fuel use was performed, called AP-Th 1000. Although the feasibility of the concept was proved, its utilization in an OTC is not attractive, mainly due to the need for use of ^{235}U enriched to 20%. However, by optimizing the production of ^{235}U and conversion ratio, it could operate in a closed fuel cycle as a first step towards using thorium in nuclear reactors (Maiorino, Stefani and D'Auria, 2017).

Despite efforts, controversial issues related to high-level waste solutions (HLW) and the safety of nuclear facilities undermine the political and public acceptance of nuclear energy (Maiorino and Moreira, 2014). With the purpose of making nuclear energy sustainable, a long-term deployment of innovative reactors is underway. These reactors and their associated fuel cycles are old concepts but incorporate modern technological improvements, to become the next generation of

nuclear reactors.

The Generation IV International Forum selected six reactor technologies for further research and development: Very High-Temperature Reactors, Gas, Sodium or Lead Fast Reactors, Molten Salt Reactors, and Supercritical Water Reactor, designed for to be efficient, insurance, burners or breeders and, in some cases, HLW burners (World Nuclear Association, 2017c). Among the concepts of Generation IV reactor, the most promising is the LFTR (Liquid Fluoride Thorium Reactor), a self-sustainable Molten Salt Reactor with a promise of bringing sustainability to fission-generated nuclear energy. The utilization of the natural resources is of 100% since it recycles the fissile ^{233}U online, with zero losses in the process (Sorensen and Dorius, 2011; Serp et al., 2014; Aniza et al., 2015), as illustrated in Figure 3.

This paper, after presenting a brief review of the evolution of nuclear reactors towards sustainability, will present in the next sessions a simplified analysis of the utilization of natural resources (session 2), results (session 3), and conclusions (session 4) on the possibility of maki

How does a fluoride reactor use thorium?

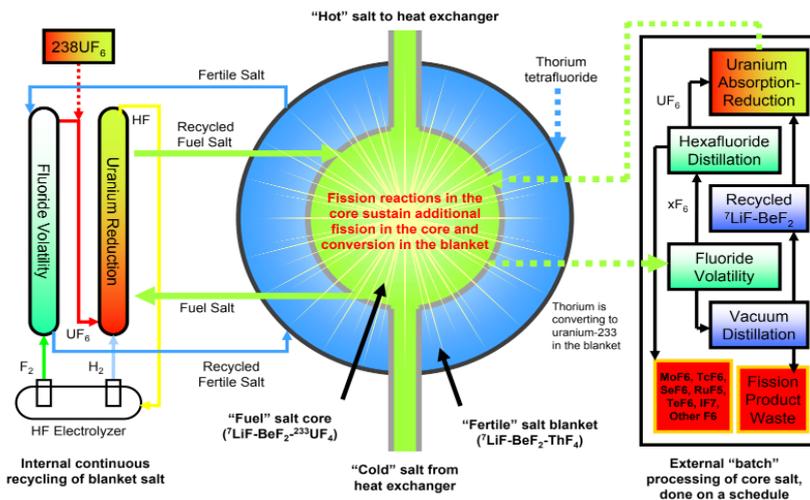


Figure 3 - Schematic view of the LFTR - Liquid Fluoride Thorium MSR (Sorensen and Dorius, 2011)

2. METHODOLOGY

To compare different reactors and their fuel cycle, an important parameter is the efficiency by which they use the energy content in the primary source (uranium or thorium) to generate a secondary source (heat or electricity) for the final use. As demonstrated in Lamarsh and Baratta (2001), the utilization of the natural resource, U , is defined quantitatively as the ratio of the amount of fuel that fissions in a given nuclear system to the amount of natural uranium or thorium input required to provide those fissions - that is

$$U = \frac{\text{Mass of fissile fuel burned}}{\text{Input mass of the primary source}} = \frac{F}{M_a} \quad (1)$$

In open cycles, as those illustrated in Figures 1 and 2, the parameter "burnup", B , gives the energy generated by the fissile material, usually expressed in megawatts day (MWD), by the input mass of enriched uranium (M_e) in the reactor. Given the fact that 1 MWD is approximately 1g of the material burned (Lamarsh and Baratta, 2001), the specific burnup (b) may be defined as the fraction of the input feed mass which is fissionable. Therefore, the mass of fissile fuel burned (F), can be calculated by:

$$F = bM_e \quad (2)$$

To calculate the input feed mass, the loss in the conversion process from the front of the fuel cycle is neglect and considers that the only process which modifies significantly the input mass of natural primary resource is the isotopic enrichment process. In this process, to obtain the mass of enriched uranium at the reactor inlet, with a specified enrichment (x_e), is necessary an input of mass of natural resource given by:

$$M_a = \left(\frac{x_e - x_d}{x_a - x_d} \right) M_e = \xi M_e \quad (3)$$

where x_e , x_d and x_a are the isotopic enrichment of the input fissile, depleted, and natural material, respectively. As assumed in (Lamarsh and Baratta, 2001), in the case of natural uranium, $x_a=0.0071$, and the depleted enrichment depends on the enrichment process, assuming typical values of $0.002-0.003$. Thus, the natural resource utilization can easily be calculated for:

$$U = \frac{b}{\xi} \quad (4)$$

For closed fuel cycles using thermal reactors, in which the conversion ratio is less than 1 ($C < 1$), the calculation of the utilization of the natural resource involves a mass balance in a closed cycle, between fissile and fertile material, and could be given by:

$$U = \frac{b}{\xi[b(1+\alpha)(1-\beta)(1-\gamma)(1-C) + \gamma x_e]} \quad (5)$$

where γ is the fraction of losses in reprocessing and fabrication process, α is a factor which depends on the ratio capture to fission, and β is the fraction of fissions occurring in fissile nuclide originated from the fertile material (^{239}Pu in U-Pu cycles or ^{233}U in U-Th cycles).

Assuming $(1+\alpha)$ $(1-\beta) \sim 1$, i.e., independent of the closed fuel cycle, U-Pu or U-Th, the utilization of the natural resource could be easily calculated knowing the burnup, conversion factor, the enrichment factor of the input uranium, and the losses in the reprocessing and fabrication process.

In closed fuel cycles for Fast Breeder Reactors using U-Pu or U-Th cycles, where $C > 1$, the utilization of natural resources could be calculated by:

$$U = \frac{b}{b(1-\gamma) + \gamma - (\xi - 1)[b(1-\gamma)(C-1) + \gamma x_e]} \quad (6)$$

In the case of a self-sustaining cycle, which depends on the regeneration gain, $G=C-1$, or regardless of the mass of incoming fissile material, $\xi=1$, the use of the natural resource will depend only on burnup and losses, thus:

In closed fuel cycles for Fast Breeder Reactors using U-Pu or U-Th cycles, where $C>1$, the utilization of natural resources could be calculated by:

$$U = \frac{b}{b(1-\gamma) + \gamma} \quad (7)$$

So, neglecting the losses, with $\gamma=0$, the utilization of the natural resource would be 100%, as is the case of the self-sustainable Molten Salt Reactor LFTR.

In order to carry out a study to quantitatively assess the use of the natural resource in open cycles, four reactors were considered: the 2nd generation reactors, HWR and PWR, the AP1000 3rd generation reactor, and the AP-Th 1000 conceptual reactor that, as previously described, is an Advanced PWR using $U_{0.25}Th_{0.75}$. The enrichment and burnup values used for the selected reactors are shown in Table 1.

Table 1 - Enrichment and burnup values for the selected reactors

Reactor	Abbreviation	Generation	Enrichment [w/o]	Burnup [MWD/kg U]	Source
Heavy Water Reactor	HWR	2	0.0071 (Natural)	7.5	Maiorino, D'Auria and Akbari-Jeyhouni, 2018
Pressurized Water Reactor	PWR	2	0.03	30	Maiorino, D'Auria and Akbari-Jeyhouni, 2018
Advanced PWR - AP1000	AP 1000	3	0.034	62	Westinghouse, 2011
Advanced PWR using $U_{0.25}Th_{0.75}$ - AP-Th 1000	AP-Th 1000	Conceptual	0.2	65	Maiorino et al, 2017

For closed fuel cycles, instead of analyzing a specific type of reactor, it was preferred to evaluate the variation of the utilization of the natural resource (U) with the variation of the conversion factor (C) parameterized by the burnup (B).

3. RESULTS AND DISCUSSION

The results for the utilization of natural resources for the selected reactors operating in an OTC, using the methodology previously described and the data in Table 1, are illustrated in Table 2.

Table 2 -Results for the utilization of natural resources (U) for the selected reactors operating in OTC

Reactor	Generation	Utilization of Natural Resource (U)
HWR	2	0.0075
PWR	2	0.0055
AP 1000	3	0.0105
AP-Th 1000	Conceptual	0.0072

Comparing the results obtained between both Generation II reactors, it is observed that the HWR, despite its small burnup, had a better utilization of natural resources compared with PWR. This fact occurs, mainly, because it uses natural uranium as nuclear fuel, and does not need enrichment like PWR. In the AP1000 reactors, although there is an improvement in the utilization of natural resources about 1%, it is not yet significant. For the AP-Th 1000 conceptual reactor, the utilization of natural resources is of the same order of the HWR, and thus not very attractive for operation in an OTC. However, as discussed by reference (Maiorino et al, 2017), since this concept optimizes the production of ^{233}U , it is of interest to operate in a closed fuel cycle of U-Th.

Figure 4 features the variation of the utilization of the natural resources with the variation of the conversion factors for different values of burnup, assuming losses of 2%, and Figure 5 for losses of 1%. From these results, it is observed that even for closed fuel cycles, using thermal reactors with the recycling of plutonium and which the conversion factor is close to 1, as those already used commercially, the utilization of natural resources assumes values close of 10%. Despite a big improvement in the utilization factor, taking advantage of about 10 times more compared to open cycles, the results are still very low.

For Fast Breeders Reactors, expected to operate commercially by this mid-century, depending on the burnup, could achieve values close to 1. For typical flare values of 60 MWD/kg HM, the use of natural resources, even considering high losses (1-2%), will reach values close to 75-80%. For the advanced Generation IV, such as LFTR, in which re-processing online may have practically zero losses, resource utilization could reach values of 100% ($U=1$).

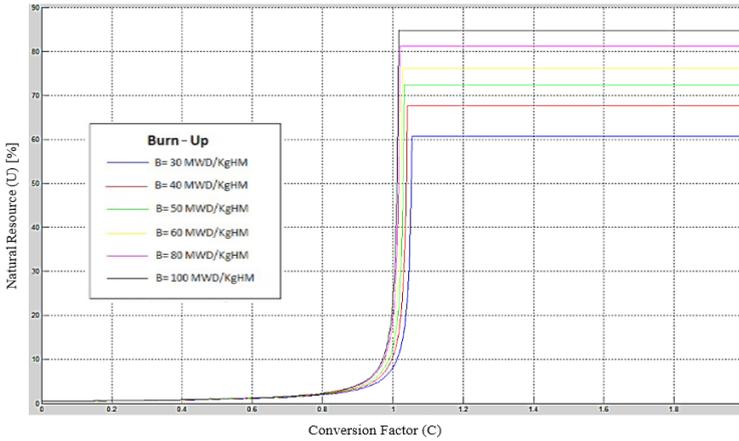


Figure 4 - Natural resources utilization (%) versus Conversion factor parameterized by the burnup for 2% of losses

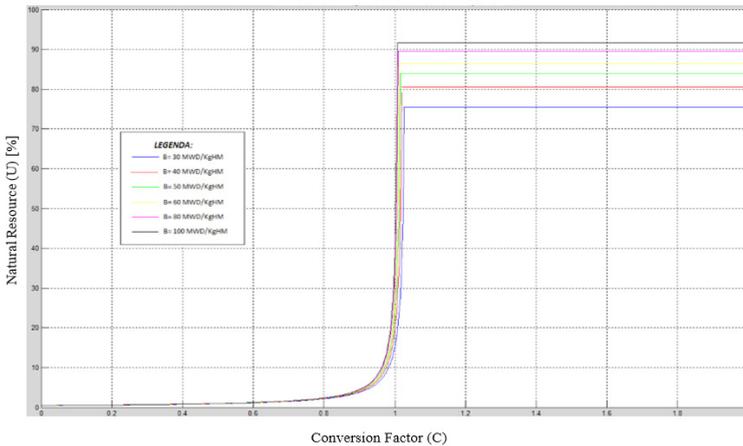


Figure 5 - Natural resources utilization (%) versus Conversion factor parameterized by the burnup for 1% of losses

4. CONCLUSIONS

The evolution of nuclear reactors shows that, with each generation, improvements were developed with the purpose of meliorating safety and efficiency and reducing waste generated during burning. Currently, Generation II thermal reactors, operating in open cycles, have only 1% use of the energy content of the primary source (uranium or thorium). By recycling the spent fuel, burned in the thermal reactors, its utilization in the same type of nuclear reactors has an increase of about 10%. This result shows the importance of taking advantage of an energy resource that would be wasted.

With the near-term deployment of Fast Breeder Reactors, an increase of the burnup and improvements in the recycling processes to minimize the losses, the utilization of natural resources is going to be very close to 100%. For the future, the Generation IV reactors, mainly the Liquid Fluoride Thorium Reactor, which economically enables the use of thorium as a nuclear fuel and allow online reprocessing where losses are minimized, turning the nuclear energy in a sustainable and renewable source of energy.

5. ACKNOWLEDGMENTS

Ms. Leticia C. Gonçalves thanks for the scholarship provided by UFABC to realize this work.

REFERENCES

ANIZA, C. N., et al. Advantages of liquid fluoride thorium reactor in comparison with light water reactor, AIP - Conference Proceedings 1659, 040001, 2015.

ASHLEY, S. F., et al. Fuel cycle modeling of open cycle thorium-fueled nuclear energy Systems, Annals of Nuclear Energy, Nº 69, pp. 314–330, 2014.

BALDOVA, D. F., SHWAGERAUS, E. High Conversion Th-U233 fuel for current generation of PWRs: Part III - Fuel availability and utilization considerations. Annals of Nuclear Energy, Nº 87, pp. 517-526, 2016.

IAEA- International Atomic Energy Agency. Nuclear Simulation Fuel Cycle System VISTA, IAEA-TECDOC 1535, Vienna, 2007.

IAEA- International Atomic Energy Agency. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. A Supplement to: IAEA Advanced Reactors Information System (ARIS), Edition. IAEA, Vienna, 2016.

LAMARSH, J. R.; BARATTA, A. J. Introduction to nuclear engineer. 3. ed. L: Prentice Hall, 2001.

LINDLEY, B. A., et al. Steady-state and transient core feasibility analysis for a thorium-fueled reduced-moderation PWR performing full transuranic recycle, *Annals of Nuclear Energy*, N° 72, pp. 320–337, 2014.

MAIORINO, J. R., MOREIRA, J. M. L. Recycling and Transmutation of Spent Fuel as a Sustainable option for the Nuclear Energy Development, *Journal of Energy and Power Engineering*, v.8, p 1505-1510, 2014.

MAIORINO, J. R., STEFANI, G.L., D'AURIA, F. Utilization of Thorium in PWR Reactors- First Step toward a Th-U Fuel Cycles. The 26th International Conference Nuclear Energy for New Europe (NENE), Bled-Slovenia, 2017.

MAIORINO, J. R., et al. Feasibility to convert an advanced PWR from UO₂ to a mixed U/ThO₂ core – Part I: Parametric studies. *Annals of Nuclear Energy*, N° 102, 47–45, 2017.

MAIORINO, J. R., D'AURIA, F., AKBARI-JEYHOUNI, R. An overview of thorium utilization in nuclear reactors and fuel cycles. The 12th International Conference of the Croatian Nuclear Society. Zadar, June 2018.

OECD. Introduction of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle: Short- to long-term considerations, Nuclear Energy Agency, No. 7224, Paris, 2015.

SERP, J., et al. The molten salt reactor (MSR) in Generation IV: Overview and perspective, *Progress in Nuclear Energy*, N° 77, pp. 308-319, 2014.

SORENSEN, K., DORIUS, K. Introduction to Flibe Energy. 3rd Thorium Energy Alliance Conference (TEAC3). Flibe Energy, Inc., Washington, DC. May 2011.

WESTINGHOUSE. Westinghouse AP1000 Design Control Document, Rev. 19. Westinghouse Electric Corporation, 2011. Available at: <<http://pbadupws.nrc.gov/docs/ML1117/ML11171A500.html>>.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Advanced Nuclear Power Reactors. [2017a]. available at: <<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuelcycle/nuclear-power-reactors/advanced-nuclear-power-reactors.aspx>>.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Fast Neutron Reactors. [2017b]. available at: <<http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/fastneutron-reactors.aspx>>.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Generation IV Nuclear Reactors. [2017c]. available at: <<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuelcycle/nuclear-power-reactors/generation-iv-nuclear-reactors.aspx>>.

WORLD NUCLEAR ASSOCIATION. Nuclear Power Reactors. [2020]. available at: < <https://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>>.

AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE GÁS E ÓLEO NÃO CONVENCIONAL DOS FOLHELHOS NEGROS DA FORMAÇÃO IRATI NA REGIÃO DE GOIÁS E MATO GROSSO, CENTRO-OESTE DO BRASIL

Fastudo Jorge Mabecua¹
Colombo Celso Gaeta Tassinari¹
Egberto Pereira²

¹Universidade de São Paulo

²Universidade do Estado do Rio de Janeiro

DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i2.423>

RESUMO

Esse artigo propõe-se a avaliar o potencial de geração de gás e óleo não convencional (shale gas e shale oil) dos folhelhos negros da Formação Irati na região de Goiás e Mato Grosso, Centro-Oeste do Brasil, através da caracterização de geoquímica orgânica dos folhelhos, determinação do potencial gerador e grau de maturação da matéria orgânica dos folhelhos. Os resultados da pesquisa mostram que os valores de COT variam de 0,04 a 3,52% com média de 1,31%, o que lhes confere um bom potencial gerador de hidrocarbonetos na área de estudo. Foram encontrados valores no pico S2 que variam de 5,13 a 63,13 mg HC/g de rocha para a maioria das amostras estudadas pela pirólise Rock - Eval, conferindo-lhes um bom a excelente potencial petrolífero. Os folhelhos apresentam querogênio do tipo I, II e IV, com predomínio do querogênio do tipo II e IV. Estudos de maturidade térmica da matéria orgânica (querogênio) com base nos valores de Tmax, IH, IP e Ro, indicam seu grau como imaturo (com baixo nível de conversão em hidrocarbonetos) a supermaturo (zona de gás seco). Amostras que alcançaram a janela de geração de gás seco não possuem potencial para geração de hidrocarbonetos, uma vez que apresentam querogênio do tipo IV, que evidencia baixo poder de preservação da matéria orgânica durante o intenso magmatismo ocorrido no Mesozóico (Jurássico/Cretáceo). A maioria das amostras analisadas apresentam bom potencial para shale gas e/ou shale oil, porém as condições de temperatura e pressão durante a diagênese não foram suficientes para a maturação da matéria orgânica nos folhelhos. Os procedimentos metodológicos aplicados para a realização do mesmo basearam-se na pesquisa bibliográfica; trabalho de campo e amostragem; análises

laboratoriais; análise e discussão dos resultados.

Palavras-chave: Shale gas e shale oil, Bacia do Paraná, Folhelhos negros da Formação Irati, Potencial de geração.

ABSTRACT

This paper proposes to evaluate the potential for the generation of Unconventional oil and gas (shale gas and shale oil) from Irati Formation black shales in the region of Goiás and Mato Grosso, Center-West of Brazil, through the characterization of organic geochemistry of shales, determination of the generating potential and degree of maturation of the organic matter of the shales. The results of the research show that the TOC values vary from 0.04 to 3.52% with an average of 1.31%, which gives them a good hydrocarbon potential in the study area. S2 peak values ranging from 5.13 to 63.13 mg HC / g of rock were found for most of the samples studied by Rock - Eval pyrolysis, giving them a good to excellent oil potential. The shales present type I, II and IV kerogen, with predominance of type II and IV kerogen. Thermal maturity studies of organic matter (kerogen) based on the values of Tmax, IH, IP and Ro, indicate their degree as immature (with low conversion level in hydrocarbons) to supermature (dry gas zone). Samples that reached the window of dry gas generation do not have potential for hydrocarbon generation, since they present type IV kerogen, which evidences low preservation power of organic matter during the intense magmatism occurring in the Mesozoic (Jurassic/Cretaceous). Most of the analyzed samples present good potential for shale gas and/or shale oil, but the conditions of temperature and pressure during diagenesis were not sufficient for the maturation of the organic matter in the shales. The methodological procedures applied to carry it out were based on bibliographic research; fieldwork and sampling; laboratory analysis; analysis and discussion of results.

Keywords: Shale gas and shale oil, Paraná Basin, Black shales from the Irati Formation, Potential of generation.

1. INTRODUÇÃO

A região Centro-Oeste do Brasil tem sua economia baseada no setor da agricultura e pecuária. Há outros setores também, como: o extrativismo mineral e vegetal, a indústria, etc. Destaca-se a agricultura como responsável por parte das emissões de Gases do Efeito Estufa (GEE). O dióxido de carbono (CO₂) é um dos GEEs e sua emissão pode ser encontrada no preparo convencional do solo, na combustão de resíduos agrícolas e no consumo de combustíveis fósseis na

produção agrícola. O setor agro-pecuário também é responsável por parte significativa das emissões dos GEEs através do processo digestivo dos rebanhos, o uso de fertilizantes e o desmatamento para abertura de novas áreas para a atividade econômica. A frota de transporte do setor agro-pecuário também faz parte dos maiores emissores do CO₂. Por conta disso, a região Centro-Oeste do Brasil é considerada uma região de emissão de CO₂. Assim, com a relevância que o CO₂ se apresenta nas questões do efeito estufa para a agricultura e pecuária, a descoberta e uso de gás natural nesta região será importante para diminuir emissões de CO₂.

O gás natural, dentre os combustíveis fósseis (carvão e óleo), gera a menor taxa de emissão de dióxido de carbono (CO₂), contribuindo desta forma para a redução do efeito estufa e podendo oferecer uma contribuição imediata à solução das mudanças climáticas globais. O gás natural utilizado na região Centro-Oeste do Brasil era proveniente da Bolívia através do contrato sobre o fornecimento pelo Gasoduto Bolívia – Brasil (GASBOL) para Cuiabá e Corumbá, que venceu no final de 2019 e, em março de 2020 foi renovado em novas bases. Mas considerando a existência de várias usinas termelétricas e de polos industriais na região e a forte dependência no fornecimento de gás natural através do GASBOL, que depende das relações internacionais entre Brasil e Bolívia, do ponto de vista de segurança energética, a avaliação de áreas com potencial para a exploração e produção de shale gas na Bacia do Paraná, nas regiões de Goiás e Mato Grosso seria estratégico para o país em termos econômicos e ambientais. Para além da utilização do gás natural na geração de energia elétrica em usinas termelétricas e no setor industrial, poderia ser planejada a transformação da frota de transporte do setor agro-pecuário, fortemente desenvolvido na região, para gás natural, o que permitiria uma maior eficiência energética e menor emissão de poluentes, contribuindo desta forma na redução da dependência externa e das emissões de CO₂ para a atmosfera.

A Bacia do Paraná é uma grande bacia sedimentar-magmática sobre a porção centro-leste da América do Sul, incluindo parte do território do Brasil, Argentina, Uruguai e Paraguai, totalizando uma área de aproximadamente 1.500.000 km². No Brasil, essa bacia abrange os estados de Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul, Minas Gerais, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Esta bacia teve seu desenvolvimento durante parte das eras Paleozoica e Mesozoica, alojando um registro estratigráfico que compreende um pacote rochoso vulcano-sedimentar de idade entre o Neo-Ordoviciano (± 450 Ma) e o Neocretáceo (± 65 Ma), com uma espessura total máxima em torno dos 7.000 metros. Dentro desse pacote rochoso sedimentar e vulcânico, ocorrem duas potenciais formações de rochas geradoras: Ponta

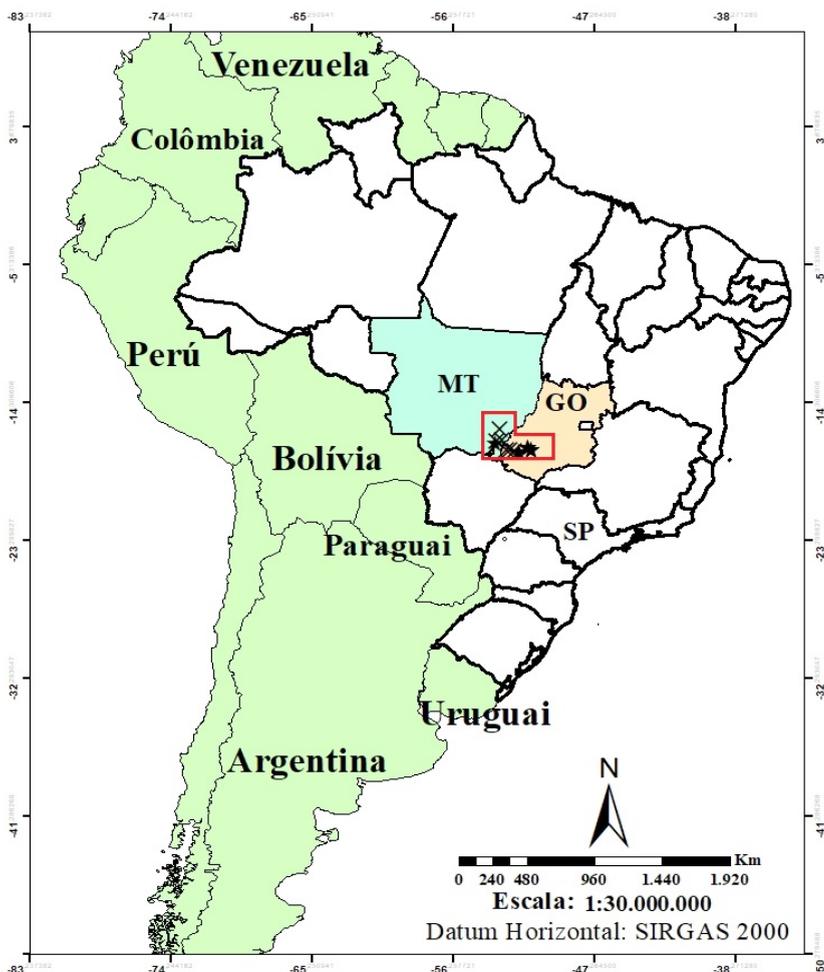
Grossa (devoniano) e Irati (permiano). A Formação Irati, possui características geológicas com potencial para a ocorrência de shale gas e shale oil que não são ainda muito bem conhecidas, o que torna importante o seu conhecimento.

Entre os trabalhos de caracterização geológica realizados no norte da Bacia do Paraná, na região de Goiás e Mato Grosso, destaca-se o trabalho de Anjos (2008), no qual buscou elucidar a gênese dos argilominerais ferromagnesianos dos folhelhos negros e dos níveis de argilito verde da Formação Irati, e suas implicações no contexto deposicional do norte da bacia. Poucos trabalhos de interesse científico e econômico foram efetuados nesta porção da bacia com a finalidade de definir o potencial de ocorrência de hidrocarbonetos, destacando-se apenas o trabalho de Silva (2007), que através da caracterização geoquímica orgânica das rochas geradoras das Formações Irati e Ponta Grossa, investigou o potencial energético para geração de petróleo (óleo ou gás), da Bacia do Paraná. No entanto, apesar do trabalho realizado, o potencial de geração de gás e óleo não convencional (shale gas e shale oil) dos folhelhos negros da Formação Irati na região de Goiás e Mato Grosso ainda não é muito bem conhecido, uma vez que faltam informações, dados geológicos e análises feitas no campo sobre o possível potencial do Irati como geradora de hidrocarbonetos (shale gas e shale oil).

Assim, este trabalho visa avaliar o potencial de geração de gás e óleo não convencional dos folhelhos negros da Formação Irati na Região de Goiás e Mato Grosso, Centro-Oeste do Brasil, para utilização de shale gas na região.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi desenvolvida na porção norte da Bacia do Paraná, na região de Goiás e Mato Grosso, Centro - Oeste do Brasil. A área de estudo situa-se aproximadamente a 1000 km de São Paulo e a 3000 km do Paraguai, do nordeste da Argentina e do norte do Uruguai, abrangendo uma área de aproximadamente 53.705 km² (Figura 1).



Legenda

- ★ Amostras deste trabalho
- × Amostras Silva (2007)
- Brasil
- América do Sul
- GO - Estado de Goiás
- MT - Estado de Mato Grosso
- SP - Estado de São Paulo
- Área de estudo

Figura 1 - Mapa da localização geográfica da área de estudo

O desenvolvimento metodológico desta pesquisa foi realizado de acordo com as seguintes etapas: pesquisa bibliográfica; trabalho de campo e amostragem; análises laboratoriais; análise e discussão dos

resultados. Portanto, a pesquisa bibliográfica consistiu na consulta de várias obras sobre a temática, recurso este que subsidiou a formulação do quadro teórico. Por sua vez, o trabalho de campo foi uma etapa muito importante para a avaliação do potencial para shale gas e shale oil, sendo realizadas as atividades de amostragem e de reconhecimento das relações geológicas na unidade objeto do trabalho. Durante o trabalho de campo no Estado de Goiás foram estudadas as pedreiras de Rio Verde, Sucal e Elba Calcário, e no Estado de Mato Grosso foi estudada a pedreira Mentel. Baseando-se nas características litológicas, um total de nove amostras de folhelhos negros pertencentes ao Membro Assistência da Formação Irati, foram selecionadas para o estudo nas pedreiras Elba Calcário (FE-03, FE-04 e FE-05), Rio Verde (FR-02, FR-05 e FR-06) e Sucal (FS-03, FS-04 e FS-05), conforme a Figura 2. A localização das amostras é apresentada na Figura 4. Já na região de Mato Grosso, na pedreira Mentel, não se fez a coleta de amostras, uma vez que os folhelhos apresentavam-se em estado avançado de alteração intempérica.



Figura 2 - Amostras selecionadas para a pesquisa (FE-03; FE-04; FE-05; FR-02; FR-05; FR-06; FS-03; FS-04; FS-05)

Na Figura 3 é apresentada o posicionamento das amostras coletadas nas colunas estratigráficas estabelecidas para as áreas estudadas.

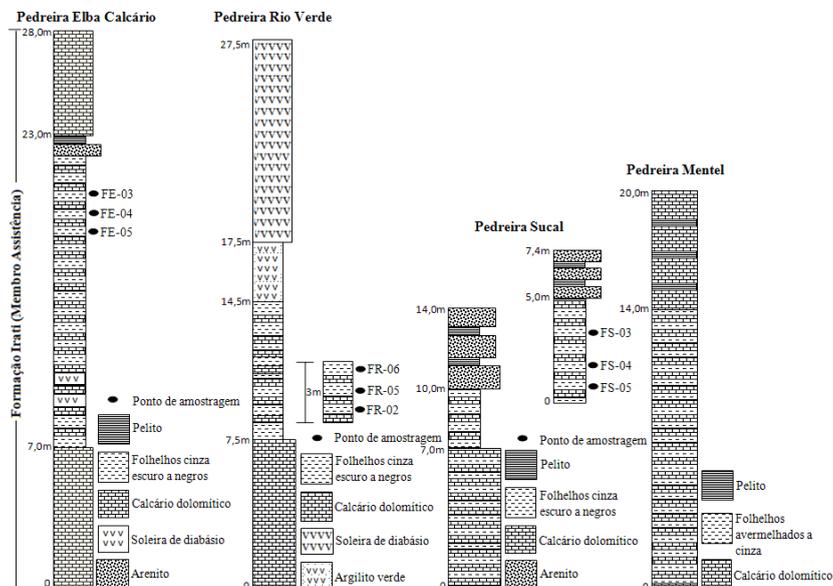


Figura 3 - Coluna litoestratigráfica simplificada da Formação Irati e a indicação dos pontos amostrados nas Pedreiras Elba Calcário (Município de Montevidiu), Rio Verde (Município de Caiapônia), Sucal (Município de Perolândia) e Mentel (Município de Alto Garças)

Análises laboratoriais envolveram os trabalhos de obtenção dos parâmetros geoquímicos orgânicos das amostras selecionadas. As análises de geoquímica orgânica incluíram a determinação dos valores percentuais de carbono orgânico total (COT) e dos dados da pirólise Rock - Eval. As análises de COT e pirólise Rock - Eval foram realizadas no Laboratório de Estratigrafia Química e Geoquímica Orgânica da Universidade Estadual do Rio de Janeiro (UERJ). Os teores de Carbono Orgânico Total (COT) foram determinados por combustão total, em atmosfera inerte a 1350°C no analisador de carbono e enxofre LECO SC - 632. O processo consiste na queima do resíduo insolúvel (RI), e o CO₂ e SO₂ liberados, analisados por meio de um detector de célula de infravermelhos. As massas de COT e enxofre são convertidas para porcentagem de carbono e enxofre com base na massa da amostra analisada. O nível de maturação e tipo de matéria orgânica presente nas rochas foram avaliados utilizando o equipamento de pirólise Rock - Eval 6. Este aparelho é constituído por dois fornos, um de pirólise e outro de combustão (oxidação). O método consiste na destilação de hidrocarbonetos livres e craqueamento de querogênio em um micro-

forno a uma taxa de aquecimento e temperatura de 25°C/min até 650°C, sob atmosfera inerte, para que não ocorra combustão da matéria orgânica. Os parâmetros gerados (medidos) pela pirólise Rock - Eval são S1 (hidrocarbonetos livres gerados na rocha e que encontram-se presentes na rocha geradora, em mg de HC/g de rocha), S2 (hidrocarbonetos derivados pelo craqueamento térmico primário da matéria orgânica, em mg de HC/g de rocha), S3 (quantidade de oxigênio presente no querogênio, em mg de CO₂/g de rocha) e T_{máx} (temperatura máxima para gerar uma quantidade máxima de hidrocarbonetos durante a pirólise, em °C). Foram também calculados os índices de hidrogênio (IH, em mg de HC/g de COT), de oxigênio (em mg de CO₂/g de COT) e de produção (IP), e o potencial genético (PG, em mg de HC/g de rocha). O potencial de hidrocarbonetos ou índice de hidrogênio (IH) é calculado por $[(100 \times S2) / COT]$, e o índice de oxigênio (IO) é definido como $[(100 \times S3) / COT]$, onde S3 é o CO₂ liberado durante a Pirólise. Os IH e IO, foram usados para identificar o tipo de matéria orgânica (qualidade da matéria orgânica), o estado de preservação da matéria orgânica, o ambiente geral de deposição da matéria orgânica, a evolução térmica da matéria orgânica (maturidade térmica da matéria orgânica) e o potencial gerador de hidrocarbonetos (tipos de hidrocarbonetos gerados, ou seja, tipos de hidrocarbonetos que provavelmente serão expelidos pela rocha). O PG é a soma da quantidade de hidrocarbonetos livres (S1) e a quantidade de hidrocarbonetos remanescentes (residuais) que ainda não foi convertida em hidrocarbonetos (S2). Isto pode ser expresso matematicamente como (S1 + S2) medido em mg de HC/g de rocha. O PG foi usado na avaliação do Potencial de Geração das amostras estudadas. O índice de produtividade (IP) ou índice de produção ou razão de transformação é calculado a partir da razão entre os hidrocarbonetos que já geraram (S1) do querogênio e a quantidade total de hidrocarbonetos que pode ser obtida a partir do querogênio (S1+S2), isto é, $S1 / (S1 + S2)$.

A análise e discussão integrada dos resultados foi feita com a inclusão de dados de geoquímica orgânica (COT e pirólise Rock - Eval) e petrográficos (Reflectância da Vitrinita – Ro%) disponíveis na literatura sobre os folhelhos negros da Formação Irati na área de estudo. Esta inclusão possibilitou a análise de um maior número de dados de geoquímica orgânica, bem como a caracterização petrográfica dos folhelhos negros da Formação Irati na área de estudo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Pontos de Amostragem

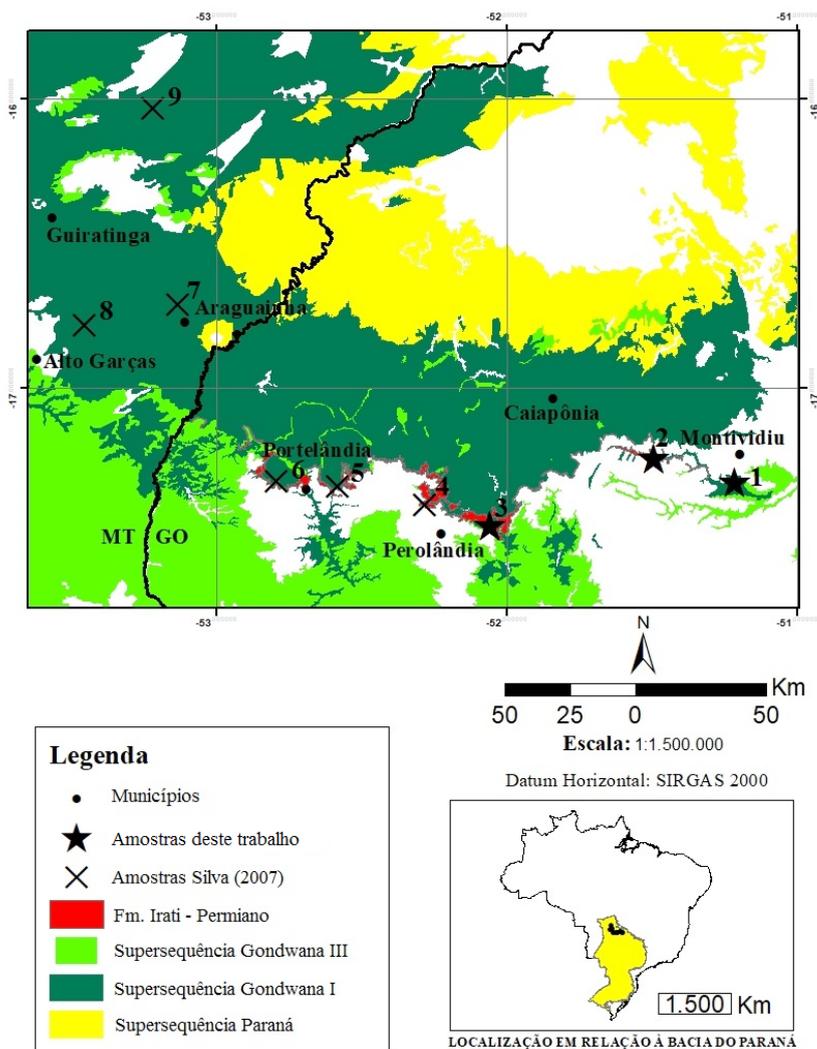


Figura 4: Mapa geológico da área de estudo com a localização dos pontos de amostragem

A Tabela 1 apresenta a descrição completa da localização de todos os pontos de coleta de amostras da Formação Irati na região de Goiás e Mato Grosso.

Tabela 1 - Localização de todos os pontos de amostragem da Formação Irati na região de Goiás e Mato Grosso

Ponto	Amostra	Estado	Município	Local de amostragem	Fonte
1	FE-03	GO	Montevidiu	Pedreira Elba Calcário no Município de Montevidiu (GO)	Este trabalho
	FE-04	GO	Montevidiu	Pedreira Elba Calcário no Município de Montevidiu (GO)	Idem
	FE-05	GO	Montevidiu	Pedreira Elba Calcário no Município de Montevidiu (GO)	Idem
2	FR-02	GO	Caiapônia	Pedreira Rio Verde no Município de Caiapônia (GO)	Idem
	FR-05	GO	Caiapônia	Pedreira Rio Verde no Município de Caiapônia (GO)	Idem
	FR-06	GO	Caiapônia	Pedreira Rio Verde no Município de Caiapônia (GO)	Idem
3	FS-03	GO	Perolândia	Pedreira Sucal em Perolândia (GO)	Idem
	FS-04	GO	Perolândia	Pedreira Sucal em Perolândia (GO)	Idem
	FS-05	GO	Perolândia	Pedreira Sucal em Perolândia (GO)	Idem
4	05-064	GO	Perolândia	Cava de mineração localizada próxima ao Município de Perolândia (GO)	Silva (2007)
5	05-065	GO	Portelândia	Cava de mineração localizada próxima ao Município de Portelândia (GO)	Idem
	05-066	GO	Portelândia	Cava de mineração localizada próxima ao Município de Portelândia (GO)	Idem
	05-067	GO	Portelândia	Cava de mineração localizada próxima ao Município de Portelândia (GO)	Idem
	05-068	GO	Portelândia	Cava de mineração localizada próxima ao Município de Portelândia (GO)	Idem
6	05-069	GO	Portelândia	Cava de mineração localizada próxima ao Município de Portelândia (GO)	Idem
7	05-070A	MT	Araguainha	Afloramento localizado próximo ao Domo de Araguainha (MT)	Idem
	05-070B	MT	Araguainha	Afloramento localizado próximo ao Domo de Araguainha (MT)	Idem
	05-071	MT	Araguainha	Afloramento localizado próximo ao Domo de Araguainha (MT)	Idem
8	05-073	MT	Alto Garças	Cava de mineração localizada próxima ao Município de Alto Garças (MT)	Idem
9	05-079A	MT	Guiratinga	Cava de mineração localizada próximo ao Município de Guiratinga (MT)	Idem
	05-079B	MT	Guiratinga	Cava de mineração localizada próximo ao Município de Guiratinga (MT)	Idem
	05-079C	MT	Guiratinga	Cava de mineração localizada próximo ao Município de Guiratinga (MT)	Idem

3.2 Resultados da Geoquímica Orgânica

Os resultados de COT, teor de enxofre (S%), reflectância da vitrinita (Ro%), e os parâmetros importantes obtidos a partir da pirólise de folhelhos usando Rock - Eval 6, são fornecidos na Tabela 2, e foram usados na avaliação do potencial de geração de hidrocarbonetos na área de estudo.

Tabela 2 - Resultados de COT, Pirólise Rock - Eval e Reflectância da vitrinita das amostras analisadas

Identificação das amostras	COT (%)	S (%)	R.I.	S1 (mg/g)	S2 (mg/g)	S1 + S2 (mg/g)	S3 (mg/g)	Tmax (oC)	IH (mg/g)	IO (mg/g)	IP	Ro (%)	Fonte
FE-03	1,86	0,12	67	1,28	5,95	7,23	0,24	390	319,89	12,90	0,18	n.d.	Este Trabalho
FE-04	1,61	0,11	67	0,99	5,13	6,12	0,20	393	318,63	12,42	0,16	n.d.	Idem
FE-05	1,78	0,12	72	1,23	6,04	7,27	0,22	387	339,33	12,36	0,17	n.d.	Idem
FR-02	0,56	0,05	81	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Idem
FR-05	0,49	0,05	74	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Idem
FR-06	0,48	0,05	76	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Idem
FS-03	3,52	1,50	72	0,00	0,00	0,00	0,14	505	0,00	3,98	0,00	n.d.	Idem
FS-04	3,30	1,65	67	0,00	0,00	0,00	0,10	505	0,00	3,03	0,00	n.d.	Idem
FS-05	3,49	2,10	68	0,00	0,00	0,00	0,00	506	0,00	3,72	0,00	n.d.	Idem
05-064	2,41	n.d.	60	8,41	63,13	71,54	0,04	337	756,45	0,98	0,12	0,45	Silva (2007)
05-065	0,13	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Idem
05-066	0,19	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Idem
05-067	0,08	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Idem
05-068	0,49	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,75	Idem
05-069	2,08	n.d.	64	0,39	0,05	0,44	0,19	262	9,92	37,67	0,89	n.d.	Idem
05-070A	0,04	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Idem
05-070B	0,16	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Idem
05-071	0,31	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	Idem
05-073	0,69	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,81	Idem
05-079A	0,95	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,51	Idem
05-079B	3,31	n.d.	64	1,58	10,11	11,69	0,65	388	368,98	23,72	0,14	0,56	Idem
05-079C	0,98	n.d.	64	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,59	Idem

n.d.= não determinado

3.2.1 Análise do Carbono Orgânico Total e Resíduo Insolúvel

A cor cinza escuro a preto das amostras de folhelho da Formação Irati estudadas indica alto conteúdo de matéria orgânica. Os resultados obtidos pela análise do COT (Figura 5) apresentam valor máximo de 3,52%, permitindo caracterizar um bom potencial de geração dos hidrocarbonetos para as amostras analisadas.

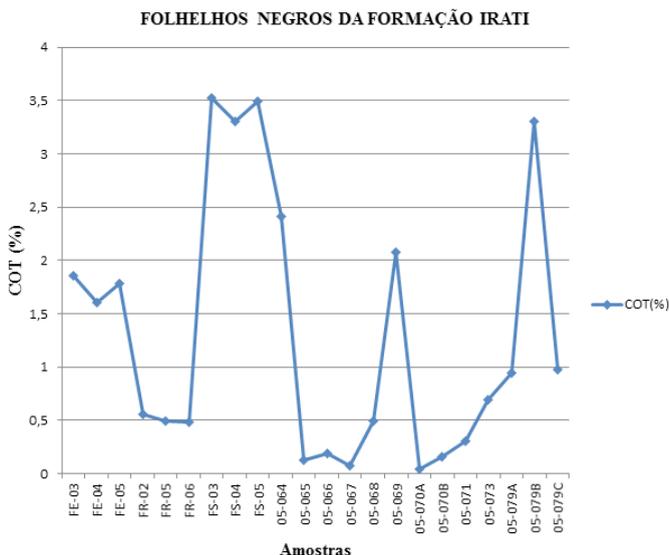


Figura 5 - Distribuição dos valores de Carbono Orgânico Total (COT%) para as amostras coletadas e dados adquiridos de amostras de folhelhos negros da Formação Irati na região de Goiás e Mato Grosso (vide Tabela 2 para fonte das amostras)

Os teores de COT nas amostras analisadas (Figura 5) variam de 0,04 a 3,52%. Amostras submetidas à pirólise Rock - Eval (com COT > 1%) apresentam valores no intervalo entre 1,61 a 3,52%, revelando um bom potencial de geração dos hidrocarbonetos para as amostras analisadas.

Geralmente, a variação no conteúdo de COT é causada devido a variações climáticas durante a deposição dos sedimentos, decomposição, efeito de intemperismo e/ou maturação térmica com o soterramento.

Assim, os valores de COT consideravelmente baixos podem estar relacionados a processos de diagênese pós-deposicionais, que com o aumento da pressão e temperatura com profundidade de soterramento, causaram alteração térmica da matéria orgânica que pode ter levado à variação (diminuição) do COT, ou seja, a perda de carbono orgânico pode ter sido devido à maturação, geração de hidrocarbonetos e expulsão. Estudos anteriores sugeriram fortemente que tais diferenças se devem à conversão de matéria orgânica em hidrocarbonetos no subsolo. Por exemplo, os valores da reflectância da vitrinita (R_o) de 0,75% e 0,81% para as amostras 05-068 e 05-073 (Tabela 2), revelam um querogênio maduro, ou seja, esses folhelhos alcançaram o pico de geração de óleo. Isso pode justificar o fato dessas amostras apresentarem valores de COT consideravelmente baixos, 0,49% e 0,69%, respectivamente.

Além disso, na área de estudo, os valores de COT consideravelmente baixos também podem ser explicados em função do intenso magmatismo ocorrido durante o Mesozóico (Jurássico/Cretáceo), que se traduziu na bacia por espessas coberturas de lavas, redes de diques e vários níveis de soleiras de diabásio, que promoveram o craqueamento da matéria orgânica diminuindo seus valores em relação às quantidades originais.

Os dados obtidos na análise do resíduo insolúvel, RI (%), apresentam valores acima de 60%, representando folhelhos (Figura 6).

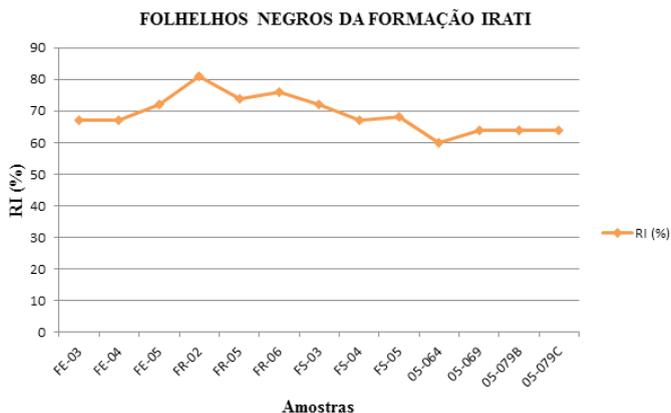


Figura 6 - Distribuição dos valores do RI (%) para as amostras de folhelhos negros da Formação Irati analisadas

3.2.2 Análise da Pirólise Rock - Eval e COT (%)

- Avaliação do Grau de Preservação da Matéria Orgânica

O ambiente empobrecido em oxigênio ou anóxico, e de baixa energia é o melhor meio de preservação da matéria orgânica. Da análise do teor de enxofre (Figura 7), observa-se que os valores mais baixos de enxofre (S%) da ordem de 0,05 % correspondem aos de COT mais baixos, entre 0,48 a 0,56%, sugerindo amostras que possivelmente estiveram expostas a oxidações, sendo mais provável que tenham sofrido craqueamento térmico devido à aproximação de corpos intrusivos de Jurássico/Cretáceo.

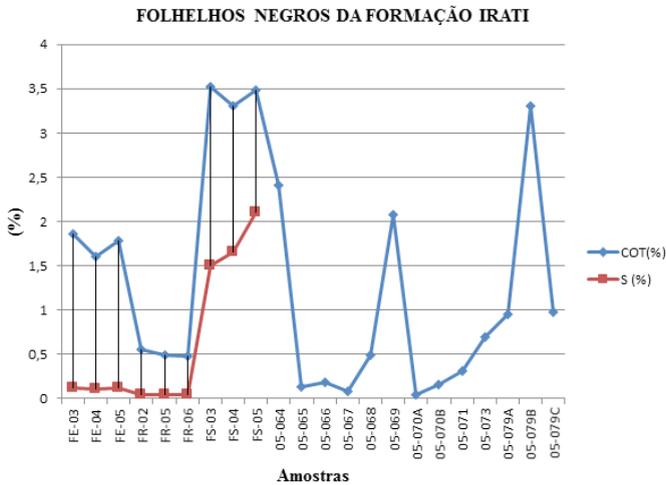


Figura 7 - Distribuição dos valores de S (%) e COT (%) para as amostras de folhelhos negros da Formação Irati analisadas

A Figura 8 demonstra o gráfico gerado, relacionando os índices de hidrogênio (IH) com os teores de carbono orgânico total (COT%). O gráfico permitiu avaliar o estado de preservação da matéria orgânica relacionando os teores de carbono orgânico total com potencial de geração de hidrocarbonetos.

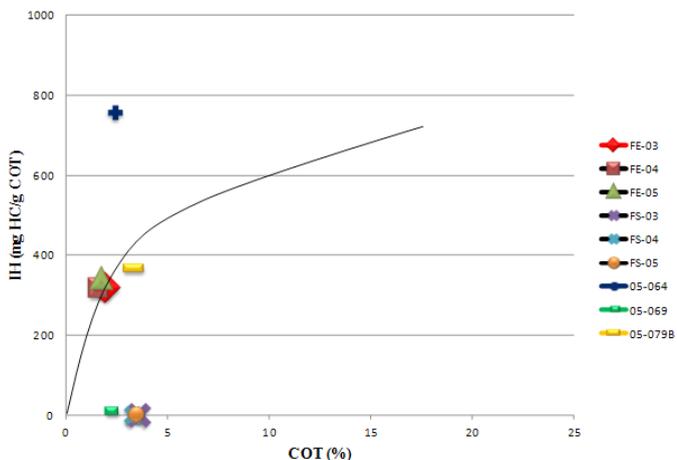


Figura 8 - Relação entre os teores de carbono orgânico total (COT%) e os valores de índice de hidrogênio (IH) para as amostras de olhelhos negros da Formação Irati analisadas

Amostras de folhelhos negros com boas condições de preservação da matéria orgânica, ou seja, amostras com matéria orgânica como tendo sido depositada em ambiente redutor (ambiente anóxico) tendem a apresentar valores de índice de hidrogênio superiores conforme crescem os teores de carbono orgânico total (FE-03, FE-04, FE-05, 05-064 e 05-079B). Nessas amostras os valores mais altos de COT tendem a coincidir com valores mais altos de IH. Por outro lado, observa-se uma relação inversa: amostras que a matéria orgânica esteve possivelmente exposta a oxidações por craqueamento térmico (FS-03, FS-04, FS-05 e 05-069), influenciadas termicamente por intrusões de diabásio de Jurássico/Cretáceo, apresentam valores muito baixos de IH (valores iguais ou próximos a zero) embora tenham valores altos de teores de carbono orgânico total, indicando más condições de preservação da matéria orgânica, e conseqüentemente não tem nenhum potencial para geração de óleo ou gás. Além disso, valores iguais ou próximos à zero de IH dessas amostras, indicam um estágio avançado de maturação da matéria orgânica, especificamente a supermaturação, caracterizada por degradação dos hidrocarbonetos gerados nas fases anteriores (fácies xisto-verde).

- Avaliação do Potencial Genético (PG)

Valores de potencial genético e avaliação da rocha geradora da Formação Irati são mostrados na Tabela 3. O PG médio das amostras

estudadas é de 11,59 mg de HC/g de rocha variando de zero a 71,54 mg de HC/g de rocha. De modo geral, a maioria das amostras estudadas (FE-03, FE-04, FE-05, 05-064 e 05-079B) apresentam um bom e excelente potencial genético $[(S1+S2) > 6 \text{ mg HC/g de rocha}]$, isto é, são rochas geradoras com bom a excelente potencial de geração de hidrocarbonetos. O potencial genético máximo de 71,54 mg de HC/g de rocha foi observado na amostra 05-064 pertencente a cava de mineração localizada próxima ao Município de Perolândia, e representa um excelente potencial genético. As amostras da Pedreira Sucal (FS-03, FS-04 e FS-05) e da cava de mineração localizada próxima ao Município de Portelândia (05-069) apresentam um mau potencial genético $[(S1+S2) \sim 0,00 \text{ mg HC/g de rocha}]$, e conseqüentemente não podem gerar nem óleo e nem gás. O gráfico entre PG e COT ilustra que as amostras têm um potencial de geração de hidrocarbonetos mau, bom a excelente (Figura 9).

Tabela 3 - Potencial de geração das amostras estudadas

Amostras	PG (mg HC/g de rocha)			Avaliação
	Mínimo	Máximo	Média	
Folhelhos negros da Formação Irati	0,00	71,54	11,59	Bom

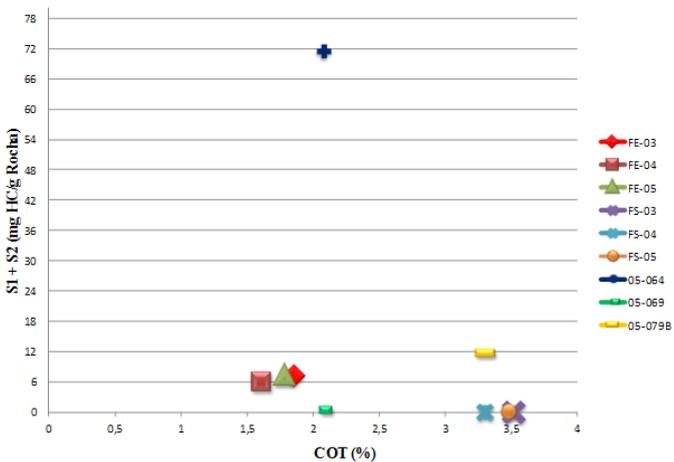


Figura 9 - Gráfico do Potencial Genético (PG) versus COT(%)

- Avaliação do Potencial Residual (S2)

O parâmetro S2 (mg HC/g de rocha) da pirólise Rock - Eval, é utilizado como estimativa do potencial de geração de hidrocarbonetos a partir do craqueamento do querogênio. Esse parâmetro apresenta valores que variam de 0,00 a 63,13 mg HC/g de rocha. As amostras FE-03, FE-04, FE-05 e 05-079B mostram valores que variam de 5,13 a 10,11 mg HC/g de rocha, indicando um bom potencial petrolífero. A amostra 05-064 apresenta um excelente potencial petrolífero, com o maior valor de S2 encontrado, 63,13 mg HC/g de rocha. Nas amostras FS-03, FS-04, FS-05 e 05-069 foram encontrados valores de S2 que variam de 0,00 a 0,05 mg HC/g de rocha, sendo considerado como um mau potencial petrolífero (Tabela 2).

O gráfico entre os teores de carbono orgânico total (COT%) e os valores do potencial gerador residual (S2) da pirólise Rock - Eval foi interpretado para determinar o potencial residual de geração de hidrocarbonetos das amostras analisadas (Figura 10). Em geral, como reflexo de boa preservação da matéria orgânica no sistema, quanto maior é o teor de COT, maior é a quantidade de hidrocarbonetos (óleo ou gás) que a rocha analisada teria condição de produzir através da diagênese caso fosse submetida às condições de temperatura e soterramento adequadas para a maturação da matéria orgânica (S2). Neste contexto, a maioria das amostras estudadas (FE-03, FE-04, FE-05, 05-064 e 05-079B) mostram essa tendência de proporcionalidade direta e linear, onde a quantidade de hidrocarbonetos (óleo ou gás) gerados (S2) aumenta com o aumento do teor de COT, e consequentemente apresentam bom (FE-03, FE-04, FE-05 e 05-079B) a excelente (05-064) potencial residual de geração de hidrocarbonetos. No entanto, amostras cuja matéria orgânica esteve possivelmente exposta a oxidações (FS-03, FS-04, FS-05 e 05-069) por influência térmica das intrusões de diabásio de Jurássico/Cretáceo, não apresentam nenhum potencial residual para geração de óleo ou gás devido ao provável craqueamento térmico da matéria orgânica em consequência do calor proveniente destas intrusões ígneas.

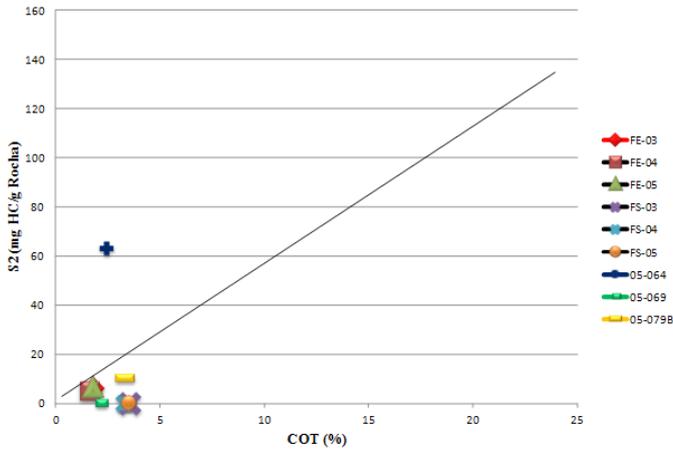


Figura 10 - Relação entre COT (%) e S2 para as amostras de folhelhos negros da Formação Irati analisadas

O gráfico reflete mau, bom a excelente potencial residual de geração de hidrocarbonetos.

- Tipo de Matéria Orgânica (Qualidade da Matéria Orgânica)

A partir dos dados das análises obtidas nas amostras de folhelhos negros da Formação Irati nas Pedreiras de Elba Calcário (FE-03, FE-04 e FE-05), Sucal (FS-03, FS-04 e FS-05), e nas cavas de mineração localizadas próximas aos Municípios de Perolândia (05-064), Portelândia (05-069) e Guiratinga (05-079B), foi possível identificar a existência do querogênio do tipo I, II e IV, e destacar o predomínio do querogênio do tipo II e IV (Figura 11).

Os folhelhos negros da Formação Irati da Pedreira Elba Calcário (FE-03, FE-04 e FE-05) e da cava de mineração localizada próximo ao Município de Guiratinga (05-079B), exibem querogênio do tipo (II), caracterizando um bom potencial para a geração de óleo e gás, ao passo que os folhelhos negros coletados na Pedreira Sucal (FS-03, FS-04 e FS-05) e pertencentes a cava de mineração localizada próxima ao Município de Portelândia (05-069), mostram um querogênio do tipo IV, que é caracterizado por matéria orgânica residual altamente oxidada e retrabalhada, muito pobre em hidrogênio e muito rico em oxigênio, e sem nenhum potencial para geração de óleo ou gás.

Os valores nulos de IH dos folhelhos negros da Formação Irati das amostras FS-03, FS-04 e FS-05 (exceto a amostra 05-069) mostram que o tipo de matéria orgânica (MO) presente (Tipo IV) não pode

das amostras FS-03, FS-04 e FS-05 (exceto a amostra 05-069) mostram que o tipo de matéria orgânica (MO) presente (Tipo IV) não pode

Apenas uma amostra pertencente a cava de mineração localizada próxima ao Município de Perolândia (05-064) mostrou um querogênio do tipo I, composto por folhelhos ricos em matéria orgânica, com um teor maior de hidrogênio em relação ao II, e pobre em oxigênio, revelando um bom potencial para óleo.

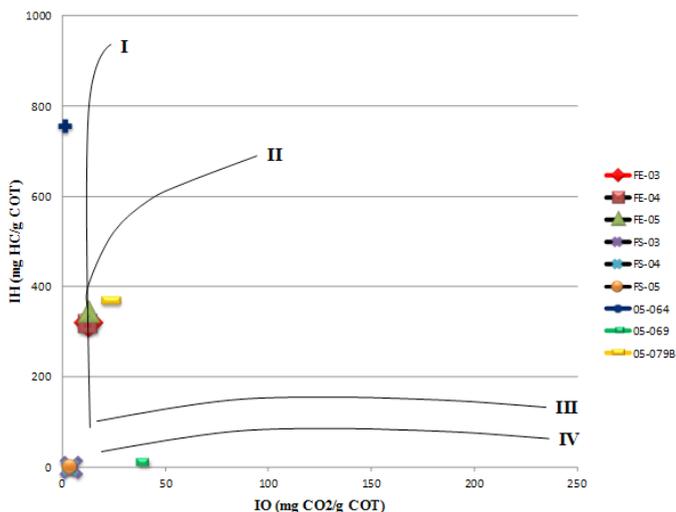


Figura 11 - Diagrama de Van Krevelen modificado, indicando o tipo de querogênio para as amostras de folhelhos negros da formação Irati analisadas (*05-064, 05-069 e 05-079B amostras de Silva, 2007)

A presença do querogênio do tipo I, II e IV foi identificada. A presença do querogênio do tipo I e II com predominância do querogênio do tipo II indica uma origem marinha planctônica com alguma contribuição de algas, ou seja, confirma que a matéria orgânica da Formação Irati foi depositada em ambiente de mar restrito-evaporítico ou ambiente de golfo.

O predomínio do querogênio do tipo IV, caracterizado por apresentar valores de IH inferiores em relação aos de IO, é uma evidência de que parte da matéria orgânica da Formação Irati esteve provavelmente exposta a oxidações/retrabalhamentos por craqueamento térmico, muito tempo após a deposição da matéria orgânica, mas durante a sua maturação, em consequência da proximidade dos corpos intrusivos de Jurássico/cretáceo.

- Determinação da Maturidade Térmica da Matéria Orgânica (Análise da Evolução Térmica da Matéria Orgânica)

A determinação da maturidade térmica da matéria orgânica (querogênio) foi possível integrando e relacionando valores de Tmax (temperatura máxima de pirólise em que ocorre a taxa máxima de geração de hidrocarbonetos pelo craqueamento do querogênio), índice de hidrogênio (IH), índice de produção (IP) e valores da reflectância da vitrinita (Ro%).

- IH versus Tmax

A Figura 12 relaciona os valores de Tmax e índice de hidrogênio (IH) combinado com os valores da reflectância da vitrinita (Ro%), possibilitando definir o grau de maturação da matéria orgânica e tipos de querogênio.

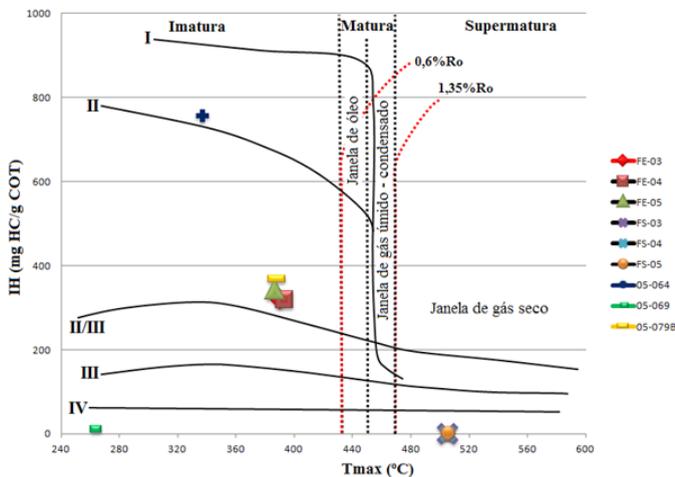


Figura 12 - Relação entre IH e Tmax combinado com os valores de Ro

O gráfico mostra o tipo de querogênio e faixa de maturidade das amostras da Formação Irati analisadas. Graus de maturação baseados em Boruah e Ganapathi (2015) e limites de temperaturas de janelas de óleo e gás baseados em Peters e Cassa (1994).

Para as amostras de folhelhos negros da Formação Irati da Pedreira Elba Calcário (FE-03, FE-04 e FE-05) e das cavas de mineração localizadas próximas aos Municípios de Perolândia (05-064), Portelândia

(05-069) e Guiratinga (05-079B), o estado de evolução térmica do querogênio apresenta-se no grau de maturação imaturo, que corresponde à temperatura máxima inferior a 435°C; enquanto que as amostras da Pedreira Sucal (FS-03, FS-04 e FS-05) apresentam valores de T_{\max} acima de 470°C, que corresponde ao intervalo da fase supermatura para a geração de hidrocarbonetos.

As amostras de folhelhos negros da Formação Irati da Pedreira Elba Calcário (FE-03, FE-04 e FE-05) e da cava de mineração localizada próximo ao Município de Guiratinga (05-079B) exibem querogênio do tipo II imaturo, o que significa que estes folhelhos não alcançaram a geração de óleo e gás (não alcançaram a “janela de óleo e gás”), ao passo que, os folhelhos negros coletados na Pedreira Sucal (FS-03, FS-04 e FS-05) e pertencentes a cava de mineração localizada próxima ao Município de Portelândia (05-069), mostram um querogênio do tipo IV supermaturo e imaturo, respectivamente, mas sem nenhum potencial para geração de óleo ou gás. Por sua vez, a amostra de folhelhos negros da Formação Irati pertencente à cava de mineração localizada próxima ao Município de Perolândia (05-064) exhibe querogênio do tipo I imaturo, o que significa que estes folhelhos também não alcançaram a geração de óleo (não alcançaram a “janela de óleo”).

Tal estado de maturação das amostras é corroborado pelos valores da reflectância da vitrinite ($R_o\%$) medidos. Os resultados obtidos de 0,45% da reflectância da vitrinite para amostra 05-064 e 0,56% para amostra 05-079B, correspondem ao intervalo da fase imatura da geração de hidrocarbonetos. Tais resultados vêm corroborar com aqueles da análise da temperatura máxima, que apresentou valores de 337°C e 388°C, respectivamente, mostrando que se encontram predominantemente na fase imatura de geração.

- T_{\max} versus IP

Os valores encontrados de IP para as amostras FE-03, FE-04, FE-05, 05-064 e 05-079B variam de 0,12 a 0,14, denotando grau maturo (início da janela de geração de óleo), no entanto apresentam valores de $T_{\max} < 435^\circ\text{C}$, o que lhes confere o grau imaturo. Por sua vez, a amostra 05-069 apresenta valor de IP de 0,89, que lhe coloca no final do grau maturo (janela de gás úmido - condensado) ou supermaturo (janela de gás seco), no entanto apresenta T_{\max} de 262°C, o que lhe confere o grau imaturo. Esta relação pode ser devido a presença de betumen impregnado nas amostras, que interfere no valor real da maturação térmica das rochas, alterando o valor do IP, e colocando-as no início da janela de geração de óleo, na janela de gás úmido - condensado ou janela de gás seco, respectivamente.

Por outro lado, observa-se que as amostras FS-03, FS-04 e FS-05 apresentam valores de IP igual a zero denotando grau imaturo para essas amostras, no entanto essas amostras apresentam os maiores valores de Tmax ($T_{max} > 470^{\circ}\text{C}$), colocando - as no grau supermaturo (janela de gás seco). Esta relação revela que as amostras alcançaram temperaturas favoráveis à geração de gás seco ($T_{max} > 470^{\circ}\text{C}$), mas que o tipo de querogênio (Tipo IV) não permitiu a geração de hidrocarbonetos ($IP = 0$).

Desta forma, a relação entre o parâmetro Rock - Eval essencial (T_{max}) e o parâmetro Rock - Eval calculado (IP) contribuiu na avaliação da maturidade térmica da matéria orgânica nos folhelhos (Figura 13).

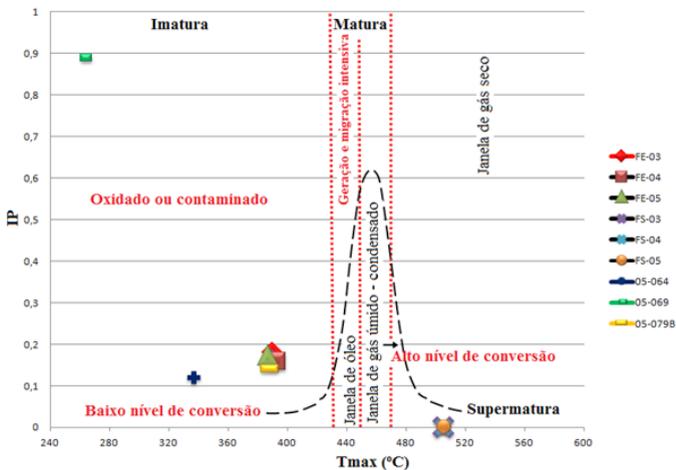


Figura 13 - Maturidade do querogênio baseada em Tmax e IP - Limites de temperaturas de janelas de óleo e gás baseados em Peters e Cassa (1994)

Esta figura corrobora com a Figura 12, e mostra que o estado de evolução térmica da matéria orgânica (querogênio) dos folhelhos negros da Formação Irati na região de Goiás e Mato Grosso apresenta-se no grau de maturação imaturo e supermaturo, sendo que a maioria das amostras analisadas pela pirólise Rock - Eval (FE-03, FE-04, FE-05, 05-064, 05-069 e 05-079B) apresentam querogênio imaturo com baixo nível de conversão, ou seja, não alcançaram a geração de óleo e/ou gás (exceto a amostra 05-069 que apresenta querogênio do tipo IV, sem nenhum potencial para geração nem de óleo e nem de gás).

As restantes amostras (FS-03, FS-04, FS-05) apresentam querogênio do tipo IV supermaturo, mas sem nenhum potencial para geração de gás seco.

Desta análise, nota-se que os folhelhos negros coletados na Pedreira Sucas (FS-03, FS-04 e FS-05), são os únicos que alcançaram condições de temperatura favorável à geração de gás seco (zona supermatura), no entanto a matéria orgânica residual contida nesses folhelhos, possivelmente, foi altamente craqueada termicamente em consequência da proximidade dos corpos intrusivos de Jurássico/Cretáceo. Por essa razão, esses folhelhos exibem querogênio do tipo IV, que não gera nem óleo e nem gás.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS E CONCLUSÕES

Os folhelhos apresentam valores de COT que variam de 0,04 a 3,52% com média de 1,31%, o que lhes confere um bom potencial gerador de hidrocarbonetos na área de estudo.

Conforme o parâmetro S2 (mg HC/g de rocha) da pirólise Rock - Eval, a maioria das amostras estudadas (FE-03, FE-04, FE-05, 05-064 e 05-079B) apresentam bom a excelente potencial petrolífero, exceptuando as amostras FS-03, FS-04, FS-05 e 05-069 cuja matéria orgânica esteve possivelmente exposta a oxidações por influência térmica das intrusões de diabásio de Jurássico/Cretáceo.

Os folhelhos caracterizam-se por apresentar querogênio do tipo I, II e IV, com predomínio do querogênio do tipo II e IV.

Estudos de maturidade térmica da matéria orgânica (querogênio) com base nos valores de Tmax, IH, IP e Ro%, indicam que as amostras de folhelhos negros da Formação Irati na área de estudo apresentam o seu grau como imaturo (com baixo nível de conversão em hidrocarbonetos) a supermaturo (zona de gás seco).

Amostras de folhelhos que alcançaram a janela de geração de gás seco (FS-03, FS-04, FS-05) não possuem potencial para geração de hidrocarbonetos, uma vez que apresentam querogênio do tipo IV, resultante do baixo poder de preservação da matéria orgânica durante o intenso magmatismo ocorrido no Mesozóico (Jurássico/Cretáceo).

Verifica-se que a maioria das amostras analisadas (FE-03, FE-04, FE-05, 05-064 e 05-079B) dos folhelhos negros da Formação Irati na região de Goiás e Mato Grosso, Centro-Oeste do Brasil, apresentam bom potencial para gás e/ou óleo não convencional (shale gas e/ou shale oil), porém o grau de maturação térmica é imaturo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP- Financiadora de Estudos e Projetos, pelo apoio financeiro à pesquisa através do Projeto FINEP - Convênio 01.14.0215.00 – GASBRAS.

O primeiro autor agradece ao Instituto de Bolsas de Estudo (IBE) da República de Moçambique, pela bolsa de Mestrado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABELHA, M. Potencial exploratório brasileiro para gás de folhelho. Rio de Janeiro: ANP, 2016. Disponível em: http://www.anp.gov.br/wwwanp/images/pdf/apresentacao_Marina_out16.pdf. Acesso em: 01 nov. 2017.

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. Disponível em: http://www.anp.gov.br/brasil-rounds/round10/arquivos/seminarios/STA_4_Bacia_do_Parana_ingles.pdf. Acesso em: 01 nov. 2017.

_____. BACIA DO PARANÁ. Sumário Geológico e Setores em Oferta. Rodrigo Morelato. Superintendência de Definição de Blocos – SDB. 2017.

ANDRADE, S. M.; CAMARÇO, P. E. N. Sequências sedimentares pré-carboníferas dos flancos nordeste da Bacia do Paraná e sudoeste da Bacia do Parnaíba e suas possibilidades uraníferas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 32. Salvador. Anais ... São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 1982. v. 5, p. 2132-2144.

ANJOS, C.W.D.D. Factores Condicionantes na Gênese dos Argilominaerais dos Folhelhos negros e Pelitos Associados da Formação Irati no Norte da Bacia do Paraná. 2008. 101 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Geociências. Universidade de Brasília, Brasília, 2008.

ARAÚJO, L.M., TRIGÜIS, J.A., CERQUEIRA, J.R. Avaliação do efeito térmico das intrusivas ígneas nas rochas geradoras da Formação Irati/ Membro Assistência. Curitiba: PETROBRAS/E&P/NEXPAR, 1996. Relatório Interno, 139 p.

ARAÚJO, L.M. Análise da Expressão Estratigráfica dos Parâmetros de Geoquímica Orgânica e Inorgânica nas Sequências Depositionais do Irati. Tese de Doutorado em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 307 p.

ARTUR, P. C., SOARES, P. C. Paleoestruturas e Petróleo na Bacia do Paraná. Revista Brasileira de Geociências, v.32, n.4, p. 433-448, 2002.

BARKER, C. *Origem, Composition and Properties of Petroleum. Developments in Petroleum Science*, v.17, Part. A, p.11-45, Chapter 2. 1985.

BASTO, J. M. P. *Problemática do Shale Gas: da estimação de reservas aos métodos de desenvolvimento e produção*. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica e Minas). Instituto Superior Técnico Lisboa.

BEREICÔA, E. L. *Roteiro geológico: sistemas petrolíferos da bacia do paraná*. Universidade federal fluminense. Instituto de geociências. Departamento de geologia e geofísica marinha. Curso de graduação em geofísica. 2016. Trabalho apresentado ao curso de graduação em Geofísica da Universidade Federal Fluminense como parte da disciplina de Projeto Final II e requisito para obtenção do título de Bacharel em Geofísica. NITERÓI-RJ.

BORUAH, A.; GANAPATHI, S. Organic richness and gas generation potential of Permian Barren Measures from Raniganj field, West Bengal, India. Department of Geology, The Maharaja Sayajirao University of Baroda, Vadodara 390 002, India. *J. Earth Syst. Sci.*, v. 124, n.5, p. 1063–1074, 2015.

BRIZI, F. et al. Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: Comparison between natural gas and biogas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38, 193–211, 2014.

CAMPOS, L. D. et al. Barra Bonita: a primeira acumulação comercial de hidrocarboneto da Bacia do Paraná. *Brazilian Petroleum Institute, Rio Oil & Gas Conference*, Rio de Janeiro, Brazil, IBP17198, 1998. Atas. 7p.

CAPUTO, M. V.; CROWELL, J. C. Migration of glacial centers across Gondwana during Paleozoic Era. *Geological Society of America Bulletin*, Boulder, 96, p. 1020-1036, 1985.

_____.et al. Late Devonian and Early Carboniferous glacial records of South America. In: FIELDING, C. R.; FRANK, T. D.; ISBELL, J. L. (Ed.). *Resolving the Late Paleozoic ice age in time and space*. Boulder: Geological Society of America, p. 161-173, 2008. Special Paper, 441.

CARDOTT B.J. *Data Relevant to Oklahoma Gas Shales*. SWS/EMD Shale Gas Workshop, 2006.

CHAMLEY, H. *Clay Sedimentology*. Verlag Berlin: Ed. Springer, 1989. 623pp.

CHARPENTIER, R., COOK, T. A. *USGS Methodology for Assessing Continuous Petroleum Resources*. U.S. Geological Survey Open-File Report 2011-1167. 2011.

COELHO, A.C.M.Q. et al. Avaliação do potencial gerador de petróleo da seção Aptiana-Albiana da Bacia de Sergipe, integrando análises palinofaciológicas e dados de geoquímica orgânica. *Brazilian Journal of Geology*, São Paulo, vol.44, no.4, 2014.

CRAIN, E.R. *Crain's petrophysical handbook*. 2010. Disponível em: <http://www.spec2000.net/>. Acesso em: 10 jan. 2017.

CRIVELLANI, K. Análise de parâmetros geoquímicos de rochas, óleos e betumes em afloramentos das Formações Irati e Pirambóia na borda Leste da Bacia do Paraná. São Paulo: Universidade Federal da Bahia, 2016.

DAEMON, R. F.; FRANÇA, A. B. Sedimentos do Westfaliano (Carbonífero Médio) na Formação Lagoa Azul, Grupo Itararé. In: SIMPÓSIO SOBRE CRONOESTRATIGRAFIA DA BACIA DO PARANÁ, 1., 1993, Rio Claro. Resumos. Rio Claro: Universidade Estadual Paulista, 1993. p. 36.

_____ et al. Biopaleogeografia da Bacia do Paraná. Simpósio sobre o Siluro – Devoniano da Bacia do Paraná (Ponta Grossa). *Boletim de Resumos Expandidos*, v. 55, n. 71, 1996.

_____ et al. Bioestratigrafia do Neopaleozóico da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 24, 1970. Brasília. Anais. p. 359–412.

DA COLLINA, É.K. A contribuição dos biomarcadores na geoquímica marinha. Monografia, Universidade Federal de Rio Grande do Sul, 2011.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *Review of Emerging Resources: U.S. Shale Gas and Shale Oil Plays*. Washington: EIA, 2011. Disponível em: <https://www.eia.gov/analysis/studies/usshalegas/pdf/usshaleplays.pdf>. Acesso em: 04 set. 2017.

_____. *World Shale Gas and Shale Oil Resource Assessment Methodology*. U.S. Energy Information Administration. U.S. Department of Energy. Advanced Resources International, Inc., 2013. Disponível em: https://www.adv-res.com/pdf/A_EIA_ARI_2013%20World%20Shale%20Gas%20and%20Shale%20Oil%20Resource%20Assessment.pdf. Acesso em: 04 set. 2017.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *World shale resource assessments*. EIA, 2015. Disponível em: <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas/>. Acesso em: 27 jun. 2018.

ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. *Natural Gas Explained. Natural Gas Imports and Exports*. EIA, 2018. Disponível em: https://www.eia.gov/energyexplained/index.php?page=natural_gas_imports. Acesso em: 26 Jun. 2018.

ESPITALIÉ, J. Use of Tmax as a maturation index for different types of organic matter, comparison with vitrinite reflectance. In: Burruss, J. (Ed.). Thermal Modeling in Sedimentary Basins. Editions Technip, Paris, 1986. p. 475-496.

ESPITALIÉ J. et al. Methode rapide de caracterisation des roches mères, de leur potential petrolier et de leur degré d'évolution. Revue de l'Institut Français du petrole, v. 32, p.32 – 42, 1977.

_____. La pyrolyse Rock-Eval et ses applications. Revue de l' Institute Français du Pétrole, v. 40, p.563-579, 1985.

FERREIRA, E.J.E.C.B. Caracterização de fluidos hidrotermais e suas fontes em bacias sedimentares com potencial petrolífero: aplicação inovadora de análises isotópicas na exploração de petróleo e gás. Universidade de São Paulo, 2017.

FILHO, J.V. de L. et al. Geologia e Recursos Minerais do Estado de Goiás e Distrito Federal. Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Escala 1:500.000. Unb - Universidade de Brasília Instituto de Geociências, 1999.

FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (Parte 1). Boletim de Geociências da PETROBRAS, Rio de Janeiro, v. 2, n.24, p. 147-191, 1988.

FRANTZ, J.H., et al., 2005. Operators re-discover shale gas value. Relatório: E&P Management. Schlumberger.

GILMAN, J. & ROBINSON, C., 2011. Success and failure in shale gas exploration and development: attributes that make the difference. Adaptado de uma apresentação oral de uma conferência da AAPG International em Calgary, Alberta, 12-15 de Setembro.

GLASER et al. Seeking the Sweet Spot: reservoir and completion quality in organic shales. Oilfield Review Winter 2013/2014: 25, no. 4, 2014. Disponível em: http://www.slb.com/~media/Files/resources/oilfield_review/ors13/win13/02_sweet_spot.pdf. Acesso em: 01 nov. 2017.

GRADSTEIN, F. M.; OGG, J. G.; SMITH, A. G. A geologic time scale. Cambridge: Cambridge University Press, 2004. 610 p.

HACHIRO, J. O subgrupo Irati (Neopermiano) da Bacia do Paraná. Universidade de São Paulo, 1997.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. World Outlook Energy, 2015. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2015.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2018.

_____. World Outlook Energy, 2017. Disponível em: <https://www.iea.org/weo2017/>. Acesso em: 04 ago. 2018.

JACOMO, J.C.P. Os Hidrocarbonetos não Convencionais: Uma Análise da Exploração do Gás de Folhelho na Argentina á luz da Experiência Norte-Americana. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

JARVIE, D.M. Total Organic Carbon (TOC) analysis. In: Merrill R.K. (ed.) Source, migration processes, and evaluation techniques. Treatise of Petroleum Geology, American Association of Petroleum Geologists, Tulsa, 1991. p. 113-118.

_____. Geochemical characteristics of the devonian Woodford Shale. 2008. Oklahoma Shale Gas Conference 22 October.

_____. Shale resource systems for oil and gas: Part 1—Shale-gas resource systems. AAPG Memoir 97. The American Association of Petroleum Geologists, 2012.

LANGE, F. W., PETRI, S. The Devonian of the Paraná Basin. In: BIGARELLA, J. J. (Ed.). Problems in Brazilian Devonian geology. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1967. p. 5-55. (Boletim Paranaense de Geociências, 21/22).

LUCZYNSKI, E. Petróleo e Gás Natural. São Paulo, Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de, 2015. Módulo I.

MAGOON, L. B., and DOW, W. G. The Petroleum System: Chapter 1: Part I. Introduction. 1994. p. 3-24.

MARTÍN, V.P. DRXWin & CreaFit 2.0: graphical and analytical tools for powder xrd patterns. Powder Diffraction, 14, p.70-73, 1999.

MATEUS, A., RICCOMINI, C., FERREIRA, E.J.E.C.B., TASSINARI, C.C.G. Maturação permotriássica e os vários estágios de migração de hidrocarbonetos na Formação Assistência (Subgrupo Irati), Bacia do Paraná: implicações para os modelos exploratórios. Brazilian Journal of Geology, v.44, n.3, p. 355-360, Sept. 2014.

MCCARTHY et al. Basic Petroleum Geochemistry for source rock evaluation. Oilfield Review 23, n. 2, p. 32-43, 2011.

MELLO, M. R. Characterization of natural gas: a physical multivariable approach and its applications in maturity and migration estimate. The American Association of Petroleum Geologists Bulletin, V. 84, n. 8, Aug., p. 1152–1172, 2000.

MENDES, J.C., FÚLFARO, V.J., AMARAL, S.E., LANDIN, P.M.B. A Formação Irati (Permiano) e fácies associadas. Rev. Bras. Geocienc. V.15, p. 13–43, 1996.

MEYERS, P.A., PRATT, L.M., NAGY, B. Introduction to geochemistry of metalliferous black shales. *Chemical Geology*, 99: vii-xi. 1992.

MILANI, E. J. Evolução tectono-estratigráfica da Bacia do Paraná e seu relacionamento com a geodinâmica fanerozóica do Gondwana sul-ocidental. 1997. 2 v. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

MILANI, E. J.; CATTO, E. Petroleum Geology of the Paraná Basin, Brazil. In: AAPG, INTERNATIONAL CONFERENCE & EXHIBITION, 1998. Rio de Janeiro. Abstracts. p. 442-443.

MILANI, E. J., ZALÁN P. V. The Geology of Paleozoic Cratonic Basins and Mesozoic Interior Rifts of Brazil. In: AAPG INTERNATIONAL CONFERENCE & EXHIBITION, 1998. Rio de Janeiro, Brazil. Proceedings.

_____. An outline of the geology and petroleum systems of the Paleozoic interior basins of South America. *Episodes*, v.22, n.3, p. 199-205, 1999.

MILANI, E.J., FRANÇA, A.B., SCHNEIDER, R.L. Bacia do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v.8, n.1, p. 69-82, 1994.

MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A. Sedimentary Basins of South América. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. Tectonic Evolution of South America. Rio de Janeiro, In-Fólio Produção Editorial. p.389-449, 2000.

MILANI, E.J. Comentários sobre a origem e a evolução tectônica da Bacia do Paraná. In *Geologia do Continente Sul-Americano: Evolução da Obra de Fernando Flavio Marques de Almeida*. Beca, p. 265-279, 2004.

_____. et al. Rochas geradoras e rochas-reservatório da Bacia do Paraná, faixa oriental de afloramentos, Estado do Paraná. *Boletim de Geociências da Petrobras* v.15, n.1, p. 135-162, 2006.

_____. et al. Bacia do Paraná. B. Geoci. Petrobras, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265-287, 2007.

MILES, J.A. Illustrated glossary of petroleum geochemistry. Oxford Science Publication, Oxford University Press, New York, 1989. 137p.

MILLOT, G. Géologie des Argiles: Altération, Sédimentologie, Géochimie. Ed. Masson et Cie, Paris, 1964. 499pp.

MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA. Boletim mensal de acompanhamento da indústria de gás natural. Secretaria de Petróleo, Gás Natural e Combustíveis Renováveis. Departamento de Gás Natural. 2017. Ed. n.º 122.

MONTEIRO, J.V.F.; SILVA, J.R.N.M. Gás natural aplicado à indústria e ao grande comércio. São Paulo: Edgar Blucher, 2010.

MONTEIRO, P. Petróleo e Gás. Geologia do Petróleo. Aula 4. 2011. Disponível em: <http://pt.slideshare.net/Pe-drujr/aula-4-petrleo-prof-pedro-ibrapeq-7966464>. Acesso em: 20 Jan. 2017.

MOORE, D.M., REYNOLDS Jr., R.C. X-ray diffraction and the identification and analysis of clay minerals. New York, Oxford University, 1997. 377 p.

MOULIN, D.S. Análise do potencial de desenvolvimento de shale gas no Brasil a partir da experiência dos EUA nesta atividade. Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2014.

MUSSA, D., CARVALHO, R.G., SANTOS, P.R. Estudo estratigráfico em ocorrências fossilíferas da Formação Irati de São Paulo, Brasil. Bol. Inst. Geocienc. USP 11, 142–149, 1980.

OELOFSEN, B., ARAÚJO, D.C. Paleocological implications of the distribution of mesosaurid reptiles in the Permian Irati sea (Paraná Basin), South America. Rev. Bras. Geocienc. 13, p. 1–6, 1983.

OLIVEIRA, V.A.A. Caracterização de Reservatórios Não Convencionais/Tight Gas. Universidade Federal Fluminense, 2014.

OZGUL, E. Geochemical assessment of gaseous hydrocarbons: mixing of bacterial and thermogenic methane in the deep subsurface petroleum system, Gulf of Mexico continental slope. Master (Thesis) Middle East Technical University, 2002.

PADULA, V.T. Estudos geológicos da Formação Irati, sul do Brasil. Boletim Técnico da Petrobrás, v.11, n.3, p. 407 – 430, 1968.

PETERS, K.E., CASSA, M.R. Applied source rock geochemistry. In: L. B. Magoon and W. G. Dow (Eds.), The petroleum system -from source to trap. AAPG Memoir, v.60, p.93-120, 1994.

PETERS, K.E.; MOLDOWAN, J.M. The Biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments. 1. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1993. 363p.

PETERS, K.E.; WALTERS, C.C.; MOLDOWAN, J.M. The Biomarker guide: interpreting molecular fossils in petroleum and ancient sediments. 2.ed. v.1, New Jersey: Cambridge University, 2005.

PETROLEUM GEOSCIENCE TECHNOLOGY. Geologia do Petróleo. 2010. Disponível em https://albertowj.files.wordpress.com/2010/03/geologia_do_petroleo.pdf. Acesso em 09 jul. 2017.

PINTO, I.D., ADAMI-RODRIGUES, K. pygocephalomorph crustacean. New data and interpretations with emphasis on Brazilian and South African forms. Pesquisas 23, p.41–50, 1996.

PREMAOR, E. et al. Palinologia da Formação Irati (Permiano Inferior da Bacia do Paraná), em Montividiu, Goiás, Brasil. 2006. Laboratório de Palinologia, Departamento de Paleontologia e Estratigrafia; Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Av. Bento Gonçalves, 9500. CEP 91.540-000. Porto Alegre, RS, Brasil.

PRETTO, F.A. Estudo da osteologia craniana e de aspectos microestruturais da dentição de *stereosternum tumidum* cope 1886, um mesossaurídeo da formação Irati (Artinskiano), Bacia do Paraná. Porto Alegre. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências, 2012.

RAMOS, V. A.; JORDAN, T. E.; Allmendinger, R. W.; Mpodozis, C.; Kay, J. M.; Cortés, J. M.; Palma, M. Paleozoic terranes of the central Argentine-Chilean Andes. *Tectonics*, Washington, v. 5, n. 6, p. 855-880, 1986.

RIBEIRO, W.C. Gás “de xisto” no Brasil: uma necessidade? Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Universidade de São Paulo, São Paulo/SP, Brasil. *Estudos avançados*, v. 28 n.82, 2014.

ROCHA, H.V. Estudo geológico do potencial de exploração e produção de gás natural não convencional na bacia do Paraná: avaliação da viabilidade no abastecimento da usina termoeletrica de Uruguaiana (RS). Universidade de São Paulo, 2016.

ROSTIROLLA, S. P. et al. Reativação de paleo-lineamentos durante a evolução da Bacia do Paraná-o exemplo do alto estrutural de Quati-guá. *Brazilian Journal of Geology*, v.30, n. 4, p. 639-648, 2008.

SANTOS, R.V. et al. Shrimp U-Pb zircon dating and palynology of bentonitic layers from the Permian Irati Formation, Paraná Basin, Brazil. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, 70910-900 Brasília, DF, Brazil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Geociências, Departamento de Paleontologia e Estratigrafia. CP 15.001, 91.509-900, Porto Alegre, RS, Brazil. PETROBRAS/EP-EXP/ST/MSP. Av.Chile, 65-sala 1301, 20031-912, Rio de Janeiro, RJ, Brazil, 2006.

_____. Geochemical and thermal effects of a basic sill on black shales and limestones of the Permian Irati Formation. Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Campus Darcy Ribeiro, Asa Norte, 70910-900 Brasília, 2009.

SCHULZ, H.M. & HORSFIELD, B. Rock matrix as reservoir: mineralogy & diagenesis. *AEON*, Cape Town South Africa. 2010.1 March.

SCHLUMBERGER Oilfield glossary, 2011. Disponível em: <http://www.glossary.oilfield.slb.com/>. Acesso em: 10 ago. 2017.

SEDLÁKOVÁ, I. Shale gas mikulov marl potential. Masaryk University. Faculty of Science. Department of Geology, 2011.

SCHNEIDER, R.L. et al. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, SBG. Anais, pp. 41–65, 1974.

_____. Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: XXVIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA. Porto Alegre. Anais, vol.1: 41 – 66, 1976.

SILVA, C.G.A. Caracterização geoquímica orgânica das rochas geradoras de petróleo das formações Irati e Ponta Grossa da Bacia do Paraná. 2007. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Química. Programa de Pós-Graduação em Química. Porto Alegre, 2007.

SILVA, E.A.N. Rochas Geradoras e seus Biomarcadores: uma revisão bibliográfica com ênfase nas bacias da costa leste Brasileira. 2011. Monografia apresentada ao curso de Geologia, do Instituto de Geociências, Universidade Federal da Bahia, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Geologia.

SMITH, N. et al. UK data and analysis for shale gas prospectivity. 2010. UK Shale Gas -British Geological Survey.

SPEIGHT, J. Shale Gas Production Processes. UK, USA. Gulf Professional e ELSEVIER 2013.

SWANI, A. The Role of Technology in Managing Uncertainty in Shale Gas. 2010. Schlumberger presentation 26 November.

TAIOLI, F. Gás de Folhelho no Brasil – Perspectivas e Dúvidas. In: REUNIÃO ANUAL DA SBPC, 65, 2013, RECIFE, PE. Anais. Recife, 2013.

TEIXEIRA, W. et al. Decifrando a Terra. São Paulo, 1. Ed. Oficina de Textos, 2000.

TISSOT, B.P & WELTE, D.H. Petroleum Formation and Occurrence. Second Revised and Enlarged Edition. Berlin Heidelberg NewYork Tokyo, 1984.

THOMAS, J.E. Fundamentos de Engenharia de Petróleo. 2.ed. Editora Interciência, 2004.

THOMAZ FILHO, A., MIZUSAKI, A.M.P. & ANTONIOLI, L. Magmatismo nas bacias sedimentares brasileiras e sua influência na geologia do petróleo. Revista Brasileira de Geociências. V.38, p. 128-137, 2008. Supplement 2.

TRIGUIS, J.A.; SOUZA, E.S. Aplicação da geoquímica na indústria do petróleo e no meio ambiente impactado. UFPE, 2009.

TYSON, R.V. Sedimentary organic matter: organic facies and palynofacies. London, Chapman & Hall, London, 1995. 615 p.

ULIANA, M. A.; BIDDLE, K. Mesozoic-Cenozoic paleogeographic and geodynamic evolution of southern South America. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 18, p. 172-190, 1988.

VIEIRA, P.C., MEZZALIRA, S. & FERREIRA, F.J.F. Mesossaurídeo (*Stereosternum tumidum*) e crustáceo (*Liocaris huenei*) no Membro Assistência da Formação Irati (P) nos municípios de Jataí e Montividiu, Estado de Goiás. Rev. Bras. Geoc. 21, p. 224 – 235, 1991.

WEAVER, C.E. Clays, Muds, and Shales. Ed. Elsevier, New York, 1989. 819pp.

ZALÁN, V. et al. Bacia do Paraná. In: G.P.Raja & E.Milani (cords.). Origem e evolução de bacias sedimentares. Petrobrás. P.135-168, 1990.

_____ et al. The Paraná Basin, Brazil. In: LEIGHTON, M. W.; KOLATA, D. R.; OLTZ, D. F.; EIDEL, J. J. (Ed.). Interior cratonic basins. Tulsa: American Association of Petroleum Geologists. p. 681-708, 1990. (AAPG. Memoir, 51).

COMPATIBILIZAÇÃO DAS CLASSIFICAÇÕES DO IBGE E DO MME PARA A PROJEÇÃO DA DEMANDA DE ENERGIA DOS SEGMENTOS INDUSTRIAIS ENERGO-INTENSIVOS

Roberta Ferreira Carrijo Sharma¹
Orlando Frederico José Godoy Bordoni¹
Sérgio Valdir Bajay¹

¹Universidade Estadual de Campinas

DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i2.455>

RESUMO

Este trabalho apresenta uma proposta de compatibilização entre a Classificação Nacional das Atividades Econômicas (CNAE), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e a classificação do Balanço Energético Nacional (BEN), do Ministério das Minas e Energias (MME), necessária para se construir séries de valores adicionados dos setores e segmentos industriais energo-intensivos. Aplicando-se o modelo integrado de Equilíbrio Geral e Desagregação Estrutural (MEG-DES) a essa base de dados obtêm-se projeções da demanda industrial de energia. À guisa de ilustração da aplicação dessa metodologia, são apresentadas projeções da demanda de energia do setor químico e de seus segmentos para o ano de 2026, em cenários de crescimento econômico e de consumo energético tendenciais e alternativos.

Palavras-chave: Compatibilização de classificações, Base de dados econômicos e energéticos, Projeção de demanda de energia.

ABSTRACT

This paper presents a matching proposal between the National Classification of Economic Activities (CNAE) of the Brazilian Institute of Geography and Statistics (IBGE) and the National Energy Balance (BEN) of the Ministry of Mines and Energy (MME), which is required to build up value added sequences for the energy-intensive industrial sectors and their branches. Applying the General Equilibrium and Structural Disaggregation integrated model (GE-DES) to this database, industrial energy demand forecasts are obtained. In order to illustrate the application of this methodology, energy demand forecasts for the

chemical sector and its branches are presented for the year 2026, within the scope of business as usual and alternative scenarios for economic growth and energy consumption.

Keywords: Classification compatibility, Economic and energy databases, Projection of energy demand.

1. INTRODUÇÃO

Séries históricas de dados econômicos e energéticos são necessárias para análises e projeções da demanda de energia dos diversos setores da economia. No Brasil, os principais dados econômicos são coletados, tratados e divulgados pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e as principais informações energéticas nacionais são divulgadas pelo Ministério das Minas e Energia (MME), na forma de balanços energéticos.

Um problema ao se trabalhar com diferentes bases de dados é o de se obter uma compatibilização entre elas. Cada instituição apresenta os seus dados com a classificação que lhe parece mais adequada, utilizando diferentes setores econômicos, como nos casos do IBGE e MME. Este trabalho apresenta uma proposta de compatibilização para estas diferentes classificações, que permitem trabalhar com as informações disponibilizadas tanto pelo IBGE, como pelo MME, de forma conjunta.

Este artigo também mostra uma classificação própria resultante dessa compatibilização, a classificação Eficind, utilizada na obtenção de séries de valores adicionados dos segmentos energo-intensivos da indústria. Essas séries possibilitaram a associação de informações econômicas e energéticas no banco de dados construído no projeto Eficind (Bajay et al., 2015), desenvolvido pelo Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE) da Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), junto com mais cinco universidades brasileiras, com financiamento da FINEP, para avaliar potenciais de eficiência energética em segmentos da indústria e do setor de serviços.

Na segunda parte do artigo apresenta-se uma aplicação utilizando esse banco de dados econômicos e energéticos para a obtenção de projeções da demanda de energia em setores e segmentos industriais da classificação Eficind. Nessa aplicação é utilizado o modelo integrado de Equilíbrio Geral e Desagregação Estrutural (MEG-DES), desenvolvido pelos autores deste artigo, apresentado na tese de doutorado de Sharma (2018), e em artigo que este mesmo grupo tem preparado para publicação.

O modelo MEG-DES possibilita uma análise top-down em seu módulo de equilíbrio geral (MEG), que aborda todos os setores da economia e garante a consistência intersetorial e macroeconômica, e uma

abordagem bottom-up em seu módulo de Desagregação Estrutural (DES), baseado em Sharma (2009), que consegue captar as características tecnológicas das cadeias produtivas e utilizá-las para a projeção da demanda de energia.

2. AS BASES DE DADOS UTILIZADAS

A coleta e compilação dos principais dados da economia brasileira são feitos pelo IBGE, o qual realiza um trabalho de síntese apresentando tabelas com os dados nacionais, divulgadas anualmente através de publicações. Em 2007, o IBGE apresentou uma nova metodologia de estimação do Sistema de Contas Nacionais (SCN), com referência em 2000, o SCN2000 (IBGE, 2007). Uma série contemplando dados até 2009, utilizando esta metodologia, foi publicada posteriormente. Ela caracterizou-se pela amplitude das atualizações introduzidas, pois realizou a mudança de um sistema que vinha sendo estimado basicamente através da extrapolação por índices de volume e preço para um novo sistema que é referenciado por fontes anuais, que permitem representar melhor as variações das séries do SCN. Essa metodologia evita os vieses característicos do uso de índices de volume e preço por períodos demasiado longos.

Recentemente, em 2015, o IBGE lançou uma nova forma de divulgação dos dados implantando uma nova série do SCN, com referência em 2010, isto é, o SCN2010 (IBGE, 2015). Os dados de 2011 a 2014 apresentados pelo IBGE ainda são preliminares, sujeitos a atualizações posteriores.

O IBGE divulga no SCN, a TRU - Tabela de Recursos e Usos, a PIA- Pesquisa Industrial Anual, a CEI- Conta Econômica Integrada dentre diversas outras pesquisas. Para montar a base de dados que compatibiliza os dados do IBGE com os dados do BEN, usa-se neste trabalho estas três pesquisas mencionadas, que são explicadas adiante.

2.1 A tabela de recursos e usos

Um dos principais objetivos da TRU é a descrição dos fluxos de bens e serviços, caracterizando os aspectos básicos do processo de produção, a estrutura de insumos e de produção por atividade e a geração da renda. Dois elementos são fundamentais na construção da TRU, as atividades, envolvendo o conjunto dos processos de produção e de demanda, e os produtos, envolvendo o conjunto de bens e serviços produzidos e demandados. A TRU descreve a circularidade dos fluxos econômicos de acordo com o tripé produção-renda-demanda: a demanda gera produção, que gera renda, que gera demanda.

A TRU é divulgada em diversas agregações, sendo que o SCN2000 apresenta desagregações em 12 setores¹, 43 setores e 56 setores, com séries de 1996 a 2009 para as duas primeiras, onde os anos de 1996 a 1999 foram obtidos por retroposição e de 2000 a 2009 para a terceira. No SCN2010 as desagregações são apresentadas em 12 setores, 20 setores, 51 setores e 68 setores, sendo que apenas para a desagregação em 51 setores foi publicada, até agora, uma série de 2000 a 2014, onde os dados até 2009 foram obtidos por retroposição e os dados de 2010 a 2014 são preliminares.

Embora o desenvolvimento da metodologia de obtenção de valores adicionados e a sua utilização no modelo MEG-DES também tenham sido realizados com base na TRU de 43 setores do SCN2000, optou-se por usar, neste artigo, na apresentação desta metodologia, a série de 2000 a 2013 da desagregação da TRU em 51 setores do SCN2010.

2.2 A pesquisa industrial anual

A PIA é realizada através de amostras de segmentos industriais da economia. Esta pesquisa começou a ser divulgada em 1967, mas foi a partir de 1981 que ela começou a ser elaborada através de uma amostragem probabilística de estabelecimentos. As informações de bens e serviços são levantadas segundo a nomenclatura da Lista de Nomenclatura das Indústrias (Prodlist), com cerca de 3500 denominações, baseada na Classificação Nacional das Atividades Econômicas (CNAE), onde as classes de atividades são identificadas por códigos de quatro dígitos. Os bens e serviços da Prodlist são identificados por códigos de oito dígitos, nos quais os quatro primeiros correspondem às classes de atividades CNAE, e os quatro dígitos seguintes dizem respeito aos produtos da classe. A PIA é publicada na forma da PIA-Empresa, que apresenta os dados das atividades das empresas conforme a classificação CNAE, e na forma da PIA-Produto, que contempla os dados de bens e serviços conforme a classificação Prodlist.

Ao longo do tempo, com as modificações que se verificaram na economia devido ao crescimento dos setores de serviços em relação aos de transformação, mostrou-se necessária uma reformulação da classificação CNAE para melhor representar o conjunto de atividades e produtos da economia brasileira. Na nova classificação, CNAE 2.0, agregaram-se algumas classes de atividades e produtos e outras tantas foram desagregadas em função de sua representatividade, além de ter sido feita uma reorganização da ordem das classes e a consequente mudança de códigos para ressaltar a maior importância econômica das atividades de serviços sobre as de transformação.

¹ Na realidade são 42 setores, pois, nesta divulgação, não existe o setor 9, embora essa desagregação seja comumente conhecida como sendo de 43 setores.

Dessa maneira, tem-se uma série de dados da PIA de 1996 a 2007 seguindo a classificação antiga (referenciada agora como CNAE 1.0) e outra de 2008 a 2014 conforme a CNAE 2.0. O IBGE apresenta uma tabela de correspondência entre as versões 1.0 e 2.0 da CNAE, mas ressalta a impossibilidade de uma correspondência exata entre elas.

Entretanto, analisando-se as duas classificações sob o ponto de vista da intensidade do uso de energia das atividades, observa-se que as atividades das indústrias extrativista e de produção de bens de base e capital – que se caracterizam por serem energo-intensivas – da CNAE 1.0 e da CNAE 2.0 mantêm uma correspondência muito próxima, ao passo que as maiores diferenças se concentram nos setores de produção de bens de consumo e nos serviços, cuja intensidade no uso da energia é menor. Ademais, como os dados de energia do BEN são disponibilizados para os setores produtores de bens de consumo agregados como “Outros” da indústria e os setores de comércio e serviços agregados sob o rótulo “Comercial”, a reorganização e alterações internas a esses agregados de setores não causarão impacto nas projeções de energia. Assim, a tabela de correspondência entre as atividades industriais das classificações CNAE 1.0 e 2.0 aqui proposta é uma adaptação daquela apresentada pelo IBGE baseada nessa observação e deve ser usada somente para análises de uso de energia com os dados do BEN, não sendo recomendada para outras análises.

2.3 O balanço energético nacional

Os dados energéticos são coletados e organizados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao MME, que juntamente com o Ministério, divulgam anualmente o Balanço Energético Nacional (BEN) (EPE/MME, 2016), que é uma publicação com dados de oferta e demanda de energia, desagregados por tipos de energéticos e por setores econômicos. O BEN fornece dados de consumo de energia dos diversos energéticos, com uma desagregação dos setores econômicos apropriada para análises energéticas.

A EPE e o MME publicam anualmente um Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE), que traz projeções da demanda e da oferta de energia para um horizonte de planejamento de dez anos. As informações contidas nestes planos subsidiam as decisões do MME quanto à realização de leilões de novas usinas geradoras, novas linhas de transmissão, novas áreas para exploração de petróleo e gás e aquisição de biodiesel para mistura com o óleo diesel. O PDE mais recente realiza projeções até 2026 (EPE/MME, 2017).

Estas duas instituições publicaram em 2007 um plano de longo prazo, o Plano Nacional de Energia 2030 (PNE 2030), que apresenta

projeções da demanda e da oferta de energia no Brasil até 2030 (EPE/MME, 2007). O PNE 2050, que contempla um horizonte de planejamento até 2050, está em execução. Em 2014 a EPE publicou uma nota técnica sobre cenários econômicos em 2050 (EPE/MME, 2014a) e uma outra nota técnica sobre projeções da demanda de energia em 2050 (EPE/MME, 2014b).

Neste trabalho, além dos dados de energia fornecidos pelo BEN, o PDE e o PNE foram considerados na formulação dos cenários energéticos e econômicos adotados.

3. METODOLOGIA

A metodologia proposta neste artigo envolve as seguintes etapas: (i) classificação adotada para o trabalho – a classificação Eficind; (ii) compatibilização aproximada das classificações CNAE 1.0 e 2.0 com a classificação BEN; (iii) procedimento para a obtenção de uma série de valores adicionados de acordo com a classificação Eficind, que, junto com as informações sobre tecnologias de produção e consumo de energia constituem um banco de dados econômicos e energéticos; (iv) uma breve descrição do modelo de projeção da demanda de energia dos setores energo-intensivos da indústria, que é aplicado a esse banco de dados; (v) elaboração de uma Matriz de Contabilidade Social (MCS) macroeconômica para obtenção de projeções tendenciais e alternativas do modelo de projeção da demanda de energia.

3.1 A classificação do Eficind

A classificação Eficind adotada neste trabalho, apresentada na Tabela 1, é baseada na classificação utilizada no projeto Eficind. Como a classificação de setores utilizada pelo BEN difere da classificação de setores do IBGE, é necessária uma compatibilização, obtida pela agregação de alguns setores e desagregação de outros, tanto do IBGE como do BEN.

O BEN utiliza uma classificação com 17 setores para apresentar o consumo de energia do Brasil, dos quais 11 correspondem aos setores industriais energo-intensivos. Utilizando essa mesma estrutura, a classificação Eficind subdivide cada setor energo-intensivo do BEN de acordo com as atividades econômicas da CNAE, obtendo-se subsetores homogêneos tanto com relação ao aspecto econômico quanto às características da tecnologia utilizada, consumo de energia e produção física.

Tabela 1 - Classificação Eficind

Setores e subsetores	Setores e subsetores
1.0 Setor energético	13.0 Alimentos e bebidas
1.1 Energia primária	13.1 Açúcares
1.2 Energia secundária exceto eletricidade	13.2 Laticínios
1.3 Energia elétrica	13.3 Carnes
2.0 Residencial	13.4 Sucos
3.0 Comercial	13.5 Cervejas
4.0 Público	13.6 Outros
5.0 Agropecuário	14.0 Têxtil
6.0 Transportes	14.1 Fiação
7.0 Cimento*	14.2 Tecelagem
8.0 Siderurgia	14.3 Confeção
8.1 Ferro gusa	15.0 Papel e Celulose
8.2 Aço	15.1 Celulose
9.0 Ferroligas*	15.2 Papel
10.0 Mineração e pelletização*	15.3 Embalagens
11.0 Metais não ferrosos	16.0 Cerâmica
11.1 Alumínio	16.1 Vermelha
11.2 Outros	16.2 Sanitária
12.0 Química	16.3 Revestimentos
12.1 Cloro e álcalis	16.4 Outras cerâmicas
12.2 Petroquímicos básicos	17.0 Outros
12.3 Resinas termoplásticas	17.1 Outros
12.4 Fertilizantes	17.2 SIUP
12.5 Outros	17.3 Construção Civil

*Setores que não são subdivididos por terem atividades CNAE diretamente correspondentes

Exemplificando a lógica de estruturação dos setores e subse- tores da Tabela 1, informações sobre tecnologias de produção, consu- mo energético e produção física, junto com dados sobre valor adicion- ado dos segmentos de cloro e álcalis, petroquímicos básicos, resinas termoplásticas e fertilizantes da indústria química possibilitam tecer hipóteses sobre seu comportamento futuro, visando projetar seu consu- mo individual de energia, e através de sua soma, o consumo total do setor.

3.2 Compatibilizações

Esta seção descreve a preparação de tabelas de correspon- dência para a integração das séries de informações da PIA – Empresa segundo a CNAE 1.0 (2000 a 2007) e a CNAE 2.0 (2008 a 2013) e da TRU nas desagregações TRU43 (2000 a 2009) e TRU51 (2000 a 2013), com a finalidade de se obter séries de valores adicionados dos subsetores da classificação Eficinf de 2000 a 2013 que possam ser uti- lizados em correspondência com os dados energéticos divulgados no BEN. Conforme explicitado anteriormente na seção 2.2, estas séries devem ser usadas para finalidades de análises energéticas.

As três tabelas de correspondência do SCN2000 adequadas para utilização neste trabalho, disponibilizadas pelo IBGE através da Comissão Nacional de Classificações (CONCLA), são a correspondên- cia entre as CNAE 2.0 e 1.0, a correspondência entre os setores da TRU43 com as atividades econômicas da CNAE 1.0 e a correspon- dência entre os setores da TRU56 com as atividades econômicas da CNAE 1.0, que são referenciadas adiante como as tabelas CNAE2 x CNAE1, TRU43 x CNAE1 e TRU56 x CNAE1, as duas últimas para os anos de 2003 a 2007 (CONCLA/IBGE, 2017). Observe-se que antes de 2003 os códigos de algumas atividades da CNAE 1.0 eram dife- rentes dos atuais, devendo, então, ser utilizada uma tabela CNAE 1.0 adequada, aqui indicada por um “*”; portanto, também são utilizadas as tabelas TRU43 x CNAE1* e TRU56 x CNAE1*, para os anos de 2000 a 2002.

Contudo, a correspondência CNAE2 x CNAE1 publicada pelo IBGE não é unívoca, ou seja, uma determinada atividade da CNAE 2.0 pode levar a mais de uma atividade da CNAE 1.0. Em geral isso não causa problemas, pois as diversas atividades da CNAE 1.0 quase sem- pre levam ao mesmo setor da TRU43. No entanto, algumas exceções foram encontradas e analisadas caso a caso, sendo que, para cada set- or da CNAE 2.0 que leva a diversos setores da CNAE 1.0 foi conside- rado o setor TRU43 predominante, conforme as hipóteses descritas em Sharma (2018). Para todas as atividades em que não há uma corres- pondência unívoca entre a CNAE 2.0 e a CNAE 1.0, a correspondência

criada foi analisada ao nível de produtos, de acordo com a classificação Prodlist que expande a CNAE 2.0 em cerca de 3500 produtos.

A tabela CNAE2 x CNAE1 unívoca obtida pelo procedimento descrito é utilizada para obter a correspondência entre os setores da TRU43 com as atividades da CNAE 2.0, ou seja, a tabela TRU43 x CNAE2 e, através de um procedimento semelhante, também a tabela TRU56 x CNAE2, ambas aplicáveis para os anos 2008 e 2009. Observe-se que a tabela CNAE2 x CNAE1 unívoca seria desnecessária caso o IBGE publicasse tabelas de correspondência TRU x CNAE2.

No SCN2010, a CONCLA também não disponibilizou, até o momento, a correspondência da CNAE 2.0 com nenhuma das desagregações da TRU. No entanto, com base nas considerações apresentadas na seção 2.2, é possível obter-se uma aproximação comparando a TRU56 do SCN2000 com a TRU51 do SCN2010, pois as duas possuem setores industriais muito semelhantes, diferindo principalmente nos setores produtivos de bens de consumo e serviços. Assim, a partir da correspondência TRU56 x CNAE2 é obtida uma correspondência aproximada TRU51 x CNAE2, aplicável para os anos de 2000 a 2013.

As três últimas tabelas de correspondência utilizadas neste trabalho associam os subsetores energéticos da classificação Eficind com as atividades econômicas da CNAE: Eficind x CNAE1* (2000 a 2002), Eficind x CNAE1 (2003 a 2007) e Eficind x CNAE2 (2008 a 2013). Elas foram elaboradas com base em associações dos segmentos energo-intensivos do BEN com os setores da TRU (PATUSCO, 2011) e em análises realizadas no âmbito do projeto Eficind.

3.3 Obtenção da série de valores adicionados

Embora os resultados da PIA – Empresa sejam de uma amostra que abrange quase todo o setor industrial brasileiro, seus dados são utilizados neste trabalho na forma de participações percentuais aplicadas aos totais dos setores industriais disponibilizados na TRU, que representam toda a economia brasileira.

O procedimento descrito a seguir visa obter o Valor Adicionado (VA) das atividades energo-intensivas industriais conforme a classificação Eficind. Para isso, o Valor da Transformação Industrial (VTI) é utilizado como uma medida indireta do VA, tendo em vista que a PIA – Empresa apresenta essa informação somente a partir de 2008.

O primeiro passo deve ser feito para todos os setores industriais da TRU e requer o uso da tabela TRU x CNAE. Para um determinado setor da TRU e o conjunto de atividades econômicas da PIA – Empresa a ele associadas, o VA de cada atividade desse conjunto é estimado como a participação percentual do VTI da atividade no VTI total do conjunto, aplicada ao VA do setor da TRU considerado.

O segundo passo deve ser feito, com o auxílio da tabela Eficind x CNAE, para todos os subsetores Eficind. Para cada um destes subsetores e o conjunto das atividades econômicas da PIA – Empresa a ele associadas, o VA é obtido somando-se os VA dessas atividades da PIA – Empresa obtidos no passo anterior.

Esses dois passos devem ser repetidos para todos os anos, de maneira que a construção da série de 2000 a 2013 é feita por partes através do uso das tabelas adequadas descritas na seção 3.2, que podem ser obtidas a partir da tabela apresentada no APÊNDICE A. O algoritmo detalhando o procedimento descrito acima é apresentado em Sharma (2018). A série com os valores agregados segundo a classificação Eficind de 2000 a 2013 obtida com esse procedimento é apresentada no APÊNDICE B.

3.4 O modelo MEG-DES

O modelo MEG-DES utilizado neste trabalho é um modelo integrado Equilíbrio Geral e Desagregação Estrutural (MEG-DES), que foi concebido para a projeção da demanda de energia e análise de políticas públicas nos setores da economia. Um maior detalhamento deste modelo é apresentado em Sharma (2018).

O módulo DES é um modelo misto econométrico-simulação de projeção que utiliza a análise retrospectiva de indicadores para balizar as suas projeções, que são geralmente apresentadas para diversos cenários. Baseado em séries históricas dos principais indicadores econômicos e técnicos que podem influenciar a demanda de energia, detectam-se tendências históricas e, através de regressões estatísticas, extrapolam-se as tendências futuras para estas variáveis. Estas tendências são particularmente úteis na montagem de cenários de referência, denominados BAU – “Business As Usual”. No módulo DES é possível simular rupturas nos comportamentos das variáveis exógenas visando simular novas políticas públicas, ou diferentes estratégias empresariais, o que irá representar descolamentos nas projeções da demanda de energia. Tais rupturas são importantes para a formulação de cenários alternativos para a projeção da demanda de energia. Bajay et al. (2014) e Sharma (2009) fazem uma apresentação detalhada do modelo DES.

No módulo DES, a demanda total de energia $CE_{i,j}$ de um subsegmento i de um segmento industrial j é projetada através da equação (1),

$$CE_{i,j} = \left(\frac{CE_{i,j}}{PF_{i,j}} \right) \frac{VA_{i,j}}{VA_j} \frac{VA_j}{VA_{IT}} \frac{VA_{IT}}{VA_{ind}} \frac{VA_{ind}}{PIB_{pb}} \frac{PIB_{pb}}{PIB} PIB \quad (1)$$

onde,

PF_{ij} é a produção física do subsegmento i do segmento industrial j ;
 VA_{ij} é o valor adicionado do subsegmento i do segmento industrial j ;
 VA_j é o valor adicionado do segmento industrial j ;
 VA_{IT} é o valor adicionado da indústria de transformação;
 VA_{ind} é o valor adicionado da indústria;
 PIB_{pb} é o Produto Interno Bruto a preços básicos; e
 PIB é o Produto Interno Bruto.

O módulo é composto pela multiplicação de diversos indicadores, quais sejam, PIB_{pb}/PIB , que analisa a participação da carga tributária¹ no PIB; VA_{ind}/PIB_{pb} que representa a participação do valor adicionado da indústria no PIB a preços básicos; VA_{IT}/VA_{ind} , que representa a participação da indústria de transformação no setor industrial como um todo; VA_j/VA_{it} que representa o desempenho relativo do setor industrial j em relação à indústria de transformação; $VA_{i,j}/VA_j$, que representa a participação do valor adicionado do subsetor i em relação ao valor adicionado do setor j ; $CE_{i,j}/PF_{i,j}$, o consumo energético específico, que reflete o consumo unitário da tecnologia empregada no subsetor i ; e $VA_{i,j}/PF_{i,j}$, o valor adicionado específico, que reflete o custo unitário da remuneração de trabalho e capital da tecnologia empregada no subsetor i .

Quando a produção física do segmento industrial j é heterogênea, a demanda total de energia é projetada através da equação (2), onde $CE_{i,j}/VA_{i,j}$ é a intensidade energética do segmento:

$$CE_{i,j} = \frac{CE_{i,j}}{VA_{i,j}} \frac{VA_{i,j}}{VA_j} \frac{VA_j}{VA_{IT}} \frac{VA_{IT}}{VA_{ind}} \frac{VA_{ind}}{PIB_{pb}} \frac{PIB_{pb}}{PIB} PIB \quad (2)$$

A partir de levantamentos de dados de consumos de energia e produção, além de análises descritivas, retrospectivas e prospectivas, das tecnologias utilizadas nos segmentos energo-intensivos industriais, realizados durante a execução do projeto Eficind, juntamente com os valores adicionados aqui apresentados, foram obtidos consumos específicos de energia, intensidades energéticas e valores adicionados específicos que compõem o banco de dados econômico energético que

¹ Observe-se que esse indicador se refere apenas ao total de impostos sobre produtos (ICMS, IPI, outros impostos e imposto de importação) apresentados na TRU pelo IBGE e não inclui os impostos líquidos de subsídios sobre a produção, imposto de renda e outros.

possibilita a projeção da demanda de energia desses segmentos.

Na integração do módulo DES com o módulo MEG, a projeção dos indicadores que utilizam VA_j , VA_{IT} , VA_{ind} , PIB_{pb} , e PIB , que normalmente são estimados através das análises retrospectivas e prospectivas, passam a ser calculados com base nos valores projetados pelo módulo MEG, garantindo a consistência intersetorial e macroeconômica dos resultados. A participação $VA_{i,j}/VA_j$ do subsetor i no setor j e os indicadores $CE_{i,j}/PF_{i,j}$, $VA_{i,j}/PF_{i,j}$ e $CE_{i,j}/VA_{i,j}$ continuarão a ser estimados com base nos parâmetros estatísticos das análises retrospectivas, projetados nos cenários escolhidos.

O módulo de MEG utiliza o pacote computacional de modelagem e resolução de modelos de equilíbrio geral como um problema de complementaridade não linear MPSGE/GAMS. Desenvolvida originalmente como Mathematical Programming System for General Equilibrium (MPSGE), por Rutherford (1989), em trabalhos posteriores Rutherford (1995) estendeu o MPSGE para utilizar o pacote computacional General Algebraic Modeling System (GAMS), de Brooke, Kendrick e Meeraus, (1988), apresentou novas extensões, e também algumas aplicações deste modelo. Seguindo em linhas gerais o modelo de equilíbrio geral estático apresentado por Rutherford e Paltsev, (1999) para a economia russa, desenvolveu-se um modelo considerando as características da economia brasileira¹ que reproduz os fluxos de valores presentes na TRU, onde as interações dos agentes econômicos, produtores e consumidores são descritas por atividades de produção de bens, comércio, transporte e serviços, juntamente com atividades de consumo de bens que compõem a demanda final, constituindo as equações de equilíbrio geral.

Os crescimentos reais dos componentes da demanda final utilizados no modelo de equilíbrio geral foram obtidos de um modelo de simulação aplicado a uma série de Matrizes de Contabilidade Social (MCS) que fornece projeções de cenários tendenciais e alternativos desses componentes como participações percentuais macroeconomicamente consistentes do PIB. Essa MCS é descrita sucintamente na próxima seção e apresentada com mais detalhes por Sharma em sua tese de doutorado, em fase de finalização.

O modelo MEG-DES permite aproveitar as vantagens das abordagens de equilíbrio geral e decomposição estrutural setorial, possibilitando a análise da inter-relação dos setores econômicos e sua variação se determinados cenários político-econômicos ocorrerem. O modelo possui um enfoque energético, através de uma desagregação apropriada para esta finalidade, apoiado em uma base de dados ade-

1 O modelo de Rutherford e Paltsev tem por objetivo analisar a influência de vários impostos na economia russa a partir de uma matriz de insumo-produto, ao passo que o modelo aqui utilizado foca na reprodução dos fluxos de valores da Tabela de Recursos e Usos da economia brasileira, disponibilizando, dessa maneira, apenas os impostos sobre a produção e sobre produtos para possíveis análises.

quada e consistente. O modelo fornece resultados da demanda de energia para o setor industrial, desagregados em segmentos dos setores industriais, além das variações de preços e quantidades dos produtos de todos os setores econômicos.

3.5 A matriz de contabilidade social

O modelo de equilíbrio geral descrito na seção anterior deve ser utilizado em associação com um modelo de simulação aplicado a uma série de Matrizes de Contabilidade Social (MCS) que garanta a consistência macroeconômica das projeções do PIB e os componentes da demanda final. A construção e balanceamento desta MCS é baseada em Fontana et al. (2005), diferenciando-se na agregação dos impostos, na agregação das empresas às famílias e na desagregação dos fatores em trabalho e capital.

Como exemplo, apresenta-se a seguir a MCS para 2013, de elaboração própria. A descrição das células da MCS é apresentada na Tabela 2. Na tabela 3 é apresentada a MCS de 2013, onde a produção é composta por atividades agregadas em uma atividade representativa (A), cujos produtos são agregados em um produto representativo (P), fatores primários compostos de trabalho (L) e capital (K), os agentes econômicos representados pelas famílias (FAM), governo (GOV) e o resto do mundo (ROW), finalizando com a conta capital agregada (CAP), com o investimento e as poupanças dos agentes. Um maior detalhamento da construção de uma MCS a partir das Contas Econômicas Integradas (CEI) é apresentado em Sharma (2018).

Para a elaboração da matriz de contabilidade social foi considerada a igualdade das receitas e das despesas, conforme a metodologia apresentada a seguir.

A Produção é composta por Atividades e Produtos. Na conta das Atividades, as receitas são apresentadas nas linhas, e são compostas pelas vendas domésticas de bens e serviços somados com as exportações. Os pagamentos das Atividades são apresentados nas colunas e representam a soma de consumo intermediário, remunerações, que se compõe dos salários mais as contribuições deles decorrentes, excedente operacional bruto e outros impostos e subsídios sobre a produção.

Na conta de Produtos, as receitas são apresentadas nas linhas e são compostas por: consumo intermediário, consumo final das famílias e das instituições financeiras sem fins lucrativos (IFSFL), consumo da administração pública, investimentos e variação de estoques. Os pagamentos dos Produtos são apresentados nas colunas e representam a soma de vendas domésticas, impostos sobre bens e serviços e importação de bens e serviços.

Nos Fatores constam os fatores primários: Trabalho e Capital. No Trabalho, as linhas representam as receitas e são a soma de remunerações, que são os salários mais as contribuições deles decorrentes e o pagamento do ROW pelo trabalho doméstico. Os pagamentos do Trabalho são apresentados na coluna e se compõe da remuneração dos empregados recebida pelas famílias e a remuneração dos empregados recebida pelo ROW.

Tabela 2 - Descrição das células da MCS

Linha	Coluna	Descrição
A	P	Vendas domésticas
A	ROW	Exportações
P	A	Consumo intermediário
P	FAM	Consumo privado
P	GOV	Consumo público
P	CAP	Investimento
L	A	Remuneração do trabalho doméstico
L	ROW	Remuneração do trabalho paga pelo ROW
K	A	Excedente operacional bruto
K	ROW	Lucros distribuídos pagos pelo ROW
FAM	L	Receita do trabalho doméstico
FAM	K	Lucros distribuídos
FAM	GOV	Transferências do governo às famílias e empresas
FAM	ROW	Transferências do ROW às famílias e empresas
GOV	A	Tributos sobre a produção
GOV	P	Tributos sobre vendas e importações
GOV	FAM	Tributos sobre renda das famílias e lucro das empresas
ROW	P	Importações
ROW	L	Receita do trabalho paga ao ROW
ROW	K	Remessas de dividendos e royalties ao ROW
ROW	FAM	Transferências das famílias e empresas ao ROW
ROW	GOV	Transferências do governo ao ROW
CAP	FAM	Poupança das famílias e empresas
CAP	GOV	Poupança do governo
CAP	ROW	Poupança do ROW

Tabela 3 - Descrição das células da MCS

	Produção		Valor Adicionado		Conta Corrente dos Agentes			Conta capital agregada
	Atividades	Produtos	Trabalho	Capital	Famílias	Governo	Exterior	
	A	P	L	K	FAM	GOV	ROW	CAP
A		8.470,4					620,1	
P	4.551,8				3.276,1	1.007,8		1.155,3
L	2.307,3						1,3	
K	2.171,9						21,9	
FAM			2.308,4	2.106,5		407,6	12,7	
GOV	59,4	777,9			559,8			
ROW		742,8	0,2	87,3	3,7	1,9		
CAP					995,8	-20,2	179,7	

Na conta de Capital, a receita aparece ao longo das linhas e é composta pelo excedente operacional bruto somado às rendas das propriedades pagas pelo ROW. As despesas da conta Capital aparecem ao longo da coluna e são compostas pelo excedente operacional bruto e as rendas das propriedades das famílias e IFSFL, somando-se também aos das empresas financeiras, empresas não financeiras e administração pública, juntamente com as rendas das propriedades recebidos pelo ROW.

Os agentes econômicos que contam na SAM são as Famílias, o Governo e o Resto do Mundo. O agente econômico “Famílias” é composto não somente pelas contas do setor institucional “famílias”, como também engloba, por hipótese, as contas das IFSFL e das empresas, consideradas de propriedade das Famílias.

As receitas que compõe a renda das famílias são apresentadas ao longo da linha, e são compostas pela remuneração dos empregados recebidas pelas famílias, somada ao excedente operacional bruto, às rendas das propriedades das famílias e IFSFL, às transferências das empresas para as famílias, às transferências do governo para as famílias e às outras transferências correntes pagas pelo ROW. A renda das famílias também é composta pelas receitas das empresas, que englobam as empresas financeiras, empresas não financeiras e, por hipótese, parte da administração pública, relacionada às atividades de empresas estatais. Essas receitas são compostas pelo excedente operacional bruto e rendas das propriedades das empresas financeiras, não financeiras e administração pública, somando-se às transferências do governo para empresas.

As despesas das famílias são apresentadas na coluna e são compostas pelo consumo final das famílias e das IFSFL, somado às rendas das propriedades pagas pelas famílias e pelas IFSFL, e à poupança bruta das famílias e das IFSFL. As despesas referentes às empresas são compostas pelas rendas das propriedades pagas pelas empresas financeiras, não financeiras e administração pública, somadas às transferências das empresas para as famílias, como indenização de seguros, e também somadas aos tributos pagos pelas empresas – Imposto de Renda Pessoa Jurídica (IRPJ), às rendas das empresas para ROW e à poupança bruta das empresas.

O agente Governo recebe apenas impostos e transferências. As receitas do Governo, apresentadas na linha, são compostas por outros impostos sobre a produção e outros subsídios sobre a produção, somado aos impostos sobre bens e serviços, às transferências das famílias para o governo, que são o Imposto de Renda Pessoa Física (IRPF), contribuições sociais e o IRPJ. Os pagamentos do Governo, apresentados na coluna, são compostos pelo consumo da administração pública, somando-se às transferências do governo para as famílias, às transferências do governo para empresas, à renda do governo para o ROW, como cooperação internacional e outras transferências correntes, e à poupança bruta da administração pública. Em diversos anos a poupança pública no Brasil tem sido negativa, indicando que o governo tem tomado empréstimos.

O agente ROW - Rest of World (Resto do Mundo) representa as contas do Brasil com o Exterior, como se este fosse um único agente. As receitas de ROW, apresentadas na linha, são compostas pela importação de bens e serviços, somando-se à remuneração dos empregados recebido pelo ROW, às rendas das propriedades recebidos pelo ROW, às transferências das empresas para ROW, que são as transferências correntes diversas recebidos pelo ROW, e às transferências do governo para o ROW, que é a operação de cooperação internacional. Os pagamentos do ROW, apresentados na coluna, são compostos pela exportação de bens e serviços, somada ao pagamento do ROW para o trabalho doméstico, às rendas das propriedades pagas pelo ROW, às outras transferências correntes pagas pelo ROW, e ao saldo externo corrente do ROW. As operações do setor institucional ROW constam todas nas Contas Econômicas Integradas (CEI), sendo algumas delas também apresentadas na TRU.

O último setor abordado na SAM é a conta de capital agregada. A receita do capital agregado, apresentado na linha, é a poupança bruta das famílias e das IFSFL somada à poupança bruta das empresas financeiras e empresas não financeiras, à poupança bruta da administração pública e ao saldo externo corrente ROW. O pagamento do capital agregado, apresentado em coluna, é composto pelo investimento, que é a Formação Bruta de Capital Fixo (FBCF) mais a variação de estoques.

4. APLICAÇÃO E RESULTADOS

Neste trabalho se propõe uma compatibilização das bases de dados do MME e do IBGE que possibilita criar uma base de dados consistente contendo informações importantes para a realização de projeções de demanda energética. A tabela com os resultados da metodologia de compatibilização apresentada neste trabalho consta no APÊNDICE A. Com a aplicação desta metodologia de compatibilização pode-se obter a tabela com os Valores agregados de 2000 a 2013, conforme a classificação Eficind, que é apresentada no APÊNDICE B.

Para mostrar o alcance dos resultados possíveis aplicou-se a essa base de dados o modelo integrado de Equilíbrio Geral e Desagregação Estrutural (MEG-DES) obtendo-se projeções da demanda de energia por subsegmentos do setor industrial.

A seguir são apresentados os cenários econômicos e energéticos propostos para a aplicação dessa metodologia e os resultados obtidos.

4.1 Cenários

Consideraram-se para este trabalho combinações de cenários econômicos e energéticos, cada um deles podendo ser tendencial (Business As Usual – BAU) ou alternativo (ALT), em um total de quatro cenários combinados, referenciados mais à frente como cenários econômicos e energéticos BB, AB, BA e AA, onde B indica um cenário BAU e A indica um cenário ALT.

Nos cenários econômicos, as projeções para o crescimento real do Produto Interno Bruto (PIB) do Brasil são baseadas no World Economic Outlook (WEO) de abril de 2017 e no Fundo Monetário Internacional (FMI) (FMI/WEO, 2017a), e também em (FMI/WEO, 2017b) com projeções de 0,3% em 2017, 1,3% em 2018 e 2.0% em 2019.

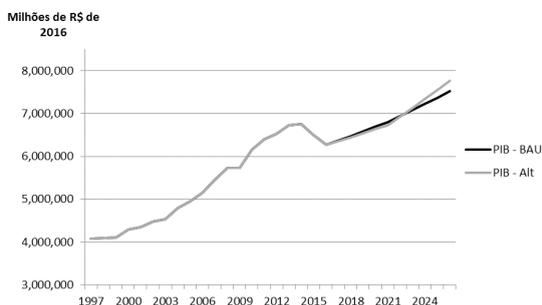


Figura 1 - Evolução histórica e projeções de crescimento real do PIB do Brasil, em milhões de R\$ de 2016

Como ilustrado na Figura 1, de elaboração própria, para a projeção do cenário econômico BAU supõe-se um crescimento progressivo, mas modesto, a partir do valor previsto pelo FMI, de 2.0%, para 2019, atingindo 2,38% (valor médio de crescimento da economia de 1996 a 2016) em 2026, o que corresponde a um crescimento médio de 1,95% e total de 21,3% no período de 2016 a 2026. Já para a projeção do cenário econômico ALT assume-se um crescimento relativamente maior a partir do mesmo valor do FMI para 2019, atingindo 3,62% (valor médio de crescimento da economia de 2000 a 2007) em 2026; tem-se, neste cenário, um crescimento médio de 2,57% e total de 28,9% no período de 2016 a 2026.

Os percentuais de crescimento projetados para os componentes da demanda final no cenário BAU são tendenciais, enquanto que no cenário ALT utiliza-se percentuais médios maiores, verificados nos anos de 2000 a 2007, um período de crescimento contínuo da economia brasileira, alavancado por um consumo elevado das famílias, aumento do investimento, crescimento das exportações e redução do crescimento das importações. Com relação aos impostos sobre produtos, no cenário BAU supõe-se que seja mantida a tendência de crescimento, com um aumento de 1,4%, enquanto que no cenário ALT supõe-se uma redução de 1,2%, para um valor que se aproxima da média de 2000 a 2007.

No cenário energético BAU não são adotadas medidas visando ganhos de eficiência energética nos segmentos industriais, enquanto que no cenário energético ALT supõe-se a adoção de tais medidas, em acordos voluntários da indústria com o governo, de forma a reduzir em 10% os consumos energéticos específicos dos segmentos industriais energo-intensivos, quando comparados com o cenário BAU.

De acordo com os cenários apresentados, tendo por base o ano de 2009¹, realizam-se choques para os anos de 2016 e 2026 nos componentes da demanda final do modelo MEG, encontrando-se os níveis de atividades dos setores e de preços dos bens que caracterizam o equilíbrio econômico. Ressalte-se que, embora o PIB para 2016 já seja conhecido e o de 2026 é uma hipótese de cenário, os valores econômicos decorrentes são projeções consistentes dos equilíbrios econômicos encontrados. Os valores de PIB, PIB a preços básicos e valores adicionados do setor industrial e seus subsetores são, então, utilizados para calcular os parâmetros do módulo DES, que projeta o consumo de energia do setor industrial e de seus subsetores e segmentos.

¹ Última TRU de 43 setores disponibilizada pelo IBGE.

4.2 Resultados

Nesta seção são apresentadas as projeções dos parâmetros do módulo DES e os consumos energético e elétrico resultantes para a indústria química e os seus segmentos considerados neste trabalho – produtos petroquímicos básicos, soda e cloro, produtos intermediários para fertilizantes, resinas termoplásticas, e outros segmentos da indústria química - para os quatro cenários adotados. Apresentam-se aqui apenas os resultados para a indústria química, como exemplo do uso desta metodologia. Resultados semelhantes podem ser obtidos para todos os setores e segmentos energo-intensivos da classificação Eficind.

Analisando-se a série histórica de consumo de energia do setor químico, nota-se uma considerável queda de consumo no período de 2013 a 2016, devido à recessão da economia. Considerou-se, neste trabalho, que estas reduções de consumo não refletem uma mudança de comportamento e que o setor químico retornará aos padrões de consumo energético anteriores a este período tão logo a economia se recupere.

A Tabela 4 apresenta os resultados as projeções dos parâmetros econômicos e energéticos do modelo DES para os cinco segmentos em que a indústria química foi dividida nestes trabalho, nos quatro cenários de projeção considerados. Conforme mencionado anteriormente, os resultados do módulo de equilíbrio geral indicam para o PIB no cenário econômico tendencial (BAU) um crescimento de 20% de 2016 a 2026 e, no cenário alternativo, um crescimento um pouco maior, de 23,9% no mesmo período.

Tabela 4 - Projeções dos parâmetros do módulo DES para os segmentos da indústria química, em todos os cenários

Parâmetros	Unidade	2016	2026			
			BAU econômico		Alt econômico	
			BAU energético	Alt energético	BAU energético	Alt energético
PIB	milhões de R\$ de 2016	6,266,856	7,524,195	7,524,195	7,765,674	7,765,674
PIBpb/PIB	%	85.30%	84.31%	84.32%	85.97%	86.03%
VAind./PIBpb	%	26.07%	25.62%	25.75%	27.76%	27.82%
VAind.trans./VAind.	%	59.75%	59.79%	59.99%	61.49%	61.68%

Tabela 4 - Projeções dos parâmetros do módulo DES para os segmentos da indústria química, em todos os cenários (continuação)

Parâmetros	Unidade	2016	2026			
			BAU econômico		Alt econômico	
			BAU energético	Alt energético	BAU energético	Alt energético
VAind.quím./VAind.trans.	%	9.47%	8.88%	8.93%	8.44%	8.53%
VAcloro/VAind.quím.	%	2.62%	2.60%	2.60%	2.60%	2.60%
CEcloro/PFcloro	GJ / t	21.782	15.415	14.898	15.415	14.898
CEEcloro/PFcloro	GJ / t	13.104	10.510	10.336	10.510	10.336
VAcloro/PFcloro	Mil R\$ 2016 / t	2.201	1.365	1.365	1.365	1.365
VApetr.bás./VAind.quím.	%	3.06%	3.02%	3.02%	3.02%	3.02%
CEpetr.bás./PFpetr.bás.	GJ / t	19.892	15.606	14.825	15.606	14.825
CEEpetr.bás./PFpetr.bás.	GJ / t	0.772	0.603	0.599	0.603	0.599
VApetr.bás./PFpetr.bás.	Mil R\$ 2016 / t	0.461	0.309	0.309	0.309	0.309
VAres.term./VAind.quím.	%	1.71%	1.69%	1.69%	1.69%	1.69%
CEres.term./PFres.term.	GJ / t	5.115	4.164	4.098	4.164	4.098
CEEres.term./PFres.term.	GJ / t	1.666	1.351	1.301	1.351	1.301
VAres.term./PFres.term.	Mil R\$ 2016 / t	0.318	0.204	0.204	0.204	0.204
VAfertil./VAind.quím.	%	6.04%	6.03%	6.03%	6.03%	6.03%
CEfertil./PFfertil.	GJ / t	4.344	3.043	2.885	3.043	2.885
CEEfertil./PFfertil.	GJ / t	0.282	0.192	0.185	0.192	0.185
VAfertil./PFfertil.	Mil R\$ 2016 / t	0.553	0.343	0.343	0.343	0.343
VAoutrosquím./VAind.quím.	%	86.57%	86.66%	86.66%	86.66%	86.66%
CEoutrosquím./VAoutrosquím.	GJ / Mil R\$ 2016	1.445	1.539	1.451	1.539	1.451
CEEoutrosquím./VAoutrosquím.	GJ / Mil R\$ 2016	0.788	0.812	0.765	0.812	0.765

A participação do PIB a preços básicos no PIB (PIB_{pb}/PIB) reflete a variação dos impostos sobre produtos no PIB. No cenário BB a projeção tendencial é de decréscimo de 85,3% em 2016 para 84,3% em 2026, equivalente a um aumento de impostos de 1%. O cenário AA apresenta a maior participação do PIB a preços básicos (e consequentemente menor participação dos impostos - uma redução de 0,73% no período de 2016 a 2016) com o valor de 86,03% em 2026, devido à hipótese de redução da arrecadação de impostos, inclusive por conta de preços de energia mais baixos¹, ocasionados por uma oferta maior de combustíveis, por sua vez decorrente da maior eficiência no uso de energéticos. De 2016 para 2026, no cenário AB (sem eficiência energética) o decréscimo na arrecadação de impostos é de 0,67%.

A participação da indústria no PIB a preços básicos (VA_{ind}/PIB_{pb}) varia pouco em todo o período analisado e em todos os cenários. O cenário que apresenta maior variação desta participação é o cenário AA, no qual este indicador varia de 26,07% em 2016 para 27,82% em 2026.

A participação da indústria de transformação na indústria (VA_{IT}/VA_{ind}) aumenta levemente em todos os cenários analisados. O cenário AA apresenta o maior valor deste indicador, que varia de 59,75% em 2016 para 61,68% em 2026.

A participação do setor químico na indústria de transformação ($VA_{quim.}/VA_{IT}$) diminui em todos os cenários projetados. O cenário AB apresenta a maior variação deste indicador, decrescendo de 9,47% em 2016 para 8,44% em 2026.

As projeções tendenciais das participações dos valores adicionado dos segmentos químicos no valor adicionado da indústria química ($VA_{cloro}/VA_{quim.}$, $VA_{petr.bás.}/VA_{quim.}$ e etc.) são as mesmas para todos os cenários projetados, levemente reduzidas para todos os segmentos, exceto para o segmento de outros produtos químicos, cuja participação aumenta com relação a 2016.

As projeções no cenário BAU dos consumos específicos de energia e elétrico dos segmentos químicos (CE_{cloro}/PF_{cloro} , CEE_{cloro}/PF_{cloro} , etc.) apresentam uma ligeira redução de 2016 para 2026, enquanto que no cenário ALT tem-se a redução negociada de 10% em 2026. Observe-se que, no segmento de outros produtos químicos, cuja produção física é heterogênea e, portanto, não dispõe desse indicador, a projeção de demanda de energia feita por meio da equação 2 utilizando as intensidades energética e elétrica $CE_{outrosquim.}/VA_{outrosquim.}$ e $CEE_{outrosquim.}/VA_{outrosquim.}$; estes indicadores decrescem levemente no período histórico analisado. No cenário BAU energético supõe-se que a intensidade energética irá crescer de 2016 a 2026, no cenário Alt energético supõe-se

¹ Para o óleo combustível, por exemplo, os preços relativos calculados pelo modelo MEG para 2026 no cenário AB é de 1,07 e no cenário AA é 0,98, uma redução de 8,3%.

um leve decréscimo das intensidades energética e elétrica.

As projeções tendenciais do valor adicionado específico (VA_{cloro}/PF_{cloro} , $VA_{petr.bás.}/PF_{petr.bás.}$, etc.) apresentam valores levemente reduzidos.

Apresenta-se, para cada um dos quatro cenários analisados, para todos os segmentos da indústria química, as projeções do consumo energético na Tabela 5 e do consumo elétrico na Tabela 6, ambas de elaboração própria.

O segmento de petroquímicos básicos apresenta o maior consumo energético do setor químico (36,9% em 2016), sendo que seu consumo de eletricidade representa apenas uma pequena parcela desse total - 4,1% em 2016.

Embora o segmento de outros produtos químicos não seja energia-intensivo, é o segmento mais eletro-intensivo do setor químico, com um consumo de eletricidade representando 67,5% de seu consumo energético em 2016. Apresenta, também, um alto consumo energético (34,9% da indústria química em 2016) devido ao grande número de empresas, sendo que o valor adicionado estimado para este segmento em 2016 é de 89% do valor adicionado da indústria química.

Tabela 5 - Projeções, em TJ e % de aumento, do consumo energético da indústria química e de seus segmentos

Consumo energético (TJ)	2016	2026							
		BAU econômico				Alt econômico			
		BAU energético		Alt energético		BAU energético		Alt energético	
		TJ	$\Delta\%$ a.a.						
CE ind.quim.	282329	347925	2.11%	335556	1.74%	387819	3.23%	374898	2.88%
CE cloro e álcalis	20406	25310	2.18%	24793	1.97%	28212	3.29%	27700	3.10%
CE petroquímicos	104328	131428	2.34%	126548	1.95%	146498	3.45%	141385	3.09%
CE resinas	21680	29828	3.24%	29754	3.22%	33248	4.37%	33243	4.37%
CE fertilizantes	37355	46210	2.15%	44402	1.74%	51508	3.27%	49608	2.88%
CE outros	98561	115149	1.57%	110059	1.11%	128353	2.68%	122963	2.24%

Tabela 6 - Projeções, em TJ e % de aumento, do consumo elétrico da indústria química e de seus segmentos

Consumo energético (TJ)	2016	2026							
		BAU econômico				Alt econômico			
		BAU energético		Alt energético		BAU energético		Alt energético	
		TJ	Δ% a.a.						
CEE ind.quim	79553	95668	1.86%	92617	1.53%	106637	2.97%	103476	2.66%
CEE cloro e álcalis	12277	17256	3.46%	17200	3.43%	19235	4.59%	19217	4.58%
CEE petroquímicos	4047	5081	2.30%	5115	2.37%	5664	3.42%	5715	3.51%
CEE resinas	7060	9676	3.20%	9447	2.96%	10785	4.33%	10555	4.10%
CEE fertilizantes	2423	2920	1.88%	2851	1.64%	3255	3.00%	3185	2.77%
CEE outros	53746	60734	1.23%	58004	0.77%	67698	2.33%	64805	1.89%

Os consumos energético e elétrico da indústria química são obtidos através da soma dos consumos correspondentes de todos os seus segmentos. As Figuras 3 e 4 apresentam as projeções dos consumos energético e elétrico para o setor químico nos quatro cenários, respectivamente, onde os pontos intermediários foram obtidos por interpolação ponderada pela projeção do PIB entre os consumos para 2016 (EPE/MME, 2016) e os aqui projetados para 2026.

No cenário de manutenção de tendências (BAU econômica e energética), o consumo energético varia de 282.329 TJ em 2016 para 347.925 TJ em 2026, aumentando 2,11% ao ano. No cenário BA, adotam-se medidas de eficiência energética e se considera que o setor químico irá reduzir os consumos específicos de seus segmentos em 10% até 2026, reduzindo o consumo energético para 335.556 TJ em 2026. No cenário BA em relação ao cenário BB o setor químico consegue economizar 12.369 TJ de energia em 2026.

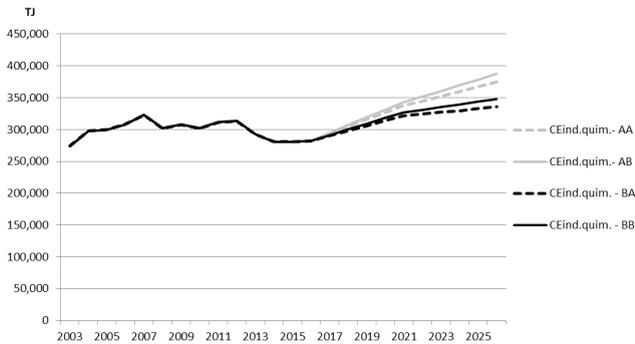


Figura 3 - Evolução histórica e projeções do consumo energético da indústria química, em TJ, de 2000 a 2026

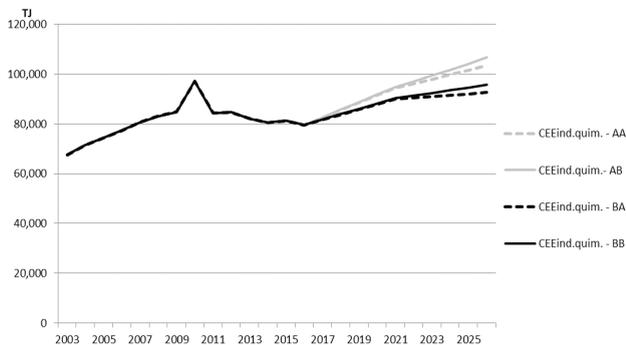


Figura 4 -Evolução histórica e projeções do consumo de energia elétrica da indústria química, em TJ, de 2000 a 2026

Nos cenários ALT econômicos considera-se um crescimento econômico maior, com o PIB aumentando em 23,9% de 2016 a 2026. No cenário AB, ou seja, com maior crescimento econômico e sem medidas de eficiência energética, nota-se o maior consumo energético do setor químico, em relação a todos os outros cenários. O consumo energético deste setor varia de 282.329 TJ em 2016 para 387.819 TJ em 2026, apresentando um crescimento de 37,3% em todo o período. No cenário AA – ALT econômico e ALT energético, o consumo energético atinge 374.898 TJ em 2026, variando 32,7%. No cenário AA em relação ao cenário AB o setor químico economiza 12.921 TJ de energia em 2026

O consumo de energia elétrica da indústria química no cenário

de manutenção de tendências BAU econômica e energética varia de 79.553 TJ em 2016 para 95.668 TJ em 2026, aumentando em 20,2%. No cenário BA, adotam-se medidas de eficiência energética e se considera que o setor químico irá reduzir os consumos específicos elétricos de seus segmentos (excetuando-se o de outros produtos químicos) em 10% até 2026. Neste cenário o consumo elétrico do setor químico atinge 92.617 TJ, variando 16,4% em relação a 2016. No cenário BA em relação ao cenário BB o setor químico consegue economizar 3.051 TJ de energia em 2026.

Nos cenários alternativos, o cenário AB, ou seja, com maior crescimento econômico e sem medidas de eficiência energética, o consumo de energia elétrica do setor químico varia de 79.553 TJ em 2016 para 106.637 TJ em 2026, apresentando um crescimento de 34% em todo o período. No cenário AA, o consumo elétrico atinge 103.476 TJ em 2026, variando 30%. No cenário AA em relação ao cenário AB o setor químico consegue economizar 3.161 TJ de energia elétrica em 2026.

5. CONCLUSÕES

A utilização de uma base de dados consistente é importante para detectar tendências, analisar indicadores, projetar demandas e, também, conferir maior precisão e confiabilidade nas aplicações de modelos, em geral. Elaborou-se, neste trabalho, uma correspondência entre as bases de dados do MME e do SCN que permite construir uma base de dados para análise de aspectos energéticos que, seguindo a classificação adotada Eficind, contém importantes variáveis para a realização de projeções da demanda energética de setores e subsectores industriais. Essa compatibilização das principais classificações econômico-energéticas utilizadas no país possibilita a atualização da base de dados em questão, incluindo dados a serem divulgados futuramente pelo IBGE e MME, possibilitando diversos outros tipos de análises econômico-energéticas como trabalhos futuros.

Aplicou-se, neste trabalho, esta base de dados para o estudo da demanda energética de setores e subsectores industriais, através da análise de séries históricas de diversas variáveis, econômicas e energéticas, considerando dois cenários de crescimento econômico, dois cenários de consumo energético e a combinação entre eles, através do modelo MEG-DES, que permite integrar as vantagens das abordagens de equilíbrio geral e decomposição estrutural.

Neste artigo são apresentados resultados contemplando apenas segmentos do setor químico, embora resultados semelhantes para os demais setores industriais possam ser obtidos do mesmo modelo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BAJAY, S. V., BORDONI, O. F. J. G., SHARMA, et al., Demanda de energia da indústria química brasileira, fatores responsáveis por sua evolução no passado e perspectivas futuras. In, Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. Florianópolis, SC. Anais., 2014.

BAJAY, S. V., BORDONI, O. F. J. G., SHARMA, R. F. C., et al, Relatório da Meta Física 7 – Projeções da demanda energética e de potenciais de conservação de energia, Projeto: Estudo de prospecção de potencial para a eficiência energética, Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético (NIPE), Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), Campinas, SP, junho de 2015.

BROOKE, A., KENDRICK, D. E MEERAUS, A., GAMS: A User's Guide, The Scientific Press, Redwood City. 1988.

CONCLA/IBGE, 2017, <https://concla.ibge.gov.br/classificacoes/correspondencias/atividades-economicas.html>, acesso em junho de 2017.

EPE/MME, Plano Nacional de Energia 2030, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Brasília, DF, 2007.

EPE/MME, Cenário econômico 2050, Série Estudos Econômicos, Nota técnica DEA 12/14. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Brasília, DF, 2014a.

EPE/MME, Demanda de Energia 2050, Série Estudos da demanda de energia, Nota técnica DEA 13/14, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Brasília, DF, 2014 b.

EPE/MME, Balanço Energético Nacional 2016. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Brasília, DF, 2016.

EPE/MME, Plano Decenal de Expansão de Energia 2026, Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Ministério de Minas e Energia (MME), Brasília, DF, 2017.

FMI/WEO, World Economic Outlook Database, WEO April 2017 Edition, International Monetary Fund – IMF, <https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2017/01/weodata/download.aspx>, Acesso em setembro de 2017a.

FMI/WEO, 2017b, World Economic Outlook Database, WEO Update, July 2017, International Monetary Fund – IMF, <http://www.imf.org/en/Publications/WEO/Issues/2017/07/07/world-economic-outlook-update-july-2017>, Acesso em setembro 2017b.

FONTANA, I., et al., *Ballancing a social accounting matrix: Theory and application*, Centre Interuniversitaire sur le Risque Politiques Economiques et L'Émloi (CIRPEE), Université Laval, 2005.

IBGE, *Notas Metodológicas de 1 a 21 – Nova Série do Sistema de Contas Nacionais*, referência 2000, Instituto Brasileiro de geografia e estatística, 2007.

IBGE, https://downloads.ibge.gov.br/downloads_estatisticas.htm, acesso em abril de 2017

PATUSCO, J. A. M., *Balanço Energético Nacional e Planejamento da Expansão de Energia - CPFL*, Seminário apresentado na Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), Campinas – Setembro de 2011.

RUTHERFORD, T.F., *General Equilibrium Modeling with MPSGE*, The University of Western Ontario, 1989.

RUTHERFORD, T. F., “Applied General Equilibrium Modeling with MP-SGE as a GAMS Subsystem, An Overview of the Modeling Framework and Syntax”, Department of Economics University of Colorado November, 1995.

RUTHERFORD, T., PALTSEV, S. *From an Input-Output Table to a General Equilibrium Model, Assessing the Excess Burden of Indirect Taxes in Russia*, Disponível em: < <http://web.mit.edu/paltsev/www/docs/exburden.pdf> >. Acesso em setembro 2017; 1999.

SHARMA, R.F.C., *Projeção da demanda energética no setor industrial brasileiro*, 131 p Dissertação (Mestrado em planejamento de sistemas energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2009.

SHARMA, R. F. C., BERNI, M. D. E BAJAY, S. V., *A indústria de celulose e papel do Brasil, Caracterização energética e projeções de sua demanda de energia para cenários de crescimento econômico e de conservação de energia*. In, CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA, 13. Anais, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, p. 221-32, Rio de Janeiro, RJ, 2010.

SHARMA, R.F.C., *Desenvolvimento de um modelo integrado de equilíbrio geral e desagregação estrutural para projetar a demanda energética do setor industrial brasileiro*. 198 p Tese (Doutorado em planejamento de sistemas energéticos) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2018.

APÊNDICE A

Compatibilização das atividades industriais das classificações CNAE2, CNAE1, CNAE1*, TRU43, TRU56, TRU51, BEN e BENCNAE

Observe-se que as descrições dos códigos não são exibidas visando minimizar o tamanho das tabelas, e podem ser obtidos da página da Comissão Nacional de Classificações (CONCLA/IBGE, 2017), na Internet. Apresenta-se no quadro A.1 o resultado da metodologia aqui apresentada.

Quadro A.1 - Compatibilização das atividades industriais

CNAE2	CNAE1	#	CNAE1*	TRU43	TRU56	TRU51	BEN	EFICIND
500	1000		1000	2	5	5	1	1.1
600	1110		1110	3	3	3	1	1.1
710	1310		1310	2	4	4	10	10.0
721	1321		1321	2	5	5	10	10.0
722	1322		1322	2	5	5	10	10.0
723	1323		1323	2	5	5	10	10.0
724	1324		1324	2	5	5	10	10.0
725	1325		1325	2	5	5	10	10.0
729	1329		1329	2	5	5	10	10.0
810	1410		1410	2	5	5	10	10.0
891	1421		1421	2	5	5	10	10.0
892	1422		1422	30	5	5	13	13.6
893	1429		1429	2	5	5	10	10.0
899	1429		1429	2	5	5	10	10.0
910	1120		1120	3	3	3	1	1.1
990	1429		1429	2	5	5	10	10.0
1011	1511		1511	26	6	6	13	13.3
1012	1511		1511	26	6	6	13	13.3
1013	1513		1513	26	6	6	13	13.3
1020	1514		1514	30	6	6	13	13.3
1031	1521		1521	25	6	6	13	13.6
1032	1522		1522	25	6	6	13	13.6
1033	1523		1523	25	6	6	13	13.4
1041	1531		1531	29	6	6	13	13.6
1042	1532		1532	29	6	6	13	13.6
1043	1533		1533	29	6	6	13	13.6
1051	1541		1541	27	6	6	13	13.2

CNAE2	CNAE1	#	CNAE1*	TRU43	TRU56	TRU51	BEN	EFICIND
1052	1542		1542	27	6	6	13	13.2
1053	1543		1543	30	6	6	13	13.6
1061	1551		1551	25	6	6	13	13.6
1062	1552		1552	25	6	6	13	13.6
1063	1553		1553	25	6	6	13	13.6
1064	1554		1554	25	6	6	13	13.6
1065	1555		1555	25	6	6	13	13.6
1066	1556		1556	30	6	6	13	13.6
1069	1559		1559	25	6	6	13	13.6
1071	1561		1561	28	6	6	13	13.1
1072	1562		1562	28	6	6	13	13.1
1081	1571		1571	24	6	6	13	13.6
1082	1572		1572	24	6	6	13	13.6
1091	1581		1581	30	6	6	13	13.6
1092	1582		1582	30	6	6	13	13.6
1093	1583		1583	30	6	6	13	13.6
1094	1584		1584	30	6	6	13	13.6
1095	1585		1585	25	6	6	13	13.6
1096	1589		1589	30	6	6	13	13.6
1099	1586		1586	30	6	6	13	13.6
1111	1591		1591	30	6	6	13	13.6
1112	1592		1592	30	6	6	13	13.6
1113	1593		1593	30	6	6	13	13.5
1121	1594		1594	30	6	6	13	13.6
1122	1595		1595	30	6	6	13	13.6
1210	1600	*	1764	21	7	7	17	17.5
1220	1600	*	1764	21	7	7	17	17.5
1311	1711		1711	21	8	8	14	14.1
1312	1722		1722	21	8	8	14	14.1
1313	1723		1723	21	8	8	14	14.1
1314	1724		1724	21	8	8	14	14.1
1321	1741		1741	21	8	8	14	14.2
1322	1741		1741	21	8	8	14	14.2
1323	1741		1741	21	8	8	14	14.2
1330	1771		1771	21	8	8	14	14.2
1340	1750		1750	21	8	8	14	14.2
1351	1761		1761	21	8	8	14	14.2
1352	1762		1762	21	8	8	14	14.2

CNAE2	CNAE1	#	CNAE1*	TRU43	TRU56	TRU51	BEN	EFICIND
1353	1763		1763	21	8	8	14	14.1
1354	1764		1763	21	8	8	14	14.2
1359	1769		1769	21	8	8	14	14.2
1411	1811		1811	22	9	9	14	14.3
1412	1812		1812	22	9	9	14	14.3
1413	1813		1813	22	9	9	14	14.3
1414	1821		1821	22	9	9	14	14.3
1421	1772		1772	21	8	8	14	14.2
1422	1779		1779	21	8	8	14	14.2
1510	1910		1910	23	10	10	17	17.1
1521	1921		1921	23	10	10	17	17.1
1529	1929		1929	23	10	10	17	17.1
1531	1931		1931	23	10	10	17	17.1
1532	1932		1932	23	10	10	17	17.1
1533	1933		1933	23	10	10	17	17.1
1539	1939		1939	23	10	10	17	17.1
1540	1939		1939	23	10	10	17	17.1
1610	2010		2010	13	11	11	17	17.1
1621	2021		2021	13	11	11	17	17.1
1622	2022		2022	13	11	11	17	17.1
1623	2023		2023	13	11	11	17	17.1
1629	2029		2029	13	11	11	17	17.1
1710	2110		2110	14	12	12	15	15.1
1721	2121		2121	14	12	12	15	15.2
1722	2122		2122	14	12	12	15	15.2
1731	2131		2131	14	12	12	15	15.3
1732	2132		2132	14	12	12	15	15.3
1733	2132		2132	14	12	12	15	15.3
1741	2142		2142	14	12	12	15	15.3
1742	2149		2149	14	12	12	15	15.3
1749	2149		2149	14	12	12	15	15.3
1811	2221		2221	14	13	13	17	17.1
1812	2222		2222	14	13	13	17	17.1
1813	2222		2222	14	13	13	17	17.1
1821	2229		2229	14	13	13	17	17.1
1822	2229		2229	14	13	13	17	17.1
1830	2232		2232	14	13	13	17	17.1
1921	2321	*	2320	17	14	14	1	1.2
1922	2329	*	2320	17	14	14	1	1.2

CNAE2	CNAE1	#	CNAE1*	TRU43	TRU56	TRU51	BEN	EFCIND
1931	2340		2340	16	15	15	1	1.2
1932	2429		2429	18	16	16	1	12.5
2011	2411		2411	16	16	16	12	12.1
2012	2412		2412	16	16	16	12	12.4
2013	2413		2413	18	16	16	12	12.4
2014	2414		2414	16	16	16	12	12.5
2019	2419		2419	16	16	16	12	12.5
2021	2421		2421	17	16	16	12	12.2
2022	2422		2422	17	16	16	12	12.5
2029	2429		2429	18	16	16	12	12.5
2031	2431		2431	17	17	17	12	12.3
2032	2432		2432	17	17	17	12	12.5
2033	2433		2433	17	17	17	12	12.5
2040	2442		2442	17	17	17	12	12.5
2051	2463		2463	18	19	19	12	12.5
2052	2461		2461	18	19	19	12	12.5
2061	2471		2471	19	20	20	12	12.5
2062	2472		2472	18	20	20	12	12.5
2063	2473		2473	19	20	20	12	12.5
2071	2481		2481	18	21	21	12	12.5
2072	2482		2482	18	21	21	12	12.5
2073	2483		2483	18	21	21	12	12.5
2091	2491		2491	18	22	22	12	12.5
2092	2492		2492	18	22	22	12	17.1
2093	2494		2494	18	22	22	12	12.5
2094	2493		2493	18	22	22	12	12.5
2099	2499		2499	18	22	22	12	12.5
2110	2451		2451	19	18	18	12	12.5
2121	2452		2452	19	18	18	12	17.1
2122	2453		2453	19	18	18	12	17.1
2123	2454		2454	19	18	18	12	17.1
2211	2511		2511	15	23	23	17	17.1
2212	2512		2512	15	23	23	17	17.1
2219	2519		2519	15	23	23	17	17.1
2221	2529		2529	20	23	23	17	17.1
2222	2522		2522	20	23	23	17	17.1
2223	2529		2529	20	23	23	17	17.1
2311	2611		2611	4	25	24	10	17.1
2312	2612		2612	4	25	24	10	17.1

CNAE2	CNAE1	#	CNAE1*	TRU43	TRU56	TRU51	BEN	EFICIND
2319	2619		2619	4	25	24	10	17.1
2320	2620		2620	4	24	24	7	7.0
2330	2630		2630	4	25	24	7	7.0
2341	2642		2642	4	25	24	16	16.4
2342	2641		2641	4	25	24	16	16.1
2349	2649		2649	4	25	24	16	16.2
2391	2691		2691	4	25	24	10	17.1
2392	2692		2692	4	25	24	17	17.1
2411	2713	*	2721	5	26	25	8	8.1
2412	2714	*	2722	5	26	25	9	9.0
2421	2723	*	2722	5	26	25	8	8.2
2422	2724	*	2711	5	26	25	8	8.2
2423	2725	*	2712	5	26	25	8	8.2
2424	2726	*	2729	5	26	25	8	8.2
2431	2731		2731	7	26	25	17	17.1
2439	2739		2739	7	26	25	17	17.1
2441	2741		2741	6	27	26	11	9.0
2442	2742		2742	6	27	26	11	11.2
2443	2749		2749	6	27	26	11	11.2
2449	2749		2749	6	27	26	11	11.2
2451	2751		2751	7	27	26	17	17.1
2452	2752		2752	6	27	26	17	17.1
2511	2811		2811	7	28	27	17	17.1
2512	2812		2812	7	28	27	17	17.1
2513	2813		2813	8	28	27	17	17.1
2521	2821		2813	8	28	27	17	17.1
2522	2822		2813	8	28	27	17	17.1
2531	2832		2832	6	28	27	17	17.1
2532	2833		2833	7	28	27	17	17.1
2539	2839		2839	7	28	27	17	17.1
2541	2841		2841	7	28	27	17	17.1
2542	2842		2842	7	28	27	17	17.1
2543	2843		2843	7	28	27	17	17.1
2550	2971		2971	8	29	28	17	17.1
2591	2891		2891	7	28	27	17	17.1
2592	2892		2892	7	28	27	17	17.1
2593	2893		2893	7	28	27	17	17.1
2599	2899		2899	7	28	27	17	17.1
2610	3210		3210	10	33	30	17	17.1

CNAE2	CNAE1	#	CNAE1*	TRU43	TRU56	TRU51	BEN	EFICIND
2621	3021		3021	10	31	30	17	17.1
2622	3022		3022	10	31	30	17	17.1
2631	3221		3210	10	33	30	17	17.1
2632	3222		3210	10	33	30	17	17.1
2640	3230		3230	10	33	30	17	17.1
2651	3320	*	3222	10	34	30	17	17.1
2652	3350		3350	31	34	30	17	17.1
2660	3310	*	3222	10	34	30	17	17.1
2670	3340		3330	10	34	30	17	17.1
2680	2496		2496	18	22	22	12	17.1
2710	3112		3022	10	32	29	17	17.1
2721	3141		3141	9	32	29	17	17.1
2722	3142		3142	12	32	29	17	17.1
2731	3121		3121	9	32	29	17	17.1
2732	3122		3122	9	32	29	17	17.1
2733	3130		3130	9	32	29	17	17.1
2740	3151		3151	9	32	29	17	17.1
2751	2981		2981	9	30	29	17	17.1
2759	2989		2989	9	30	29	17	17.1
2790	3199		3192	10	32	29	17	17.1
2811	2911		2899	7	29	28	17	17.1
2812	2912		2899	7	29	28	17	17.1
2813	2913		2899	7	29	28	17	17.1
2814	2914		2899	7	29	28	17	17.1
2815	2915		2915	8	29	28	17	17.1
2821	2921		2915	8	29	28	17	17.1
2822	2923		2915	8	29	28	17	17.1
2823	2924		2915	8	29	28	17	17.1
2824	2925		2925	8	29	28	17	17.1
2829	2929		2925	8	29	28	17	17.1
2831	2932		2925	8	29	28	17	17.1
2832	2931		2925	8	29	28	17	17.1
2833	2931		2925	8	29	28	17	17.1
2840	2940		2925	8	29	28	17	17.1
2851	2951		2925	8	29	28	17	17.1
2852	2952		2925	8	29	28	17	17.1
2853	2953		2925	8	29	28	17	17.1
2854	2954		2925	8	29	28	17	17.1
2861	2961		2925	8	29	28	17	17.1

CNAE2	CNAE1	#	CNAE1*	TRU43	TRU56	TRU51	BEN	EFICIND
2863	2963	*	2964	8	29	28	17	17.1
2864	2964	*	2964	8	29	28	17	17.1
2865	2965	*	2964	8	29	28	17	17.1
2866	2969	*	2964	8	29	28	17	17.1
2869	2969	*	2964	8	29	28	17	17.1
2910	3410		3410	11	35	31	17	17.1
2920	3420		3420	11	36	31	17	17.1
2930	3439		3439	11	37	32	17	17.1
2941	3441		3441	12	37	32	17	17.1
2942	3442		3442	12	37	32	17	17.1
2943	3443		3443	12	37	32	17	17.1
2944	3444		3444	12	37	32	17	17.1
2945	3160		3160	12	32	32	17	17.1
2949	3449	*	3613	13	37	32	17	17.1
2950	3450		3450	12	37	32	17	17.1
3011	3511		3511	12	38	33	17	17.1
3012	3512		3512	12	38	33	17	17.1
3031	3521		3521	12	38	33	17	17.1
3032	3522		3522	12	38	33	17	17.1
3041	3531		3531	12	38	33	17	17.1
3042	3531		3531	12	38	33	17	17.1
3050	2972		2972	8	29	33	17	17.1
3091	3591		3591	12	38	33	17	17.1
3092	3592		3592	12	38	33	17	17.1
3099	3599		3599	12	38	33	17	17.1
3101	3612		3599	12	39	34	17	17.1
3102	3612		3599	12	39	34	17	17.1
3103	3613		3599	12	39	34	17	17.1
3104	3614		3614	13	39	34	17	17.1
3211	3691		3691	31	39	34	17	17.1
3212	3699		3699	31	39	34	17	17.1
3220	3692		3692	31	39	34	17	17.1
3230	3693		3693	31	39	34	17	17.1
3240	3694		3694	31	39	34	17	17.1
3250	2454		2454	19	18	18	12	17.1
3291	3699		3699	31	39	34	17	17.1
3292	1822		1822	22	9	34	14	17.1
3299	3699		3699	31	39	34	17	17.1

CNAE2	CNAE1	#	CNAE1*	TRU43	TRU56	TRU51	BEN	EFICIND
3299	2971		2971	8	29	28	17	17.1
3299	3394	*	3340	31	34	28	17	17.1
3299	3189	*	3199	9	32	28	17	17.1
3299	2991	*	2914	8	29	28	17	17.1
3315	3523		3523	12	38	28	17	17.1
3316	3532		3532	12	38	28	17	17.1
3317	3512		3512	12	38	28	17	17.1
3299	2023		2023	13	11	28	17	17.1
3299	2891		2891	7	28	28	17	17.1
3299	2969	*	2964	8	29	28	17	17.1
3299	3699		3599	12	39	28	17	17.1
3299	3699		3599	12	39	28	17	17.1

APÊNDICE B

Valores agregados dos setores da classificação Eficind

Tabela B.1 - Valores agregados dos setores Eficind, de 2000 a 2006

Cód.	Descrição	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
1.0	Energético	45291	50531	55176	83169	74494	94259	102208
1.1	Energia primária	21758	26924	34002	37428	41357	57648	69353
1.2	Energia secundária	23533	23607	21173	45742	33137	36610	32855
2.0	Residencial	0	0	0	0	0	0	0
3.0	Comercial	1038479	1028261	1047298	1048414	1080386	1137980	1208277
4.0	Público	336949	354362	366881	361906	370112	391542	414519
5.0	Agropecuário	118597	121528	142827	162710	158080	133938	130827
6.0	Transportes	78856	78279	81793	76581	81960	85274	87756
7.0	Cimento	4486	5438	4978	7127	4895	3184	4997
8.0	Siderurgia	4132	4461	7470	12075	23497	24247	18435
8.1	Ferro Gusa	200	230	489	721	1893	1565	1060
8.2	Aço	3931	4231	6981	11354	21604	22683	17375
9.0	Ferro-ligas	1536	1698	2478	853	1893	1692	1325
10.0	Mineração e pelotização	7864	8045	11100	12215	16834	19330	20122
11.0	Metais não ferrosos	5615	4493	7275	7520	3787	4919	8283
11.1	Alumínio	3873	3056	4586	4940	2390	3250	5176
11.2	Outros	1742	1437	2689	2580	1397	1669	3107
12.0	Química	27719	23367	24064	32216	47359	37986	35584
12.1	Cloro e álcalis	534	553	412	356	554	585	884
12.2	Petroquímicos básicos	2413	1779	2175	3638	6528	7337	4848
12.3	Resinas termoplásticas	2622	2296	1114	2198	4335	3444	5265
12.4	Fertilizantes	2683	2915	3361	6348	7715	4628	3428
12.5	Outros	19467	15825	17001	19676	28227	21991	21158
13.0	Alimentos e bebidas	35944	37530	29021	37998	45790	56776	58640
13.1	Açúcares	4427	5360	4231	4952	5748	7623	9971
13.2	Laticínios	3585	2814	3088	2322	2617	5841	5681
13.3	Carnes	6069	7102	5688	8488	10807	12735	12910
13.4	Sucos	752	617	647	809	737	842	1174
13.5	Cervejas	4161	4982	2604	2728	3764	4978	5280

Cód.	Descrição	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
13.6	Outros	16952	16655	12763	18700	22117	24757	23624
14.0	Têxtil	31698	31494	29018	26607	26596	24828	26891
14.1	Fiação	2313	2347	2443	2175	2312	1526	1734
14.2	Tecelagem	11133	11641	12195	11943	10747	8715	9791
14.3	Confecção	18252	17506	14380	12489	13537	14586	15365
15.0	Papel e celulose	14907	12844	12411	16277	15915	12772	11697
15.1	Celulose	4061	3057	3069	3892	2856	2195	1790
15.2	Papel	4435	5022	5191	5772	6934	4918	4574
15.3	Embalagens	6411	4765	4151	6613	6125	5659	5334
16.0	Cerâmica	2603	2297	2152	3060	2839	2666	3720
16.1	Vermelha	1534	1386	1270	1769	1622	1516	2101
16.2	Sanitária	529	400	350	468	437	415	727
16.3	Revestimento	0	0	0	0	0	0	0
16.4	Outros	540	511	531	823	779	735	893
17.0	Outros	392576	390876	401668	369908	414335	413430	412940
17.1	Outros de outros	175739	184106	182302	191783	215618	218732	219956
17.2	SIUP	67387	71752	75725	73882	81764	82500	82276
17.3	Construção Civil	149449	135018	143641	104243	116953	112198	110708

Tabela B.2 - Valores agregados dos setores Eficind, de 2007 a 2013

Cód.	Descrição	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
1.0	Energético	94667	100394	84004	78556	79456	79842	75110
1.1	Energia primária	58344	78040	40905	58543	84142	98098	91305
1.2	Energia secundária	36322	22354	43099	20013	-4686	-18257	-16196
2.0	Residencial	0	0	0	0	0	0	0
3.0	Comercial	1292610	1317583	1374747	1438115	1492834	1567444	1630372
4.0	Público	440219	465981	487179	496063	509240	514995	548770
5.0	Agropecuário	140259	152441	149213	147508	161803	158498	176717
6.0	Transportes	100266	112157	109403	130655	140970	144574	149602
7.0	Cimento	3770	4699	5683	5716	5860	6193	5899
8.0	Siderurgia	22353	28336	11949	12741	13747	13950	14420
8.1	Ferro Gusa	1311	1907	388	521	656	752	588

Cód.	Descrição	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
8.2	Aço	21042	26429	11560	12220	13091	13198	13832
9.0	Ferro-ligas	2363	3405	1568	1666	2074	2414	1910
10.0	Mineração e pelotização	21721	29583	21799	42879	54161	48258	47484
11.0	Metais não ferrosos	8038	5581	4086	5491	5397	4263	5602
11.1	Alumínio	5115	3392	2161	2549	2867	1954	2730
11.2	Outros	2923	2190	1925	2942	2530	2309	2872
12.0	Química	37233	41410	32297	28418	27708	23851	26909
12.1	Cloro e álcalis	531	1304	422	203	180	310	235
12.2	Petroquímicos básicos	2212	1857	3408	2662	2620	2232	2660
12.3	Resinas termoplásticas	6585	5314	1243	2038	2055	1325	1407
12.4	Fertilizantes	6929	9798	3543	2442	2613	2319	2895
12.5	Outros	20976	23136	23681	21072	20240	17664	19711
13.0	Alimentos e bebidas	57161	61288	59781	69269	75964	78532	76041
13.1	Açúcares	5466	6021	9051	11936	13985	13989	11214
13.2	Laticínios	6784	6840	3974	4502	4621	5040	5453
13.3	Carnes	13549	15475	12730	15186	16775	16920	18011
13.4	Sucos	1653	1259	1000	1294	1365	1864	1667
13.5	Cervejas	5859	5663	5991	6548	6968	6086	5870
13.6	Outros	23850	26031	27034	29802	32250	34634	33827
14.0	Têxtil	29010	27952	28737	30415	32038	30305	28332
14.1	Fiação	1469	1216	1187	1704	1492	1512	1210
14.2	Tecelagem	8700	7950	7991	9383	9621	10178	9259
14.3	Confecção	18841	18787	19559	19329	20924	18614	17863
15.0	Papel e celulose	14033	11973	9693	14143	14357	12211	12710
15.1	Celulose	2723	2276	2168	3069	2936	2486	2406
15.2	Papel	4992	4222	2742	3994	4182	3872	4030
15.3	Embalagens	6318	5475	4783	7080	7239	5853	6273
16.0	Cerâmica	3311	3639	3923	4565	4634	4390	4560
16.1	Vermelha	2034	2351	2661	3171	3321	3164	3322
16.2	Sanitária	506	521	573	634	638	624	594
16.3	Revestimento	0	0	0	0	0	0	0
16.4	Outros	771	766	689	760	675	602	644
17.0	Outros	440685	452153	465702	540060	545367	536723	533395
17.1	Outros de outros	235873	255081	234461	263512	262023	248094	250725
17.2	SIUP	81223	73873	76616	85696	84484	79159	68261
17.3	Construção Civil	123589	123199	154624	190852	198860	209470	214409

Valores deflacionados em Milhões R\$ de 2009

INVESTIMENTO EM INFRAESTRUTURA ENERGÉTICA E O CRESCIMENTO ECONÔMICO BRASILEIRO NO PERÍODO DE 2003 A 2018

Andréia Ferreira Prestes¹
Fernanda Mendes Bezerra²
Gilmar Ribeiro de Mello³
Talita Egevardt de Castro³

¹Universidade Estadual do Oeste do Paraná

²Universidade Federal de Pernambuco

³Universidade de São Paulo

DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i2.456>

RESUMO

O desenvolvimento socioeconômico de um país provém de diversos fatores, um deles é o investimento em infraestrutura. Tal afirmativa pode ser resultado de um impacto direto que a infraestrutura causa em, praticamente, todo o processo produtivo, acarretando em retornos crescentes nos insumos (capital e trabalho) e nos investimentos privados, interferindo, assim, na industrialização, na elevação do nível de emprego e na renda da população. A fim de corroborar com essa afirmação, o objetivo deste trabalho é investigar se existe relação entre investimento em infraestrutura e crescimento econômico no Brasil, enfatizando o setor de energia elétrica no período de 2003 a 2018. Para esse propósito, estimou-se o modelo de Vetor Autorregressivo (VAR). Os resultados indicam que existe uma relação significativa entre o consumo de energia elétrica e o crescimento econômico brasileiro. Desta forma, o investimento em infraestrutura energética se torna condição necessária para que o crescimento econômico seja alavancado no Brasil.

Palavras-chave: Crescimento econômico, Infraestrutura energética, Investimento, Setor Industrial, Vetor Autorregressivo (VAR).

ABSTRACT

The socioeconomic development of a country comes from several factors, one of them is the investment in infrastructure. This fact can be a result of a direct impact that infrastructure causes in, practically, the whole productive process, leading to increasing returns to inputs (capital and labor) and to private investments, thus interfering in industrialization,

raising the level of employment and income of the population. In order to corroborate this assertion, the objective of this work is to investigate whether there is a relationship between infrastructure investment and economic growth in Brazil, emphasizing the electric energy sector in the period from 2003 to 2018. For this purpose, it was estimated the Vector Autoregressive (VAR). The results indicate that there is a significant relationship between electricity consumption and Brazilian economic growth, so investment in energy infrastructure becomes a necessary condition for economic growth to be leveraged in Brazil.

Keywords: Economic growth, Energetic infrastructure, Investment, Industrial Sector, Autoregressive Vector (VAR).

1. INTRODUÇÃO

A disponibilidade de infraestrutura pode ser um dos fatores determinantes para a geração do crescimento e do desenvolvimento socioeconômico de uma região. Infraestrutura esta que é capaz de dar suporte para as atividades produtivas e para toda a população.

De acordo com Hirschman (1958), investir em infraestrutura é importante para a economia, pois possibilita um ambiente adequado para a instalação e expansão industrial. Medeiros e Ribeiro (2019) relatam que a disponibilidade da infraestrutura resulta na redução de custo, tornando as atividades mais rentáveis, incentivando as indústrias a ampliar e a diversificar suas produções, impulsionando, assim, a geração de renda, emprego e demanda dos consumidores. Além desses fatores, Campos Neto e Moura (2012) relatam que o consumidor também se beneficia nesse processo, devido ao aumento do poder de compra, ao barateamento e a maior disponibilidade de mercadorias, o que resulta em ganhos de bem-estar, reduzindo a pobreza e a desigualdade social.

No mesmo sentido, Frischtak (2013) defende que, para haver aceleração da economia, o investimento em infraestrutura é fundamental, de modo que os setores de energia, transporte, saneamento e telecomunicações apresentam grande relevância, por serem um conjunto de operações fundamentais que viabilizam a maior eficiência do sistema econômico e do desenvolvimento regional. Por isso, a escassez ou a ineficiência na alocação dos recursos voltados para estes setores básicos pode acarretar em problemas setoriais e macroeconômicos, afetando a riqueza regional e nacional.

O Brasil, em seu período histórico, especialmente entre 1930 e 1979, apresentou elevados níveis de investimento em infraestrutura, sendo grande parte no setor público, o qual chegou a representar cerca de 5,42% do Produto Interno Bruto (PIB). Tais aplicações auxiliaram na estruturação e diversificação da economia, mesmo que de forma razoável. No entanto, o Brasil ainda sofre com a carência de oferta e

qualidade de infraestrutura, resultado da redução de investimentos, o qual, no ano de 2017, chegou a 1,5% do PIB, um dos menores da história do país (MEDEIROS; RIBEIRO, 2019).

Por isso, analisar o investimento em infraestrutura se faz importante, visto que está relacionado com praticamente todo o processo produtivo. Nesta pesquisa, o enfoque se dará para a infraestrutura energética, pois, segundo a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2008), o consumo de energia elétrica é elemento chave para o aquecimento econômico. Tal investimento reflete tanto no ritmo dos setores industriais, comerciais e de serviços, quanto na capacidade de aumentar o bem-estar populacional.

Conforme a Aneel (2019), nos últimos anos, o consumo de energia está em constante aumento, sendo o setor industrial um dos principais consumidores, juntamente com a região Sudeste, não apenas por ser a mais populosa, mas por ser a mais industrializada do Brasil. Além disso, Gotardo, Barchet e Piffer (2016) defendem que este setor possui papel fundamental, dado que a estrutura industrial reflete, diretamente, no crescimento econômico da região. Por isso, nesta pesquisa, parte-se da hipótese de que a infraestrutura energética é importante no processo de aceleração do crescimento econômico, logo, o investimento contínuo neste segmento se faz necessário.

Apesar da visível importância deste setor, o Brasil ainda sofre com crises elétricas. A despeito de 70% da produção total no ano de 2017 ser originada de fonte limpas, cerca de 65% advêm da geração hídrica, deixando o país dependente desse meio de geração. E, por isso, para suprir a demanda de energia elétrica em períodos de escassez de chuva, as termoeletricas são ligadas a um custo mais elevado, devido ao alto valor da matéria prima utilizada para a geração de energia. Este procedimento acarreta em aumentos na conta de energia elétrica dos consumidores, levando as indústrias a obterem um custo maior de produção, o que acaba por encarecer o seu produto, perdendo competitividade externa, reduzindo a produção e, assim, gerando desemprego (ANEEL, 2019).

Dado este cenário, esta pesquisa pretende contribuir com o tema, discutir com a literatura e auxiliar nas tomadas de decisões de políticas públicas. Desta forma, o objetivo deste trabalho é investigar a existência da relação entre o investimento em infraestrutura e o crescimento econômico no Brasil, com ênfase no setor de energia elétrica, para o período de 2003 a 2018.

Este trabalho encontra-se dividido em cinco seções, além desta introdução, referencial teórico e revisão de literatura com trabalhos teóricos e empíricos sobre a relação entre investimento em infraestrutura, crescimento econômico e energia elétrica. A terceira e quarta seção apresentam a metodologia e a análise dos resultados estimados e, por fim, as considerações finais. para o período de 2003 a 2018.

2. CONTRIBUIÇÕES TEÓRICAS E EMPÍRICAS

2.1 Infraestrutura e crescimento econômico

O investimento local e o provimento em infraestrutura são fatores que agem de maneira incentivadora para outros investimentos, por meio do efeito encadeamento setorial e regional. Uma das teorias que defende a importância do investimento no desenvolvimento e no crescimento regional é a de Albert Hirschman.

Para Hirschmann (1958), o investimento é fundamental para alavancar a economia da região, uma vez que expande a produção, aumenta o emprego e a renda e, também, estimula novos investimentos em setores adicionais, a jusante ou a montante da base produtiva. Por isso, o autor defende que, devido a essa complementariedade, deve-se tomar decisões estratégicas, investindo, primeiro, em setores com maior efeito encadeamento, ou seja, para frente e para trás, capaz de gerar investimentos adicionais na economia da região.

No entanto, decidir uma ordem ótima para os investimentos não é tarefa fácil. Por isso, um dos setores que Hirschmann (1958) defende é o da infraestrutura, composto pelo emprego de capital em energia, transporte, telecomunicação, saneamento básico, entre outros setores capazes de expandir as atividades produtivas. Dessa forma, a disponibilidade de infraestrutura pode gerar efeitos multiplicadores e de expansão no restante da economia, contribuindo para o crescimento e desenvolvimento econômico e social.

À vista disso, existem inúmeras pesquisas teóricas e empíricas que abordam esse tema. Para avaliar a contribuição da infraestrutura no crescimento da América Latina, Calderón e Servén (2010) analisaram 136 países no período entre 1960 a 2005. Nos resultados, os autores relataram que um baixo nível de infraestrutura é visto como um obstáculo importante para a economia em desenvolvimento. Assim, as inadequadas condições básicas de uma sociedade na América Latina estão atrasando o crescimento e a redução da pobreza. Por esse motivo, tal questão tornou-se uma das principais prioridades na agenda política.

Zackseski (2012) buscou determinar a relação de causalidade entre investimento em infraestrutura e crescimento econômico para o Brasil no período 1947-2009, através do modelo VAR. Os resultados demonstraram evidências de que o crescimento precede o investimento. Porém, o teste de causalidade de SIMS (1972), mencionado no referido trabalho, apresentou correlação negativa entre as variáveis. política.

Castro (2014) também pesquisou a respeito da infraestrutura pública sobre o crescimento econômico das cidades brasileiras, porém, para o período de 1970 a 2010 e, por meio da utilização de dados em painel com dependência espacial. Os resultados apontaram que os setores da infraestrutura afetam positivamente o crescimento econômico regional, sendo o acesso à energia elétrica e à telefonia os de maior impacto. Para o autor, o resultado já era esperado, uma vez que os componentes da infraestrutura são pré-condição para a atividade produtiva.

Schettini e Azzoni (2015) avaliaram o papel da infraestrutura sobre a produtividade das indústrias brasileiras e constataram o aumento de 1% de rodovias, o que eleva a eficiência produtiva em 0,12%. Na mesma lógica, o aumento de infraestrutura urbana eleva 0,24% e a telefonia 0,14%, significando que a infraestrutura afeta positivamente a eficiência das indústrias.

Medeiros e Teixeira (2016) analisaram no longo prazo as relações entre infraestrutura, competitividade e os demais investimentos no Brasil. Inferiram que, a partir de 1980, o país não conseguiu manter o nível de investimento em infraestrutura, de forma a perder competitividade e limitando os investimentos adicionais na economia brasileira. Além disso, os autores evidenciaram, empiricamente, uma relação a longo prazo entre infraestrutura, competitividade e investimentos, indicando a necessidade de maior planejamento nesses setores.

Ao contrário dos autores supracitados, Ansar et al. (2016) rejeitam a hipótese de que o investimento intensivo em infraestrutura provoca o crescimento econômico. Analisando o caso da China, os autores observaram gastos em infraestrutura mal gerenciados, projetos improdutivos, qualidade inferior, com custos acima do estimado, prejudicando a prosperidade da economia, uma vez que isso gera dívidas e fragilidades nos diversos sistemas. Por isso, os autores alegam que o modelo da China não deve ser seguido por outros países, mas sim evitado.

2.2 Energia elétrica e crescimento econômico

Dentre os setores de infraestrutura, o destaque desta pesquisa é dado para a energia elétrica, a qual é considerada uma das principais variáveis indutoras do crescimento do PIB. Para Bernardy et al. (2014), a infraestrutura energética promove a diversificação das atividades produtivas, a interação entre as regiões, além de promover novas oportunidades econômicas. Por isso, inúmeras pesquisas analisam esse tema.

Karanfil e Li (2014) examinaram a dinamicidade do consumo de eletricidade e do crescimento econômico de 160 países, no período

de 1980 a 2010. Os autores concluíram que o crescimento econômico é altamente sensível às diferenças regionais e ao nível de renda.

Por sua vez, Bhattacharya et al. (2016) investigaram os efeitos do consumo de energia renovável para o crescimento econômico, entre os anos de 1991 a 2012, para os 38 países que mais consomem tal energia. Apesar da não homogeneidade entre os locais, evidenciaram que o consumo de energia renovável impacta positivamente no crescimento econômico em 57% dos países da amostra.

A dependência hídrica para a geração de energia elétrica também pode ser evidenciada em outros países. Segundo Bekoe e Logah (2013), Gana também é dependente das hidrelétricas, e a seca neste país está causando problemas graves, como por exemplo, o racionamento de energia, o qual afetou todos os setores da economia, resultando em uma redução na produção, mão de obra ociosa, encolhimento das receitas passadas para o estado, entre outros fatores. Por isso, os autores sugerem utilizar os recursos da melhor maneira agora, para não sofrer ainda mais no futuro.

No que tange o Brasil, Pires (2012) relata que o país tem uma das energias mais caras do mundo. Segundo o autor, estudos realizados pelas associações e federações industriais mostram a perda de competitividade do produto brasileiro e a queda nos investimentos por parte das indústrias internacionais. Esta situação encontra-se interligada com os altos preços da energia no país, fazendo com que o investimento obtenha um retorno mais baixo, ou seja, se tornando menos atrativo para o capital estrangeiro.

Carminati e Scalco (2013) buscaram encontrar as relações causais do PIB com consumo e oferta de energia no Brasil, no período de 1970-2007. Os resultados demonstraram que alterações positivas no produto afetam o consumo de energia diretamente, o contrário também é válido, além do PIB aumentar a demanda de energia. Uma vez que, o crescimento do produto pode orientar as decisões políticas no fornecimento de infraestrutura energética, políticas públicas que visam estimular o investimento em infraestrutura, dentre elas a energética, podem servir como instrumentos para promoção do crescimento econômico, no longo prazo. Caso contrário, interrupções na oferta de energia podem causar sérias perdas econômicas e financeiras ao país.

Vizioli (2014) fez uma análise da relação entre o investimento público em energia e o crescimento econômico no Brasil, no período de 2000 a 2012. Os resultados mostraram que existe uma associação forte e consistente entre o crescimento do PIB per capita brasileiro e os investimentos públicos em energia, confirmando a tese de que o Estado tem papel fundamental nesse setor para a promoção do crescimento econômico.

A importância do investimento em infraestrutura energética para o crescimento econômico fica clara na literatura. Segundo a Aneel (2019), a demanda energética só vem aumentando, em torno de 85% de 2003 para 2017. Para prevenir futuras crises e permitir que o país continue crescendo é necessário ter uma infraestrutura que suporte tal elevação, para isso, é imprescindível planejamento e, para executar, é preciso investimento.

Neste contexto, esta pesquisa busca investigar a relação entre o investimento em infraestrutura energética e o crescimento econômico brasileiro, cujo método e variáveis de análise encontram-se descritos na próxima seção.

3. METODOLOGIA

Esta seção tem como finalidade apresentar a forma pela qual será respondido o objetivo do estudo, por isso encontra-se dividida em duas subseções, na primeira constam as variáveis, o período, as fontes dos dados, o tratamento, entre outros fatores e, na segunda, o método a ser utilizado.

3.1 Fontes de dados e tratamento

A abordagem empregada nesta pesquisa é de caráter quantitativa, mediante a utilização de séries temporais, baseada em autores, tais como Zackseski (2012), Carminat e Scaldo (2013), Karanfil e Li (2014), Bhattacharya et al. (2016) e Medeiros e Teixeira (2016).

Os dados são de periodicidade trimestral, a partir de janeiro de 2003 até setembro de 2018, a nível nacional, totalizando 63 observações. A escolha deste período é decorrente da disponibilidade dos dados encontrados, juntamente com as alterações estruturais ocorridas nesse segmento. Conforme a Aneel (2019), no período de 2003 a 2018, o Brasil, em termos gerais, teve aumento da demanda por energia elétrica quase que contínuo ao longo de sua trajetória, com reduções apenas nas crises energéticas, uma vez que o país, em pouco mais de uma década, enfrentou três crises de abastecimento de energia, resultando em apagões e impactando nos setores e regiões.

Considerando tais fatores, juntamente com a literatura (ZACKSESKI, 2012; MEDEIROS; TEIXEIRA, 2012; CARMINAT; SCALDO, 2013; VIZIOLI, 2014; KARANFIL; LI, 2014; BHATTACHARYA et al., 2016), a análise empírica se baseia nas variáveis PIB, consumo de energia elétrica do setor industrial e preço médio de energia elétrica. Gotardo, Barchet e Piffer (2016) também corroboraram na escolha, pois defendem que o padrão de crescimento econômico está associado

à estrutura industrial. Por isso, os dados selecionados estão voltados para a indústria brasileira.

A Tabela 1 expõe o conjunto dos dados, juntamente com a sigla de cada variável, unidade de valor e a fonte extraída.

Tabela 1 - Dados da pesquisa

Variável	Sigla	Unidade	Fonte
Consumo Energia Elétrica Industrial	CEEI	MWh	ANEEL
Produto Interno Bruto (valor corrente)	PIB	Milhões	IBGE
Tarifa de Energia Elétrica	TEE	Valor	ANEEL

Basicamente, as fontes utilizadas foram o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e a Aneel, ambos são órgãos governamentais, em que, o primeiro disponibiliza informações demográficas e socioeconômicas e, o segundo dispõe dos dados relacionados desde a produção até o consumo de energia elétrica para os vários segmentos econômicos e regiões.

Como a metodologia baseia-se em séries temporais, todos os dados foram deflacionados com base no Índice Geral de Preço – Disponibilidade Interna (IGP-DI), da Fundação Getúlio Vargas (FGV) e extraídos no IpeaData, com período base de janeiro de 2003. Além disso, como as variáveis possuem unidades de medidas diferentes, os coeficientes poderiam não representar de maneira adequada a relação entre elas, em vista disso, optou-se por utilizar os dados como forma de logarítmicos naturais.

3.2 Modelo econométrico

Como destacado, a análise empírica da relação entre o PIB, CEEI e a TEE analisa-se por meio de séries temporais e, um dos modelos que permite fazer essa estimação é o VAR. Segundo Caiado (2002), o referido modelo leva em consideração a existência de relações de interdependência entre as variáveis, permitindo avaliar o impacto das perturbações aleatórias sobre o sistema de equações. Dessa forma, torna-se possível verificar a inter-relação e o comportamento das variáveis em resposta a choques individuais nos componentes do sistema, bem como, a obtenção de elasticidades entre as variáveis em séries temporais futuras.

Além disso, segundo Alves e Bacchi (2004), a metodologia VAR permite fazer a decomposição histórica da variância dos erros de previsões futuras, analisando os choques sofridos em cada uma das variáveis ocorridas no passado. Podendo, assim, explicar os desvios das variáveis em relação à previsão realizada no início do período considerado. Portanto, os impactos no PIB podem ser analisados mediante a função impulso-resposta, que demonstra o efeito corrente e futuro sobre as variáveis endógenas.

Segundo Alves e Bacchi (2004), de forma geral, o modelo VAR pode ser expresso conforme descrito na Equação (1), em que B_0 é matriz de relações contemporâneas, γ_t é o vetor da variável de interesse, B_j são matrizes de parâmetros de ordem $(n \times n)$ e e_t é o termo de erro.

$$B_0\gamma_t = B_1\gamma_{t-1} + B_2\gamma_{t-2} + \dots + B_\rho\gamma_{t-\rho} + e_t \quad (1)$$

Para fazer a estimação do modelo VAR, uma condição necessária é que a série temporal seja estacionária no período analisado. Caso contrário, a utilização de séries não estacionárias pode ocasionar na obtenção de coeficientes e desvios-padrão inconsistentes, acarretando em resultados não confiáveis (GUJARATI, 2006).

Desta forma, para verificar se a série é estacionária, deve-se examinar a existência ou não de raiz unitária. Caso a série não seja estacionária, deve-se diferenciá-la até que se torne estacionária. Para este propósito, aplica-se o teste de Dickey-Fuller Aumentado (ADF), que se trata de uma extensão do teste de Dickey-Fuller (DF), em que u_t passou de não correlacionado para correlacionado.

Segundo Gujarati (2006), de forma geral o teste ADF é dado pela Equação (2), em que γ_t é um passeio aleatório com deslocamento em torno de uma tendência determinística.

$$\Delta Y_t = \beta_1 + \beta_2 t + \delta Y_{t-1} + \sum_{i=1}^m \alpha_i \Delta Y_{t-1} + \varepsilon_t \quad (2)$$

Se, na Equação (2), $\delta = 0$, a variável possui raiz unitária e a série caracteriza-se como não estacionária. Porém, se a hipótese alternativa é $\delta < 0$, a série é estacionária e não possui raiz unitária.

As séries que não são estacionárias por nível podem se transformar em estacionárias na primeira, $I(1)$, ou na segunda, $I(2)$, diferença. Se as variáveis apresentarem estacionariedade com ordens diferentes, aplica-se o modelo VAR.

Segundo Gujarati (2006), a principal dificuldade do referido modelo está na escolha do número de Lags (quantidade de defasagem), porém, para não ocorrer problema na estimação, deve-se incluir uma quantidade de defasagem suficiente para que os erros não sejam serialmente correlacionados. Outra opção para a escolha da defasagem é por meio do critério de informação de Akaike (AIC) ou Schwarz (SC).

No caso da aplicação do teste em software, as defasagens já vêm indicadas. Contudo, mesmo assim, é preciso verificar qual conjugação dos critérios de informação apresentam menores valores. O número de Lags escolhido deve atender os pressupostos de estabilidade, normalidade dos resíduos, ausência de autocorrelação residual e a homocedasticidade.

Segundo Gujarati (2006), o teste de autocorrelação é necessário nas variáveis da série, pois em caso de presença de autocorrelação há um viés nos estimadores, ou seja, subestima-se a variância residual, o desvio padrão e, além disso, leva a problemas de interpretação dos testes de significância. Ao considerar um nível de significância de 5%, se p-valor for maior que 0,05 a hipótese nula de inexistência de autocorrelação não é rejeitada. Por outro lado, se o p-valor for menor existe autocorrelação na série.

Segundo Corrar, Paulo e Dias Filho (2012), o teste de homocedasticidade é satisfeito quando os resíduos se distribuem, aleatoriamente, em torno da reta de regressão e de forma constante, ou seja, a variância dos resíduos é igual a uma constante para todos os valores de x .

Atendido aos pressupostos, parte-se para a análise do VAR, a qual é realizada via função impulso resposta e a decomposição da variância. A função impulso resposta demonstra como a estrutura dinâmica das variáveis se comporta. Para isso, apresenta-se, graficamente, como um choque em uma variável afetará a outra, isto é, qual a resposta impulso desse choque em um determinado período de tempo. Já a decomposição da variância demonstra, em termos percentuais, quanto uma variável explica a outra.

Para deixar a pesquisa mais completa, optou-se por estimar o teste de Causalidade de Granger, o qual foi utilizado por Zackseski (2012), Carminat e Scaldo (2013) e Karanfil e Li (2014), por este ser capaz de explicar a relação entre as variáveis do estudo. Segundo Gujarati (2006), para estudar esse teste é importante fazer a seguinte pergunta: A variação de X é o que causa variação em Y ou é a variação de Y que causa o X ?

Para calcular o modelo e todos os testes utiliza-se o software Eviews 9. A análise dos resultados está disposta na próxima seção.

4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

A primeira etapa do trabalho consistiu em verificar a estacionariedade das séries temporais. Para esse propósito foi aplicado o teste ADF, a fim de identificar se as séries são estacionárias em nível ou em diferença e, assim, poder identificar se o modelo mais apropriado é o VAR. Os resultados encontram-se expostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Teste ADF

Variável	Diferenciação	T	5%	P- Valor
CEEI	I (0)	-2,17	-1,94	0.0297
PIB	I (2)	-4,38	-1,94	0.0000
TEE	I (1)	-2,99	-1,94	0.0033

Considerando um nível de significância de 5%, é possível rejeitar a hipótese nula, para CEEI em nível, para PIB com duas diferenciações e para TEE com uma diferença, todas se tornaram estacionárias sem tendência e constante.

Como as séries não são estacionárias de mesma ordem, o VAR é o modelo adequado. Segundo Einfeld et al. (2007), no modelo VAR, as variáveis são endógenas e dependem das próprias defasagens e também das demais séries, em que a escolha ocorre de forma arbitrária. Portanto, para prosseguir com a análise é indispensável a escolha do número ótimo de defasagens. Conforme os resultados dispostos na Tabela (3), todos os critérios apontaram para Lag 3, dessa maneira, foi o modelo escolhido e será chamado de VAR (3).

Tabela 3 - Escolha ótima dos lags – VAR

Lag	LogL	LR	FPE	AIC	SC	HQ
3	364.7185	104.4129*	1.97e-09*	-11.54202*	-10.47627*	-11.12689*

* Indica a ordem da defasagem pelo critério de seleção. AIC: Critério de Informação de Akaike; SC: Critério de Informação de Schwarz e HQ: Critério de Informação de Hannan-Quinn.

Todavia, para prosseguir as estimações com propriedade, é necessário testar a estabilidade e alguns pressupostos do VAR (3). O resultado da estabilidade está representado na Figura 1. Nota-se que todas as representações se encontram dentro do círculo que indica a

delimitação da raiz unitária. Assim, o modelo VAR (3) satisfaz a condição de estabilidade.

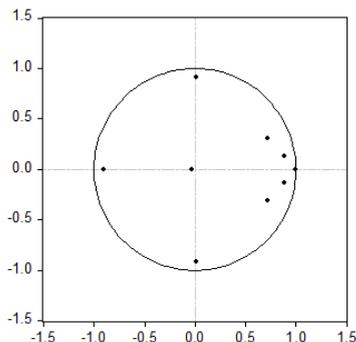


Figura 1 - Estabilidade do modelo VAR (3)

Para atender aos pressupostos do VAR (3), foi considerado como critério um nível de significância de 95%. No teste de normalidade Skewness, a hipótese nula não foi rejeitada, dado um p-valor de 0,30, maior que 0,05, confirmando a normalidade dos resíduos. O teste de autocorrelação LM mostra ausência de autocorrelação residual, devido ao p-valor ser 0,31, sendo maior que 0,05 garante a confiabilidade das estatísticas e eficiência do modelo. O teste de homocedasticidade apresentou um p-valor de 0,12, como maior que 0,05 a hipótese nula de variância homocedástica não é rejeitada.

Verificado o atendimento dos pressupostos, o próximo passo é interpretar o VAR (3) através da análise da função impulso resposta e da decomposição da variância. A função impulso resposta representada na Figura 2 pela linha do meio (contínua) demonstra o comportamento de uma variável endógena quando sofre um choque de outra variável endógena e as linhas dos extremos (pontilhadas) demonstram dois desvios padrão.

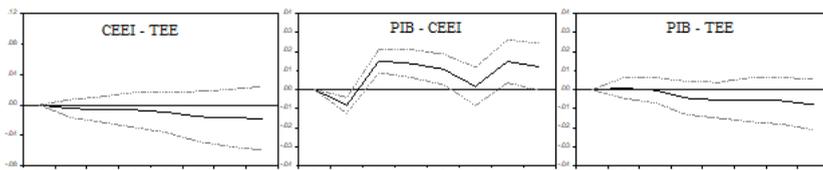


Figura 2 - Análise da função de resposta ao impulso

Como pode-se observar, no primeiro gráfico da Figura 2, a linha contínua se posiciona abaixo de zero, demonstrando que um choque na tarifa da energia elétrica afeta o consumo industrial negativamente, ou seja, se houver um aumento no preço, as indústrias, imediatamente, reduzem o consumo, o que, conseqüentemente, reduz a produção. Conforme mensurado por Schettini e Azzoni (2015), a infraestrutura afeta positivamente na produtividade e na eficiência das indústrias. Dessa forma, um aumento no preço reduz a produção e torna a região menos competitiva.

O segundo gráfico representa que o PIB, após um choque no consumo industrial de energia elétrica, responde de forma negativa até o segundo trimestre. Este primeiro reflexo pode ser explicado pelo fato dos dados serem comparados no mesmo período em que as indústrias utilizam da energia elétrica para produzir, porém, não efetivam a venda no mesmo momento. Com isso, primeiramente, afeta o consumo e, somente após a venda do produto, contabiliza-se no PIB. Mas, após esse período, além dos reflexos serem significantes, se mostram positivos, na maior parte do tempo, pois a linha contínua se localiza acima de zero. Portanto, um aumento no consumo de energia elétrica pelas indústrias irá afetar o PIB positivamente, gerando crescimento econômico.

O último gráfico comprova os dois primeiros, demonstrando que o processo funciona como um círculo, isto é, se o preço da energia elétrica afeta o consumo desta no setor industrial e, se este consumo afeta o PIB, logo, alterações na tarifa impactam o PIB negativamente. Em outras palavras, um aumento no preço da energia elétrica desacelera a economia.

Para verificar o impacto, em termos percentuais, utiliza-se a decomposição da variância que está expressa na Tabela (4). Tais dados demonstram que no oitavo período houve uma variação no consumo de energia elétrica do setor industrial, a qual impactou o PIB em 18,46% e uma variação na tarifa influenciou 10,01% no PIB, ambos os resultados são positivos e de grande significância. Dessa forma, confirmou-se o resultado do trabalho de Zackseski (2012), o qual utilizou o mesmo modelo para verificar esta relação, porém para um período diferente, 1947-2009.

Tabela 4 - Decomposição da variância - VAR (3)

CEEI		PIB		TEE	
PIB (-2)	TEE (-1)	CEEI (0)	TEE (-1)	CEEI (0)	PIB (-2)
18,46%	3,37%	27,97%	5,07%	7,893%	10,01%

De forma geral, os resultados encontrados pela aplicação do modelo VAR indicam que os fatores CEEI e TEE são importantes determinantes para o crescimento da economia brasileira, explicando, respectivamente, 27,97% e 5,07%. Estes resultados deixam claro a necessidade de uma estrutura energética que suporte a crescente demanda de eletricidade, para evitar crises de abastecimento elétrico, além de garantir uma energia barata e de qualidade.

No que tange o teste de Causalidade de Granger, os resultados encontram-se descritos na Tabela (5). Considerando um nível de significância de 5%, a hipótese nula é rejeitada devido à relação entre o PIB e o CEEI serem menor que 0,05, o inverso também é válido. Portanto, no sentido de Granger, há evidências de que quando o desempenho do cenário econômico está favorável, gerando crescimento no PIB, o consumo de energia elétrica industrial responde de forma positiva e, o inverso também acontece.

Tabela 5 - Teste de causalidade de Granger

Hipótese nula	P-valor
PIB não causa CEEI	0,0000
CEEI não causa PIB	0,0000
TEE não causa CEEI	0,4597
CEEI não causa TEE	0,0982
TEE não causa PIB	0,7860
PIB não causa TEE	0,7250

Carminati e Scalco (2013) chegaram ao mesmo resultado em relação ao consumo final energético com o PIB e o PIB com consumo, implicando assim em uma bi-causalidade entre essas duas variáveis PIB e CEEI, em longo prazo. Mediante este resultado, os autores defendem que políticas públicas devem ser tomadas para estimular o investimento em infraestrutura (energética), promovendo, assim, o crescimento em um período de tempo extenso.

No entanto, observa-se que as demais relações não são, estatisticamente, significativas, por isso, no sentido de Granger, nada se pode inferir sobre a relação entre TEE com o CEEI e com o PIB. Dessa maneira, os resultados divergem, parcialmente, dos encontrados no modelo VAR.

Contudo, observa-se que o objetivo desta pesquisa se comprova mediante a relação positiva entre o CEEI e o PIB, tanto no modelo VAR como no teste de Causalidade de Granger, ou seja, o consumo

de energia elétrica do setor industrial impacta diretamente o crescimento da economia. Dessa maneira, a hipótese deste estudo de que a infraestrutura energética afeta o crescimento da economia pode ser confirmada. Esta confirmação vai de encontro com a discussão de Castro (2014), o qual defende a importância de uma infraestrutura de qualidade para gerar crescimento e desenvolvimento econômico.

Em contrapartida, Ansar et al. (2016) chegaram a resultados opostos, isto é, que investimento em infraestrutura não leva ao crescimento econômico. No entanto, os autores se depararam com um cenário de projetos mal gerenciados e improdutivo. Por isso, Hirschman (1958) defende que o investimento deve ser planejado, além de ser aplicado em setores estratégicos para gerar encadeamento da economia e tornar um ambiente propício para novos investimentos.

Para Calderón e Servén (2010), o baixo nível de infraestrutura é um obstáculo para as economias em desenvolvimento, gerando atraso no crescimento econômico. Além disso, os autores verificaram que dentre os países da América Latina, de 1981 a 2001, apenas o Chile teve aumento no investimento em infraestrutura, não obstante, o Brasil é o país com maior redução, representando menos de 3% do PIB. Conforme Medeiros e Teixeira (2016), baixos investimentos em infraestrutura contribuíram para a perda de competitividade, além de limitar os investimentos adicionais na economia.

No setor energético, fica evidente a relação positiva entre o consumo e o crescimento. Os resultados encontrados são favoráveis aos evidenciados por Pires (2012) e Vizioli (2014), Karanfil e Li (2014) além dos outros autores já discutidos anteriormente. Bhattacharya et al. (2016) chegaram a mesma conclusão na maioria dos países analisados, apesar de analisarem apenas as fontes renováveis de energia. No entanto, o Brasil faz parte da minoria, ou seja, não obteve dados significativos de que as fontes de energias renováveis são condutoras ou barreiras para o crescimento econômico. Como justificativa, os autores destacam que o Brasil não utiliza as fontes de energias renováveis de maneira eficaz no processo de produção, de forma a impactar na economia como um todo.

Para Bernardy et al. (2014), o setor de energia elétrica está relacionado, não somente em termos econômicos, como por meio da interação entre as regiões e a diversificação produtiva, mas também socialmente por meio do surgimento de novas oportunidades para a população. Por esse motivo, quando ocorre um acréscimo no consumo de energia elétrica, em contrapartida, deve haver o investimento neste setor, caso contrário, o mercado elétrico poderá ficar deficitário no abastecimento de energia, levando a contenção do consumo. Nessa conjectura, investir em infraestrutura é um fator decisivo para a reestruturação do país, em que gargalos referentes ao investimento

insuficiente devem ser resolvidos.

Desta forma, fica visível a importância do planejamento e o investimento em fontes alternativas de energia, com o objetivo de deixar de ser dependente apenas das hidrelétricas, como destacado por Bekoe e Logah (2013) em Gana. Evitando, assim, racionamentos, apagões e elevação do custo, ocasionados pela falta de energia, o que acaba por deixar os produtos e serviços com um preço ainda mais elevado.

Segundo informações disponíveis no site da ANEEL (2019), esta precaução já está em andamento, pois 161 usinas se encontram em construção, destas, 66 eólicas e 17 solares, além de 425 usinas com a construção não iniciada, sendo 151 eólicas e 46 solares. Quanto às termoeletricas, 37 usinas estão em construção e 107 não estão iniciadas, apesar de ser uma fonte alternativa para a geração de eletricidade, encarece a conta do consumidor devido ao alto custo para manter em funcionamento. Contudo, para atender a demanda não suprida por outras fontes, as termoeletricas são eficientes por gerarem uma potência maior.

Dessa forma, o planejamento e o investimento são de extrema importância para que o setor sempre esteja bem estruturado, suprimindo a demanda dos setores, principalmente, o industrial, refletindo na aceleração da economia e no aumento da competitividade.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Grande parte da literatura econômica enfatiza que um dos fatores chave que proporciona o crescimento econômico é a infraestrutura de um país, pois se trata de um instrumento básico que norteia todo o processo produtivo da economia, além de ser fonte necessária para o desenvolvimento e bem-estar da população. Dessa forma, o investimento nos setores de energia, transporte, telecomunicação e saneamento básico deve ser contínuo, pois possibilita aumento da produtividade, qualidade dos bens e serviços, redução nos custos de produção, tornando, assim, o país mais competitivo, resultando em maior crescimento econômico.

O presente trabalho teve como base de estudo o setor de energia elétrica, por se caracterizar como um dos mais relevantes na infraestrutura. Com o intuito de verificar se existe relação entre o investimento na infraestrutura energética e o crescimento econômico, aplicou-se o modelo VAR e, para examinar se uma variável causa à outra no sentido de Granger, utilizou-se o teste de Causalidade de Granger.

Os resultados mostraram que existe uma relação significativa

entre o consumo de energia elétrica do setor industrial com o crescimento econômico brasileiro. No teste de Causalidade de Granger fica ainda mais evidente, pois além do consumo causar o PIB, o inverso também é válido.

Diante da confirmação da hipótese de que o consumo de eletricidade afeta o crescimento da economia, é importante que este setor sempre esteja bem estruturado para suprir futuras eventualidades de consumo. Além de garantir um preço baixo, principalmente, para a indústria que é o maior consumidor e considerado uma das chaves para a aceleração econômica. Desta forma, o investimento em infraestrutura energética é essencial para manter o funcionamento do sistema produtivo do país, fazendo com que o crescimento se concretize.

Entretanto, como os investimentos neste setor exigem uma grande quantidade de capital, um incentivo governamental faz-se necessário, seja na elaboração de programas de estímulo, na concessão de subsídios ou até mesmo uma linha mais facilitada de crédito para as empresas privadas. Contudo, para que o crescimento ocorra de forma contínua, é necessário que o investimento seja aplicado com qualidade e não apenas em quantidade, de forma contínua e expressiva, para assim levar ao crescimento sustentado da economia.

O importante é não deixar de monitorar este setor, pois quando se tem uma infraestrutura de qualidade, as empresas se sentem motivadas a investir em seus negócios, levando a uma aceleração industrial que irá gerar mais empregos. Com o aumento da remuneração, as empresas e as pessoas adquiram bens tecnologicamente mais avançados, acarretando em um aumento no consumo de energia elétrica, formando assim um círculo virtuoso.

Apesar da relação positiva do consumo de energia elétrica industrial e do PIB, a correlação entre a tarifa com o consumo e o PIB apresentou divergência do modelo VAR para o de Causalidade de Granger. Desta forma, deixa-se uma opção de pesquisa para maior investigação desta relação, seja por meio de outros métodos, regiões diferentes, períodos ou até mesmo outra classe de consumo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, L. R. A.; BACCHI, M. R. P. Oferta de exportação de açúcar do Brasil. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Brasília, v. 42, n. 1, p. 09-33, 2004.

ANSAR, A.; FLYVBJERG, B.; BUDZIER, A.; LUNN, D. Does infrastructure investment lead to economic growth or economic fragility? Evidence from China. *Oxford Review of Economic Policy*, Volume 32, Number 3, pp. 360–390, 2016.

ANEEL – Agência Nacional de energia Elétrica. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/> . Acesso em: 23 Jan. 2019.

ANEEL - Agência Nacional de energia Elétrica. Atlas de Energia Elétrica do Brasil. 3ª edição. Brasília: ANEEL, 2008. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas3ed.pdf> . Acesso em: 03 Jan. 2019.

BEKOE, E. O.; LOGAH, F. Y. The Impact of Droughts and Climate Change on Electricity Generation in Ghana. *Environmental Sciences*, Vol. 1, no. 1, 13 – 24, 2013.

BERNARDY, R. J.; FELIPPIM, E. S. ; ZUANAZZI, J. ; RAMMÉ, J. . Análise da influência dos empreendimentos hidrelétricos sobre as receitas municipais, no entorno do Rio Uruguai. *Desenvolvimento em Questão*, v. 12, p. 155-187, 2014.

BHATTACHARYA, M.; PARAMATI, S. R.; OZTURK, I.; BHATTACHARYA, S. The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. *Applied Energy*, 162, p. 733–741, 2016.

CAIADO, J. Modelos VAR, taxas de juro e inflação. In: *Literacia e Estatística* (Ed. P. Brito, A. Figueiredo, F. Sousa, P. Teles e F. Rosado), Actas do X Congresso da Sociedade Portuguesa de Estatística, p. 215-228, 2002.

CALDERÓN, C. A.; SERVÉN, L. Infrastructure in Latin America. *World Bank Policy Research Working Paper*, n. 5317, p. 01-54, May. 2010.

CAMPOS NETO, C.; MOURA, F. Investimentos na infraestrutura econômica: avaliação do desempenho recente. *Radar: tecnologia, produção e comércio exterior*, Brasília, DF, n. 2, p. 9-20, 2012.

CARMINATI, J. G. O.; SCALCO, P. R. Relações de causalidade entre energia e crescimento econômico no Brasil. *Revista Brasileira de Energia*, v. 19, p. 355-374, 2013.

CASTRO, G. M. C. O impacto dos componentes da infraestrutura pública sobre o crescimento das cidades brasileiras: uma análise espacial do período de 1970 a 2010. 146 f. *Dissertação (Mestrado em Economia)*, Faculdade de Economia, Administração e Contabilidade de Ribeirão Preto-USP, São Paulo, 2014.

CORRAR, L. J.; PAULO, E.; DIAS FILHO, J. M. Análise multivariada para os cursos de administração, ciências contábeis e economia. 1ª. Edição – 4º. Reimpressão. São Paulo: Atlas, 2012.

EISFELD, C. L.; NUÑEZ, B. H. C; ALMEIDA, A. N.; SOUZA, V. S. Análise do poder de previsão do modelo de vetores auto regressivos (VAR) para a quantidade de madeira serrada exportada pelo Estado do Paraná. In: V Encontro de Economia Paranaense - ECOPAR, Curitiba, p. 1-70, 2007.

FRISCHTAK, C. R. Infraestrutura e desenvolvimento no Brasil. In: VELLOSO, F. et al. Desenvolvimento Econômico uma perspectiva brasileira. Rio de Janeiro: Elsevier, p. 313-337, 2013.

GOTARDO, D. M.; BARCHET, I.; PIFFER, M. Padrões de Crescimento Econômico no Estado do Rio Grande do Sul entre 1996-2010. Desenvolvimento em Questão, v. 14, p. 273-300, 2016.

GUJARATI, D. N. Econometria básica. 4º ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 924 p., 2006.

HIRSCHMAN, A. O. The strategy of economic development. New Haven: Yale University Press, 1958.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/> Acesso em: 15 fev. 2019.

KARANFIL, F.; LI, Y. Electricity consumption and economic growth: Exploring panel-specific differences. Energy Policy, 2014.

MEDEIROS, V.; RIBEIRO, R. S. M. Investimento em infraestrutura: uma estrada para o desenvolvimento. Valor Econômico, 2019.

MEDEIROS, V.; TEIXEIRA, E. C. Relações de longo prazo entre infraestrutura econômica, competitividade e investimentos no Brasil: Uma análise do período 1970-2011. Revista de Economia, v. 43, n. 2 (ano 40), mai./ago. 2016.

PIRES, A. Porque a energia é cara no Brasil. Economia & Negócio – Estadão. São Paulo, 2012.

SCHETTINI, D.; AZZONI, C. R. Determinantes regionais da produtividade industrial: O papel da infraestrutura. Texto para Discussão Nº 2137, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2015.

VIZIOLI, T. R. Infraestrutura energética e crescimento econômico: o caso brasileiro de 2000 a 2012. 60 f. Monografia (graduação em Ciências Econômicas), Universidade de Brasília-UNB. 2014.

ZACKSESKI, N. Investimentos e crescimento econômico: o caso brasileiro. 66 f. Tese (Doutorado em Economia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Faculdade de Ciências Econômicas, Programa de Pós-Graduação em Economia, Porto Alegre, 2012.

UMA BREVE REVISÃO SOBRE A INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA NO BRASIL COM ENFOQUE NO POTENCIAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA

Isabela Zanon Pereira¹
Ivan Felipe Silva dos Santos¹
Hellen Luisa de Castro e Silva¹
Regina Mambeli Barros¹

¹*Universidade Federal de Itajubá*

DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i2.477>

RESUMO

O Brasil é o principal produtor de cana-de-açúcar no mundo e a indústria sucroalcooleira é um dos principais pilares da economia Brasileira. Na indústria sucroalcooleira são produzidos dois resíduos com altíssimo potencial de geração de energia: o bagaço e a vinhaça. O bagaço é usado para geração de energia por meio de sua combustão e a vinhaça, pela combustão do biogás produzido pela digestão anaeróbia desta. Neste contexto, o presente artigo apresenta uma breve revisão da indústria da cana no país com enfoque sobre estes dois resíduos e seu potencial energia, levantando discussões sobre as atuais utilizações e as potencialidades de ambos. As discussões aqui levantadas podem ser utilizadas para fomentar debates e pesquisas sobre o aproveitamento energético destes resíduos no país.

Palavras-chave: Indústria Sucroalcooleira, Cana-de-açúcar, Bagaço, Vinhaça e geração de energia.

ABSTRACT

Brazil is the main producer of sugarcane in the world and the sugar and alcohol industry is one of the main pillars of the Brazilian economy. In the sugar and alcohol industry, two residues are produced with a very high energy generation potential: bagasse and stillage. Bagasse is used to generate energy through its combustion and vinasse, by combustion of biogas produced by its anaerobic digestion. In this context, this article presents a brief review of the sugarcane industry in the country with a focus on these two residues and their energy potential, raising discussions about the current uses and the potential of both. The

discussions raised here can be used to promote debates and research on the energy use of this waste in the country.

Keywords: Sugar and alcohol industry, Sugarcane, Bagasse, Vinasse and energy generation.

1. INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é um dos recursos com grande potencial de crescimento para se gerar energia elétrica através da biomassa, uma vez que o Brasil é o maior produtor do mundo (NOVACANA, [s.d]). A biomassa é a terceira principal fonte interna de energia elétrica no país, representando 8,2% e superada apenas pela energia hidráulica e pelo gás natural, de acordo com os dados do Balanço Energético Nacional (BEN, 2017). É também considerada uma das fontes de produção de energia com maior potencial de crescimento, tanto para o mercado interno quanto para o externo, tendo capacidade de abastecimento de mais da metade dos consumidores do Estado de São Paulo, com 45 milhões de habitantes. Ainda, de acordo com a COGEN (Associação da Indústria de Cogeração de Energia), esse tipo de energia possui capacidade instalada de 10,8 GW (BIOMASSA & BIOENERGIA, 2016).

A participação da cana na geração de energia contribui para a diversificação da matriz elétrica, bem como para a preservação dos níveis dos reservatórios, pois a safra coincide com os períodos de estiagem na região Sudeste e Centro-Oeste. Nesse sentido, a energia fornecida pela combustão do bagaço da cana auxilia no consumo desse período, além de criar benefícios ambientais, resultando na redução dos gases do efeito estufa, na destinação correta do resíduo, juntamente com benefícios econômicos, não necessitando da compra de energia do mercado livre com tarifas de venda elevadas.

Neste contexto, o presente artigo revisa os principais aspectos ligados aos dois resíduos com maior potencial de produção de energia na indústria sucroalcooleira: a vinhaça e o bagaço.

2. INDÚSTRIA DE CANA DE AÇÚCAR NO BRASIL

O cultivo da cana-de-açúcar no Brasil iniciou-se na fase de colonização, no século XVI, e passou por transformações quantitativas e qualitativas, que permitiram que o Brasil fosse um importante abastecedor de produtos de cana-de-açúcar para quase todo o mundo. Os resultados foram em elevados lucros com a exportação, tanto para a coroa portuguesa, quanto para o Brasil, quando deixou de ser colônia (ARAÚJO; SANTOS, 2012).

Desse modo, a cana-de-açúcar chegou ao Brasil em 1532, quando foi instalado o primeiro engenho de açúcar no litoral de São Paulo,

na Capitania de São Vicente. Este fato foi considerado o marco zero da colonização. A partir de então, a cana-de-açúcar se desenvolveu e tomou a liderança da produção mundial, principalmente devido às condições de solo fértil e propício, e o clima favorável para esse desenvolvimento. Vale ressaltar que, esse mercado europeu foi abastecido pelos engenhos de Pernambuco e Paraíba, embora tenha sido iniciada em São Paulo, como afirma Flausinio (2015).

Fatos importantes que devem ser levados em conta na história do desenvolvimento da cana-de-açúcar no Brasil é a parceria com os holandeses, pois estes promoveram a expansão da indústria, durante os anos que foram responsáveis pela comercialização e distribuição do açúcar pela Europa. E o período seguinte com o fim da aliança e as invasões holandesas, pois quebraram o monopólio da produção de açúcar, devido ao conhecimento adquirido na fase de ocupação, o que resultou em diminuição de preço e de exportações pelo Brasil (FLAUSINIO, 2015).

Dessa forma, a produção de açúcar foi a principal geração de renda durante os séculos XVI e XVII para o país, e somente com a descoberta do ouro no século XVIII, houve uma redução na produção. Ademais, a descoberta do açúcar da beterraba e a Primeira Guerra Mundial, também foram fatores que contribuíram para essa redução de produção, que foi sustentada, durante alguns anos, pela produção de cachaça (FLAUSINIO, 2015).

Com a globalização, o Brasil se tornou o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo e o maior produtor de etanol de cana-de-açúcar. Atualmente, São Paulo está em primeiro lugar na produção de açúcar e foi capaz de superar Pernambuco apenas na crise do café, acentuada pela turbulência americana em 1929, produzindo cerca de 55% de área plantada no país, baseado na União da Indústria de Cana de Açúcar (ÚNICA, s/d).

Em 1970, o etanol obteve destaque apenas após a crise do petróleo, o qual era a principal matriz energética na época. Dessa forma, com o aumento dos índices inflacionários provocados pela crise, houve um incentivo de se obter energia através de fontes alternativas, resultando então, no Programa Nacional do Álcool (Proálcool), na segunda metade da década de 70 (ARAÚJO; SANTOS, 2012).

De acordo com Araújo e Santos (2012), o principal objetivo do programa era a substituição dos combustíveis derivados do petróleo para combustíveis derivados de origem vegetal, estimulando assim, a produção de álcool para atender as necessidades internas e externas. Porém, nessa época, toda a frota de veículos era movida por combustíveis fósseis, e apenas na década de 90 que novos testes de implementação e produção em larga escala começaram a ser estimulados.

Entretanto, as implementações efetivas desses testes com biocombustível aconteceram de fato nos últimos quarenta anos e com maior intensidade na década de 2000 (BENETTI, 2009). Desse modo, houve um incentivo a pesquisas sobre energias renováveis, que contribuíram para o aumento da produtividade da indústria da cana, diminuição gradativa em todo processo produtivo, obtendo ganho de qualidade.

Além disso, houve grandes adaptações em todo o processo produtivo do álcool como fonte de energia, principalmente com a chegada dos carros flexfuel. Atualmente, o etanol continua sendo muito consumido devido a sua adição de 27% na gasolina comum e 25% na gasolina Premium, baseado no Conselho Interministerial do Açúcar e do Álcool (CIMA) por meio da Resolução Nº 1, 04 de março de 2015.

Representando o cenário nacional de produção, em 2016, com base na UNICA (s/d), a produção nacional de açúcar foi de 38,9 milhões de toneladas, com alta de 13,7% em relação ao ano anterior, enquanto a do etanol caiu 6,5%, atingindo 28276,4 mil m³.

Tal fato, resultou em um aumento de aproximadamente 0,61% na área plantada de cana-de-açúcar no país, entre os anos de 2015 e 2016, obtendo-se uma área de 10,2 milhões de hectares, tendo uma maior participação da região Centro-Sul (9,2 milhões de hectares) do que a região Norte-Nordeste (1,1 milhões de hectares) ÚNICA (s/d). Quanto ao cenário de exportações, o Brasil exportou 27,8 milhões de toneladas de açúcar na safra de 2017/2018 e 1,4 milhões de m³ de etanol nesse mesmo período ÚNICA (s/d).

Além disso, quanto ao cenário de geração de eletricidade, a geração total no Brasil foi de 578,9 TWh e o bagaço da cana teve uma contribuição de 35,236 TWh, estando em terceiro lugar comparado as outras fontes de energia, conforme a Figura 1, baseada no Balanço Energético Nacional (BEN, 2017).

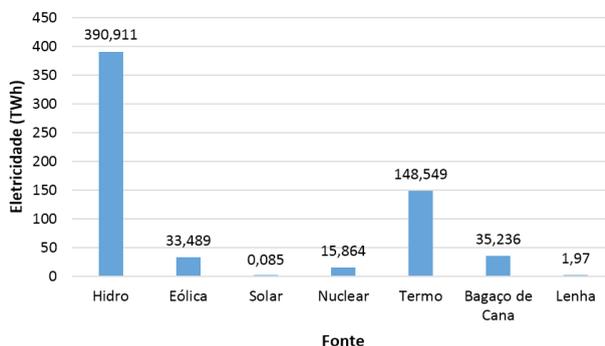


Figura 1 - Geração de Eletricidade por Fonte no Brasil

A partir dos dados apresentados, nota-se a importância da cana-de-açúcar para a geração de capital para o Brasil. Ademais, além da geração de renda pela produção e exportação da cana, com a biomassa gerada no processo é possível duas ou mais fontes de energia com apenas um único combustível, podendo gerar energia elétrica que supre a necessidade da indústria e pode gerar excedentes que abastecem a rede. Logo, amplia as oportunidades do setor, diversifica a matriz energética e promove o ganho ambiental, pela redução das emissões de compostos responsáveis pelo efeito estufa (FLAUSINIO, 2015).

3. RESÍDUOS DA INDÚSTRIA SUCROALCOOLEIRA

O Brasil possui o conhecimento completo no ciclo de produção do açúcar e de etanol e possui um modelo de produção com um diferencial entre seus concorrentes, por ter criado um processo produtivo integrado, entre as usinas de etanol e açúcar (FLAUSINIO, 2015).

Dessa forma, a cadeia produtiva da usina de etanol e açúcar é composta por duas etapas, uma agrícola e outra industrial. Tendo como principais resíduos, o bagaço e a vinhaça, conforme mostrado no fluxograma da Figura 2 (SOUZA, 2010 apud FLAUSINIO, 2015).

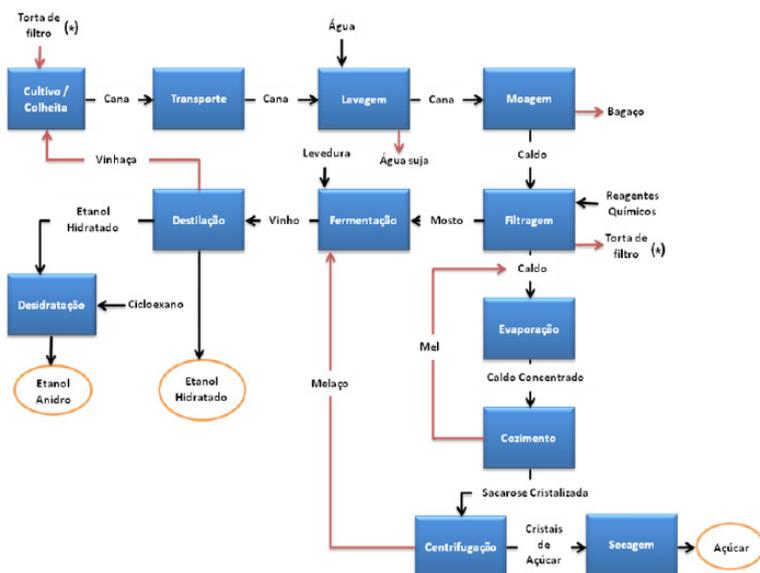


Figura 2 - Fluxograma do processo produtivo de uma indústria sucroalcooleira

A etapa agrícola se inicia com o cultivo da cana-de-açúcar, sendo um fator importante nessa etapa a escolha da variedade da cana, de acordo com as características climáticas e morfológicas da região de plantio. Além disso, também é importante analisar o ciclo da cana. No Brasil, de acordo com Flausinio (2015), ele dura em média 6 anos, realizando o primeiro corte no 12º mês, o segundo no 18º mês e depois a cada 1 ano, e à medida que se realiza esses cortes, cai a produtividade. São Paulo possui uma produtividade média entre 85 t/ha a 90t/ha.

A segunda etapa é a colheita, que acontece nos períodos mais secos do ano, para favorecer a maturação. É realizada, na maioria das vezes, de forma manual. A última etapa da fase agrícola é o transporte da cana, feito da forma mais rápida possível para que não ocorra a perda da qualidade do produto e por ser perecível, para as usinas, na média de 24 horas e no máximo 72 horas (FLAUSINIO, 2015).

Para iniciar a fase industrial, quando a cana chega à usina, a primeira etapa varia se a colheita é manual ou mecanizada. Na do tipo manual, a cana precisa ser lavada e picada, para posteriormente ser moída e na mecanizada, a cana já passa para moagem, como afirma a NovaCana (s/d).

A etapa de moagem é necessária para a extração do caldo, e pode ser realizada por dois diferentes processos moendas ou difusores. De acordo com Fonseca (2016), pelo processo das moendas, a cana passa por um conjunto de rolos de pressão, onde é feita a retirada do caldo. Para tornar o processo mais eficaz, é injetada água, gerando como resíduo, o bagaço, com umidade em torno de 50%.

No segundo processo, por difusores, a cana passa por sucessivas lavagens com água quente, para que os açúcares presos se soltem com a água quente e em seguida a cana passa por um rolo de secagem (FLAUSINIO, 2015).

Dessa forma, o caldo segue para produção do açúcar ou do etanol, em usinas em que a produção de etanol está associada a produção de açúcar, Flausinio (2015) afirma que os primeiros caldos são levados para a produção do açúcar, passando por tratamento químico para coagular, flocular, precipitar as impurezas por decantação e a filtração.

Assim, o caldo tratado resultante é submetido a altas temperaturas, a fim de concentrar a sacarose e fazer sua cristalização. Logo, a solução residual desse processo é denominada melaço, que possui altas quantidades de glicose e sacarose (RODRIGUES, 2017).

A produção do etanol começa com o caldo tratado, melaço ou mosto, que é a mistura dos dois. Passando para a etapa de fermentação alcoólica, que de acordo com Rodrigues (2017), o mosto é adicionado em dornas junto com leveduras, por um período de 8 a 12 horas, dando

origem ao vinho. O vinho fermentado possui concentração de 7% a 10% e para aumentar a concentração de álcool, o vinho é levado a destilação, alcançando cerca de 96% de álcool e 4% de água, em volume, gerando como resíduo a vinhaça (FLAUSINIO, 2015).

Desse modo, o etanol produzido pode ser comercializado ou ser usado para produzir o etanol anidro, que possui 99,7% em volume de álcool, com baixo teor de água, de acordo com Santos et al. (2013 apud Fonseca, 2016). A produtividade da fabricação do etanol a partir da cana, de acordo com a Braskem (2020), é de 6,5 mil litros por hectare plantado.

Na indústria sucroalcooleira os principais resíduos são o bagaço e a vinhaça. O bagaço é resultante da etapa de moagem da cana e recém-moído, e segundo Santos et al. (2011), possui cerca de 50% de umidade, 45% de fibras lignocelulósicas, de 2% a 3% de sólidos insolúveis e de 2% a 3% de sólidos solúveis. Sendo que, a celulose, hemicelulose e lignina, as principais responsáveis pelo conteúdo energético do material.

Durante muitos anos, o bagaço foi queimado para gerar calor, em substituição à lenha. Porém, devido as adversidades que ele trazia, como sujeira, ocupação de espaço, necessidade de transporte, entre outros pontos, e, com intuito da utilização por completo do resíduo, ele passou a ser usado como combustível nas caldeiras, nos sistemas de cogeração (LINHARE; ARAÚJO; SILVA, 2018).

Essa biomassa é de maior representatividade na matriz energética brasileira, pois é responsável pelo suprimento de energia elétrica, térmica e mecânica dessas indústrias a partir desse sistema de cogeração (SANTOS et al., 2011).

A cogeração apresenta uma série de vantagens, como Oliveira, Neves e Waitman (2017) afirmam, dentre elas pode-se destacar: (i) diminuição no lançamento de gases de efeito estufa na atmosfera, visto que possui bioeletricidade neutra em carbono¹, promovendo o desenvolvimento de energia limpa; (ii) redução nas perdas no sistema de transmissão, pois as usinas sucroalcooleiras estão localizadas na região centro-sul, que é a região de maior consumo; (iii) a eletricidade gerada por ser escoada diretamente pela rede de distribuição, (iv) uso eficiente dos insumos e sendo eles de origem nacional.

Outros usos do bagaço estão para compostos de ração animal, fertilizantes, biogás, matéria-prima para compensados e insumos energéticos para outros setores industriais, como papel, celulose, cerâmicas e retífica de pneus (SOUZA; AZEVEDO, 2006).

¹ A bioeletricidade é realizada em ciclo fechado. Nesse caso, contribui para o desenvolvimento do setor energético brasileiro garantindo a oferta de energia elétrica até mesmo nos tempos de estiagem, resultando também o desenvolvimento do setor sucroalcooleiro e sustentável (OLIVEIRA; NEVES; WAITMAN, 2017).

O outro resíduo de grande importância gerada no setor é a vinhaça que atualmente é o principal subproduto da fabricação do álcool, devido ao seu grande volume gerado e sua potencialidade de uso, sendo composta, na sua maioria, por água, cerca de 97% e o restante que compõe a fração sólida é constituída por matéria orgânica e elementos minerais, com destaque para o Potássio que representa 20% dos minerais presentes (MARQUES, 2006 apud SILVA, 2012).

A vinhaça recebe três denominações, de acordo com Almança (1994), com base no mosto (líquido passível de fermentação) que lhe deu origem: vinhaça de mosto de caldo, vinhaça de mosto de melaço e vinhaça de mosto misto. A primeira é decorrente da cana-de-açúcar moída, a segunda, da separação do açúcar cristalizado e do mel final e a terceira da mistura das duas anteriores.

Ela não pode ser lançada no corpo hídrico in natura por possuir alta carga de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), 12.000 a 20.000 ppm, e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DQO), colocando em risco a vida de animais aquáticos (SILVA, 2012). Uma vez que, podem tornar o balanço de oxigênio negativo, que se dá pela diferença de DBO pelo OD, em outras palavras, pela diferença da quantidade de oxigênio necessária para oxidar a matéria orgânica, pela quantidade de oxigênio disponível.

Além disso, pode conter a presença de metais pesadas e poluentes orgânicos xenobióticos, como o fenol, cloreto de metileno, clorofórmio e pentaclorofenol. Os compostos fenóticos são tóxicos a muitos microorganismos, como por exemplo, os que estão presentes nos tratamentos de águas residuárias. Além disso, pode contribuir com epidemias de malária, amebíase e esquistossomose, além de provocar mau cheiro ao corpo d'água (BERNAL et al., 2017).

Ademais, ressaltam-se outras características importantes da vinhaça, como o seu poder corrosivo, por possuir pH muito baixo, fazendo com que seja necessário o uso de materiais resistentes e apropriados ao seu manejo hidráulico, como também sua alta concentração de potássio. Sendo que, a cada m³ de vinhaça produzido, há um ganho de 3 kg de potássio, então a vinhaça produzida em uma determinada área de plantio de cana-de-açúcar é autossuficiente desse mineral (SILVA, 2012).

Quanto a produção de vinhaça a partir do álcool, é oportuno mostrar que, a cada 1 hectare de área plantada de cana-de-açúcar se produz em média 80 t, que produz 83,3 L de álcool/t, que produz 13 L de vinhaça/L de álcool (SILVA, 2012).

Logo, motivados pela imensa quantidade de vinhaça produzida, seu potencial energético e pelas normas ambientais, as indústrias sucroalcooleiras começaram a pensar em soluções tecnológicas para esse resíduo, a partir da oportunidade de transformar o custo em um

benefício (ambiental e financeiro), ao invés de descartar in natura em corpos d'água ou solo, por exemplo.

Sendo assim, as alternativas para a disposição da vinhaça são: Aerobiose; Reciclagem de efluente na fermentação; Fertirrigação; Combustão; Produção de levedura; Uso na construção civil, na fabricação de ração animal e Digestão anaeróbia (CORAZZA, 2006 apud SILVA, 2012).

A aerobiose, reciclagem de efluente na fermentação e fertirrigação são soluções mais simples do ponto de vista tecnológico, fato que provavelmente propiciou a utilização dessas soluções em maior escala, principalmente, a fertirrigação, que consiste em fertilizar e irrigar a lavoura na mesma operação. Trate-se da substituição dos nutrientes minerais (nitrogênio, fósforo e principalmente potássio), gerando um balanço de despesa-receita positivo. Porém, não se mostra uma técnica eficiente se praticada de forma descontrolada, como afirma Bernal et al. (2017).

4. GERAÇÃO DE ENERGIA PELO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR

O uso do bagaço para a geração de energia elétrica apresenta uma série de vantagens como: ser um recurso abundante, com produção descentralizada, reduz a poluição ambiental, pela não utilização de combustível fóssil e diversifica a matriz energética. Apesar de suas vantagens econômicas e ambientais, o aproveitamento desse recurso para a geração de energia elétrica está abaixo do seu potencial.

Como pode ser observado no relatório final do Balanço Energético Nacional de 2017 (BEN 2017), o Brasil produziu 168.567 mil toneladas de Bagaço da cana e somente 28.686 mil toneladas foram transformadas em energia elétrica, representando, então, o grande potencial para geração de energia por esse resíduo.

De acordo com Souza (2004 apud Souza e Azevedo, 2006), apenas com o excedente de energia produzido por parte das usinas paulistas do setor sucroalcooleiro, a partir do bagaço e da palha, seria capaz de suprir o déficit de toda a região Sudeste, durante a crise de 2001-2002, por ocasião do racionamento.

Por outro lado, sua principal desvantagem é não ser possível produzir calor e energia de forma direta e contínua, por ser gerado de forma sazonal; estocagem nos pátios, nos períodos entressafras, que resultam em perdas e ineficiência do processo, pela dificuldade de organização das pilhas (devido as suas dimensões).

Porém, como o bagaço é considerado o maior dejetado da agroindústria nacional e por apresentar vantagens de ordem econômica e

ambiental, é um recurso que deve ser estudado para melhor aproveitamento (SOUZA E AZEVEDO, 2006).

O processo de geração de energia através do bagaço segue as etapas: Em primeiro lugar, a sua produção começa com a sua retirada das moendas e difusores, após a extração do calda da cana-de-açúcar, com umidade cerca de 50%. Então este é enviado para as caldeiras onde ocorre a queima do combustível para produzir vapor.

Esse vapor superaquecido possui temperaturas entre 723K a 803K, em usinas modernas. Em seguida, o vapor se expande nas turbinas e produz trabalho mecânico, acionando o gerador (CORRÊA NETO; RAMON, 2002).

Em um sistema de cogeração, esse vapor, com baixa pressão e menor temperatura, antes de passar pelo condensador e retornar em estado líquido a caldeira, pode ser utilizado para diversos fins no processo industrial, como evaporação, cozimento, secagem, entre outros.

Desse modo, de acordo com Flausinio (2015), existem dois sistemas básicos de cogeração. O primeiro com turbina em contrapressão, onde o condensador é substituído pelo próprio processo industrial. E o segundo, com a turbina de condensação, onde o calor retorna à turbina na forma líquida. No setor sucroalcooleiro nacional, o sistema mais difundido é o que utiliza a turbina de contrapressão. Na Figura 3 (FLAUSINIO, 2015) é apresentado um sistema de cogeração de energia pelo bagaço com turbina a vapor com presença de condensador.

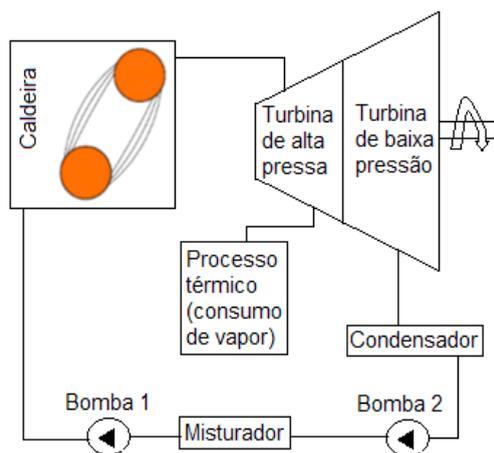


Figura 3 - Sistema de Cogeração de energia a partir do bagaço com turbina a vapor e condensador

Por fim, quanto ao armazenamento do bagaço para ser utilizado, principalmente na entressafra, deve ser feito de forma rigorosa e planejada. Pois, devido a ação de decompositores, pode ocorrer o desenvolvimento de bagaçose, que é uma pneumonia da hipersensibilidade caracterizada por inflamações dos brônquios e alvéolos, que atinge os trabalhadores (SILVA, 2013).

5. GERAÇÃO DE ENERGIA PELA VINHAÇA

A utilização da vinhaça para a geração de energia inicia-se com o processo de digestão anaeróbia, que é um processo de degradação bioquímica da vinhaça por meio de bactérias que atuam na presença de oxigênio, e o resultado é a matéria orgânica degradada e a produção de biogás, composto em sua maioria por CH₄, CO₂ e pequenas quantidades de H₂S (SILVA, 2012).

O processo de biodigestão é empregado para o tratamento do efluente e geração de energia a partir do efluente tratado, sendo composto em quatro principais etapas, com presença de diferentes grupos de bactérias, de acordo com Foresti et al. (1999), conforme demonstrado na Figura 4.

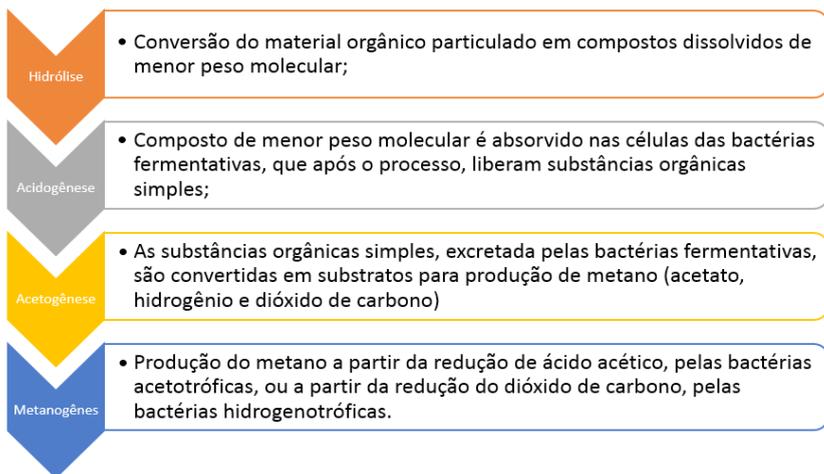


Figura 4 - Fluxograma do processo de biodigestão da vinhaça

Desse modo, a digestão anaeróbica ocorre em biodigestores, que podem trabalhar em bateladas ou fluxo contínuo. Para o setor su-

sucroalcooleiro, o mais indicado é o de fluxo contínuo, devido à grande produção de vinhaça gerada, como afirma Poveda (2014), como é o caso do Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor, popularmente conhecido como reator UASB.

De acordo com Silva (2012), os reatores UASB possuem maior taxa de sucesso para a biodigestão anaeróbia da vinhaça in natura. Uma vez que, a vinhaça possui baixo teor de sólidos, permite seu bombeamento e recirculação no reator e, assim, um baixo tempo de residência hidráulico, diferente do que ocorre em outros biodigestores, como indiano e chinês.

O reator UASB funciona a partir da recirculação de vinhaça de baixo para cima, passando por uma manta fixa de microrganismos que se encontra no meio sendo responsáveis pela conversão da matéria orgânica presente no efluente em CH_4 e CO_2 . Na sua parte superior, há uma divisão que separa a fase líquida da gasosa, que permite o retorno da fase líquida para o reator e mantém fixa a manta de microrganismos. Por conseguinte, a fase gasosa (CH_4 e CO_2) é confinada com a ajuda de defletores que a leva a espaços localizados também na parte superior do reator (SILVA, 2012). Essas características podem ser observadas na Figura 5 (FREIRE E CORTES, 2000 apud Silva, 2012).

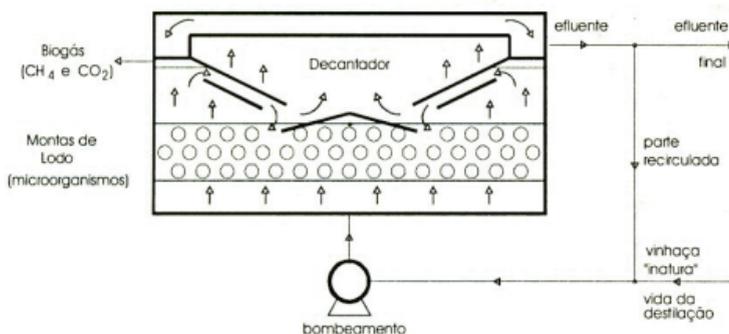


Figura 5 - Desenho Esquemático do Reator UASB

As principais vantagens do reator UASB foram apresentadas por Campos (1999), como sendo a produção de biogás rico em metano que pode ser utilizado como um bom substituto para outros combustíveis, como óleo diesel, energia elétrica, querosene e gás liquefeito de petróleo (GLP). Além de ser um sistema fácil de operação, possui baixo custo contratável e suporta altas taxas de cargas orgânicas.

Vale ressaltar que, o biogás não pode ser lançado diretamente na atmosfera, devido a presença do metano, que possui um Potencial de Aquecimento Global (Global Warming Potencial) de 28 GWP, medindo-se um período de tempo de 100 anos, de acordo com o IPCC (2014). Logo, contribui para o efeito estufa 28 vezes a mais que o gás carbônico. Desse modo, o biogás deve ser coletado, medido e utilizado ou queimado.

Dessa forma, dependendo da utilização do biogás é necessário realizar um processo de tratamento para sua purificação, pois a existência de substâncias não combustíveis, como água e dióxido de carbono, tornam o processo de queima menos eficiente, por absorverem parte da energia gerada, como afirma Costa (2006). Além disso, pode ocorrer a combustão incompleta, falta de alimentação, perda de potência e devido a presença do ácido sulfídrico a corrosão de equipamentos, diminuindo a vida útil do processo.

Por conseguinte, após a produção de biogás e o seu tratamento, é necessário que ocorra uma conversão energética de energia química para mecânica e finalmente elétrica. Há diversas tecnologias que fazem essa conversão energética:

- Motor de combustão interna

O motor de combustão interna realiza trabalho queimando uma mistura de vapor e combustível dentro de um cilindro, sendo o trabalho mecânico gerado na transformação do movimento retilíneo do pistão em circular pelo virabrequim, conforme afirma Correa (2003 apud Figueiredo, 2007).

Os motores tipo Otto e Diesel já estão adaptados para o uso do biogás com diferentes teores de metano, dióxido de carbono e ácido sulfídrico. Além de serem capazes de fornecer pequenas e médias potências elétricas, sofrendo mínimas interferências com as condições ambientais, sendo os equipamentos mais utilizado para a queima do biogás devido a sua flexibilidade (FLAUSINIO, 2015).

- Turbina a gás

Nas turbinas a gás, a queima do combustível ocorre a partir da injeção de ar comprimido em uma câmara de combustão, provendo oxigênio necessário para o sistema. Desta forma, o gás formado exerce pressão sob um compressor e um gerador (FLAUSINIO, 2015).

As principais vantagens de utilização dessa tecnologia, com base em Santos (2009) são: os níveis baixos de ruídos e vibrações; flexibilidade na utilização do combustível, englobando o biogás; dimensões reduzidas e de fácil instalação; baixas emissões de NOx em micro-

turbinas e baixo custo de manutenção comparadas aos motores de ciclo Otto, de 3 a 10 US\$/MWh enquanto o ciclo otto 7 a 20 US\$/MWh.

E as principais desvantagens, ainda segundo Santos (2009), são: investimento inicial alto, por não ser fabricado no Brasil; alto custo de instalação; sistema rígido de limpeza do biogás e adaptação da turbina para esse combustível, por possuir um baixo poder calorífico.

- Células combustíveis

As células combustíveis são sistemas que convertem de forma direta a energia química da mistura combustível com agente oxidante em eletricidade, com elevada eficiência. Esse processo é semelhante à de uma bateria que é constantemente carregada envolvendo dois reagentes, o ar e a água.

Na Figura 6 (BERNAL et al.,2017), apresenta-se um esquema de uma usina completa de conversão energética do biogás produzido no tratamento da vinhaça a partir de um motor de combustão interna.

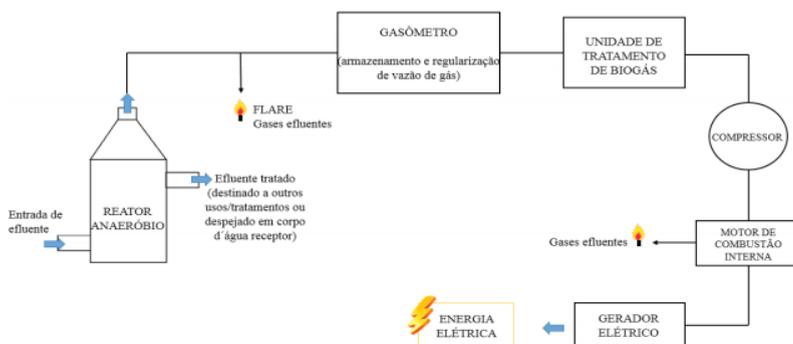


Figura 6 - Esquema representativo da geração de energia elétrica a partir da vinhaça

Nota-se, a partir da Figura 6, que além do reator anaeróbio, unidade de tratamento de biogás, conversor energético e gerador, citados anteriormente, se faz necessário um queimador, ou flare, gasômetro e compressor.

O queimador é utilizado para a combustão de gases não aproveitados para a geração da energia elétrica. O gasômetro é utilizado

para armazenar e regular a vazão de biogás, ele se encontra pressurizado, onde a pressão é mantida por um diafragma a 1,15 bar, de acordo com Bernal et al. (2017). O compressor utilizado para a coleta do gás e bombeamento pela tubulação de coleta.

6. APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS DA VINHAÇA

No Brasil, o potencial do biogás para ser instalado alcança um valor de 6,9 GW, que é equivalente a produção de energia de 48,72 TWh, de acordo com um estudo realizado por Santos et al. (2018), em que avaliou a geração de biogás de sete tipos de resíduos orgânicos (resíduos sólidos urbanos, águas residuárias, lodos originários dos tratamentos, vinhaça, e estrume de gado, porco e aves) a partir da digestão anaeróbica. O autor mostra que se essa energia fosse totalmente aproveitada representaria 9,33% da energia consumida do país, que é de 522,8 TWh no ano base de 2016 (EPE, 2017).

Porém, essa capacidade de geração de energia renovável não está sendo aplicada, visto que Santos et al. (2018) mostra que no Brasil, em janeiro de 2017, existem apenas 15 usinas de biogás, que produzem 114,7 MWh de energia, representando apenas 0,00024% da capacidade total de produção do país (48,72 TWh). Mostrando-se então, a grande disposição de crescimento desse setor e a capacidade de se gerar ganhos sistêmicos, como por exemplo, o bagaço da cana-de-açúcar apresenta a possibilidade de gerar energia nos períodos de redução dos reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN), de acordo com o Plano Nacional de Energia – PNE (2030).

Além disso, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (2016), é esperado o aumento da participação de energias renováveis (além da energia hídrica) na distribuição de energia elétrica para, pelo menos, 23% até 2030, por meio do aumento das modalidades de energias eólica, biomassa e solar.

Levando-se então em conta os resíduos gerados pelo setor sucroalcooleiro, que possui 13% de área cultivada de cana-de-açúcar em relação a toda área utilizada para agricultura no Brasil - considerando a área plantada de cana-de-açúcar em 2017 de 10,2 milhões ha, de acordo com UNICA (s/d), e a área plantada total do Brasil de 79, 4 milhões ha na safra de 2017 (IBGE, 2018) - nota-se a capacidade de geração de biogás desse setor. Os principais aproveitamentos do biogás são: a queima para geração de vapor, substituição dos combustíveis no período de safra e geração de energia elétrica (GRANATO, 2003).

Assim, considerando a geração de energia elétrica pelo resíduo da vinhaça, que é um dos principais tipos de resíduos da indústria

sucroalcooleira, ele representa 4,21% da capacidade total de geração de energia elétrica se comparado com os diversos tipos de resíduos estudados por Santos et al. (2018), que equivale a 2,053 TWh, com potencial de biogás a ser instalado 292,979 MW no Brasil. Percebe-se a importância desse resíduo como um abastecedor de energia elétrica, visto seu potencial de biogás a ser instalado e o Brasil como o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo. Ademais, vale ressaltar que as aplicações energéticas do biogás da vinhaça se devem a alta concentração de metano em sua composição. (SZYMANSKI, BALBINOT e SCHIRMER, 2010).

Por conseguinte, uma outra análise que pode ser feita é comparar o potencial de geração de energia elétrica da vinhaça no Brasil (2,053 TWh), encontrado por Santos et al. (2018), com o potencial de energia economicamente viável, obtido por Bernal et al. (2017), que para usinas com destilarias anexas (produzem açúcar e etanol) alcança 0,72 TWh/ano e, em usinas com destilarias autônomas (produzem apenas etanol), alcança 1,51 TWh/ano. Assim, em destilarias anexas a geração de energia viável representa, aproximadamente, 35% do total e para autônomas, 75%, o que representa além de um ganho econômico e energético, um ganho ambiental quanto as emissões evitadas de CO₂, 0,42 MtCO₂/ano em anexas e 0,88 MtCO₂/ano em autônomas (BERNAL et al., 2017).

7. CONCLUSÃO

O presente trabalho revisou os principais aspectos ligados à indústria sucroalcooleira brasileira com enfoque na produção de resíduos e no potencial de produção de energia. A indústria sucroalcooleira é historicamente importante para a economia brasileira e dois dos seus resíduos possuem elevado potencial energético: a vinhaça e o bagaço.

Somente 17% do bagaço atualmente gerado é usado para geração de energia. Mesmo assim, ele já representa aproximadamente 16% da matriz elétrica Brasileira, sendo a principal biomassa utilizada para geração elétrica no país, mas com um potencial de crescimento ainda muito elevado. A vinhaça pode ser submetida a processo de digestão anaeróbia apresentando potencial altíssimo de produção de biogás em todo país. Este biogás pode ser utilizado para suprimento de milhares de ônibus no país ou para geração de eletricidade, podendo alcançar 0,35% de toda eletricidade consumida no país.

Além da geração de energia, benefícios ambientais seriam obtidos da utilização destes resíduos para geração energética, tais como: diminuição de emissão de gases de efeito estufa, disposição adequada destes resíduos e ampliação do valor agregado das usinas de álcool no

país. Faz-se, então, necessário o desenvolvimento de políticas públicas que incentivem o uso destes resíduos, principalmente da vinhaça cujo uso é incipiente, para geração de energia no país.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão de bolsa de mestrado a aluna Hellen Luísa de Castro e Silva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMANÇA, R. Avaliação do uso da vinhaça da cana-de-açúcar na geração de energia Elétrica (Estudo de caso). Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 1994.

ARAÚJO, E. S.; SANTOS, J. A. P. O desenvolvimento da cultura da cana-de-açúcar no Brasil e sua relevância na economia nacional. *Facider, Colíder*, v. 4, n. 34342, p.1-16, 2012. Disponível em: <<http://seicesucol.edu.br/revista/index.php/facider/article/view/37/87>>. Acesso em: 20 maio 2018.

BALANÇO ENERGÉTICO NACIONAL (BEN). 2017. Disponível em <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2017>>. Acesso em 14 ago. 2018.

BRASIL. Resolução CIMA nº 1 de 4 de março. 2015. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=281774>>. Acesso em 17 ago. 2018

BENETTI, Maria Domingues. A internacionalização recente da indústria de etanol brasileira. *Revistas Eletrônicas FEE*, Porto Alegre, v. 36, n.04, 2009. Disponível em:< <https://revistas.fee.tche.br/index.php/indicadores/article/view/2220/2620>>. Acesso em 20 maio 2018.

BERNAL, A. P. et al. Vinasse biogas for energy generation in Brazil: An assessment of economic feasibility, energy potential and avoided CO2 emissions. *Journal of Cleaner Production*, Oxford, v. 151, n.º p. 260-271, 2017.

BIOMASSA & BIOENERGIA. Biomassa da cana-de-açúcar tem potencial para se tornar a principal fonte de geração de energia elétrica em SP. 2016. Disponível em: <https://www.biomassabioenergia.com.br/imprensa/biomassa-da-cana-de-acucar-tem-potencial-para-se-tornar-a-principal-fonte-de/20161003-112254-o741>. Acesso em 6 Jul 2020.

BRASKEM. O Etanol. 2020. Disponível em: <http://plasticoverde.braskem.com.br/site.aspx/Etanol>. Acesso em 6 Jul. 2020.

CAMPOS, J.R. Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbico e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES, 464 p., 1999.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). Análise mensal – Cana-de-açúcar. 2018. Disponível em: https://www.conab.gov.br/info-agro/analises-do-mercado-agropecuario-e-extrativista/analises-do-mercado/historico-mensal-de-cana-de-acucar/item/download/20421_e2fdda01edf58ef65e7f0a97656a3422. Acesso em 18 ago. 2018.

CORAZZA, R. I. Impactos ambientais da vinhaça: controvérsias científicas e lockin na fertirrigação? In: CORTEZ, L.; FREIRE, W. J.; ROSILLO-CALLE, E. Biodigestion of vinasse in Brazil. International Sugar Journal, Londres, v. 100, n. 1196, p.408-413, 1998.

CORREA, A. S. A influência da folga de válvulas na geração de ruído e vibração no motor fire 999cc 8v. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

COSTA, D. F. Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto. 2006. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CORRÊA NETO, V.; RAMON, D. Análises de opções tecnológicas para projetos de cogeração no setor sucroalcooleiro. Vibhava Consultoria Empresarial S/C Ltda. SETAP Brazil Representation. 2002. Disponível em: <http://www.nuca.ie.ufrj.br/infosucro/biblioteca/bim_CorreaNeto_OpcoesCogeracao.pdf>. Acesso em 29 ago. 2018.

FLAUSINIO, B. F. P. G. Produção de energia elétrica a partir do aproveitamento do bagaço de cana-de-açúcar gerado no setor sucroalcooleiro de minas gerais. 2015. Tese (Doutorado de Engenharia Nuclear e da Energia) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

FIGUEIREDO, N.J.V. Utilização do biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica e iluminação a gás – estudo de caso. 2007. Trabalho final de graduação (Curso de Engenharia Mecânica), Universidade Presbiteriana Mackenzie, 2007.

FONSECA, T. T. A. Avaliação das influências climáticas na produção de etanol a partir da cana-de-açúcar. 2016. 49 f. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Energia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2016. Disponível em: <http://bdm.unb.br/handle/10483/16312>. Acesso em: 21 maio 2018.

FORESTI, E.; FLORÊNCIO, L.; HAANDEL, A. V.; ZAIAT, M.; CAVALCANTI, P. F. F. Fundamentos do tratamento anaeróbio. In: CAMPOS, J.R. (Coord.). Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. Rio de Janeiro: ABES, 1999, p. 29-52.

GRANATO, E. F. Geração de Energia através da biodigestão anaeróbia da vinhaça. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Universidade Estadual Paulista. Bauru, 2003.

INVESTE SÃO PAULO - AGÊNCIA PAULISTA DE PROMOÇÃO DE EVENTOS E COMPETITIVIDADE. Cana-de-açúcar. 2018. Disponível em: <https://www.investe.sp.gov.br/setores-de-negocios/agronegocios/cana-de-acucar/>. Acesso em 22 maio. 2018.

IPCC - PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Meyer, Leo]. Geneva, 151 p., 2014.

LINHARE, G. N. S.; ARAÚJO, V. O.; SILVA, D. J. A. Análise financeira da utilização do bagaço da cana-de-açúcar para cogeração de energia pela Raízen. Revista de Trabalhos Acadêmicos Lusófona, Rio de Janeiro, v. 1, n. 1, p.42-55, 2018.

MARQUES, M. O. Aspectos técnicos e legais da produção, transporte e aplicação de vinhaça. In: SEGATO, S. V. et al. (Org.). Atualização em produção de cana-de-açúcar. Piracicaba, 2006. p. 369-375.

NOVACANA. Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas. [S.d]. Disponível em: <https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar>. Acesso em 28 ago. 2018.

NOVACANA. As projeções de produção de cana, açúcar e etanol para a safra 2023/24 da Fiesp/MB Agro. 2016. Disponível em: < <https://www.novacana.com/estudos/projecoes-producao-cana-acucar-etanol-safra-2023-2024-fiesp-mb-agro>>. Acesso em: 12 ago. 2018.

OLIVEIRA, L.L.; NEVES, G. G.; WAITMAN, P. L. Estudo sobre cogeração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro. REGRAD, Marília, v. 10, n. 1, p 354 - 365, 2017.

POVEDA, M. M. R. Análise econômica e ambiental do processamento da vinhaça com aproveitamento energético. Dissertação (Mestrado em Energia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

RODRIGUES, Romaira Guedes. Diversidade microbiana cultivável em processo industrial de produção de etanol. 2017. Monografia (Especialização) - Curso de Tecnologias Química e Biológica - Universidade Federal de Brasília, Brasília, 2017.

SANTOS, F.; COLODETTE, J.; QUEIROZ, J. Bioenergia e biorrefinaria: cana-de-açúcar e espécies florestais. Viçosa: Suprema Gráfica e Editora Ltda. 2013.

SANTOS, I. F. S. et al. Assessment of potential biogas production from multiple organic wastes in Brazil: Impact on energy generation, use, and emissions abatement. *Resources, Conservation & Recycling*, [s.l.], v. 131, p.54-63, 2018.

SANTOS, M. L. et al. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. *Química Nova*, Franca, v. 34, n. 3, p.507-501, jan. 2011.

SANTOS, N. S. Geração de energia elétrica a partir do biogás produzido na estação de tratamento de esgotos de madre de Deus - Bahia. 2009. Dissertação (Mestrado profissional em tecnologias aplicáveis a bioenergia) – Faculdade de Tecnologia e Ciências, Salvador, 2009.

SILVA, M. D. Associação Brasileira de Medicina do Trabalho. Pulmão em alerta. 2013. Disponível em: <http://www.abmt.org.br/documento/Artigo_Bagacose.pdf>. Acesso em: 20 maio 2018.

SILVA, G. A. Avaliação das tecnologias de disposição de vinhaça de cana de açúcar quanto ao aspecto de desenvolvimento ambiental e econômico. 2012. Tese (Doutorado em Térmica e Fluidos) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2012.

SOUZA, Z. J. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: entraves estruturais e custos de transação. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

SOUZA, Z. J.; AZEVEDO, P. F. Geração de energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro: um estudo a partir das usinas paulistas. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, Brasília, v. 44, n. 2, p. 179-199, jun. 2006. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-20032006000200002. Acesso em: 29 ago. 2018.

SZYMANSKI, M. S. E.; BALBINOT, R.; SCHIRMER, W. N. Biodigestão anaeróbia da vinhaça: aproveitamento energético do biogás e obtenção de créditos de carbono – estudo de caso. *Semina: Ciências Agrárias*, Londrina, p. 901-912, 2010.

Informações para Autores

Propostas de publicações em consonância com o disposto na missão da Revista Brasileira de Energia (RBE) poderão ser enviadas ao Comitê Editorial para análise, através de link específico existente no site da Sociedade Brasileira de Planejamento Energético (www.sbpe.org.br).

A formatação final para publicação ficará por conta do departamento de diagramação da RBE, porquanto os artigos deverão ser enviados em formatação simples, conforme o disposto a seguir:

- Os trabalhos devem ser editados e enviados em arquivo Word.
- Papel A4, margens 20 mm, fonte Times New Roman tamanho 12, espaçamento simples.
- Figuras com resolução mínima de 300 dpi.
- O nome do autor ou autores, não devem ser abreviados, e as respectivas informações de instituição, endereço, cidade, cep, estado, telefone e e-mail devem ser apresentadas.
- Todos os itens devem ser numerados sequencialmente, exceto Resumo e Abstract. Não usar numeração automática do processador de texto. Serão aceitos no máximo 3 subníveis de numeração, a partir dos quais poderão ser usadas letras como único subnível adicional.
- Títulos de figuras e tabelas, abaixo e acima das mesmas, respectivamente, sem descrição de fonte, a qual deverá ser feita ao longo do texto, muito menos a existência do termo “autoria própria”.
- Referências a trabalhos deverão ser citadas no texto com nome do autor (ou autores) e ano de publicação, entre parêntesis [Ex.: (Autor 1, 1928); (Autor 1 e Autor 2, 1928)]. Na existência de mais de dois autores, escreve-se o nome do primeiro autor seguido da expressão et al. [Ex.: (Autor 1 et al, 1928)].

Referências Bibliográficas:

- Somente deverão ser citados autores ou trabalhos que estejam incluídos na lista de referências bibliográficas, assim como todos os trabalhos listados nas referências bibliográficas deverão ter sido citados no texto.
- Referências a autor(es) deverão ser citadas no texto com nome do autor (ou autores) sucedida do ano de publicação entre parêntesis [Ex.: Autor 1 (1928); Autor 1 e Autor2 (1928)].
- Na existência de mais de dois autores, escreve-se o nome do primeiro autor seguido da expressão et al. [Ex.:Autor 1 et al (1928)].