

revista brasileira de
ENERGIA



Sociedade Brasileira de
Planejamento Energético

Volume 25, Nº 1, 1º Trimestre de 2019

Diagramação

Kelly Fernanda dos Reis

Revisão

Célio Bermann e Kelly Fernanda dos Reis

**Revista Brasileira de Energia
Vol. 25 - nº 1**

Itajubá, 2019 - SBPE

Editor: Célio Bermann
124 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

É com grande satisfação que a Sociedade Brasileira de Planejamento Energético retoma a publicação da Revista Brasileira de Energia.

Tendo sido o seu primeiro número publicado em 1989, ano da criação da SBPE, a RBE ao longo dos seus 31 anos de existência se tornou no único periódico nacional na área da energia. Numa fase inicial em que sua periodicidade foi bastante irregular, a partir de 2005 a RBE passou a ter duas edições anuais, e a semestralidade se estendeu até o ano de 2016.

A partir de 2017 e em 2018 a RBE passou a ser trimestral mas este número de quatro edições anuais não pôde mais ser suportado por uma estrutura artesanal de recepção dos artigos e distribuição para os revisores, que encontrava na dedicação de *Kelly Fernanda dos Reis*, secretária executiva da SBPE, sua única forma operacional.

A modernização da RBE ocorreu ao longo do ano de 2019 quando o desenvolvedor *Felício Murbach Travareli*, também conhecido como Gabiru, adaptou o sistema Open Journal Systems – OJS às necessidades da revista criando a plataforma digital que hoje possibilita o controle de todas as etapas que envolvem a publicação de um artigo, desde a sua submissão, a distribuição aos revisores para a avaliação “duplo-cega”, a notificação aos autores da necessidade de revisão apontadas pelos revisores, até a decisão final do editor de aceite do artigo, com estas etapas e respectivas datas devidamente cadastradas no sistema.

Outra inovação da RBE que já está presente a partir do presente número, é a disponibilização do DOI (*Digital Object Identifier*) para cada um dos artigos publicados, algo que contribui para valorizar o esforço intelectual dos autores na elaboração de seus artigos, e a qualidade científica e acadêmica da própria Revista Brasileira de Energia.

É nesta nova e ágil infraestrutura que a RBE retorna a publicação, com o objetivo de se consolidar na divulgação trabalhos acadêmicos, estudos técnicos e resultados de pesquisas relacionadas ao planejamento energético do país e das suas relações regionais e internacionais.

Para evitar a ocorrência de uma interrupção, o que poderia trazer prejuízos no processo de avaliação para fins de indexação em plataformas bibliográficas de renome como a SciELO (*Scientific Electronic Library Online*), o corpo diretivo da SBPE decidiu por manter os 4 números inicialmente previstos para 2019 publicando-os em 2020. É este o primeiro número, referente ao 1º trimestre de 2019.

Neste número a RBE traz cinco artigos com um elenco diversificado de temas. O primeiro artigo “Análise da influência da estratégia de modelagem na predição da concentração do licor preto kraft queimado em caldeiras de recuperação”, de autoria de *Jeniffer Cristina Silveira, Andréa Oliveira Souza da Costa e Esly Ferreira da Costa Junior*, propõe duas estratégias de modelagem empregadas na descrição dos evaporadores de múltiplo efeito de uma fábrica de celulose, com o intuito de identificar a estratégia mais apropriada sob o ponto de vista energético.

No segundo artigo “Análise energética de uma usina nuclear com reator BWR e estudo comparativo com a usina nuclear Angra 2 do modelo PWR”, os autores *Filipe de Almeida da Silva Soares, Manuel Luís Pires Clara e Jonni Guiller Ferreira Madeira*, apresentam uma avaliação da eficiência energética de duas centrais nucleares, uma que utiliza o reator a água fervente (*boiling water reactor*) e outra com o reator a água pressurizada (*pressure water reactor*).

O tema da avaliação ambiental é tratado por *Luiz Antônio Perone Ferreira de Brito e Stefano Bueno da Costa* no artigo “Avaliação dos impactos socioambientais gerados na implantação de pequenas centrais hidrelétricas e usinas hidrelétricas de médio porte”, onde os autores avaliam as consequências socioambientais da instalação de pequenos e médios empreendimentos hidrelétricos em pequenos municípios localizados no Vale do Paraíba no Estado de São Paulo.

O quarto artigo “O uso da dinâmica de sistemas para apoio ao planejamento elétrico brasileiro”, seus autores *Filipe Rodrigues Nogueira Campos e Gisele de Lorena Diniz Chaves*, verificam a aplicação do método de Dinâmica de Sistemas no planejamento do sistema elétrico nacional, com foco no uso de recursos energéticos renováveis.

Por fim, o quinto artigo “The process of rural electrification in developing countries: systemic analysis based on the understanding of policies of Brazil and China”, de autoria de *André Frazão Teixeira, Davi Gabriel Lopes e Juan Arturo Castañeda-Ayarza*, analisam políticas e programas de eletrificação rural na China e no Brasil utilizando uma abordagem sistêmica.

Boa leitura!

Célio Bermann

Editor Responsável da Revista Brasileira de Energia

SUMÁRIO

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESTRATÉGIA DE MODELAGEM NA PREDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO LICOR PRETO KRAFT QUEIMADO EM CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO.....08

Jeniffer Cristina Silveira, Andréa Oliveira Souza da Costa, Eslly Ferreira da Costa Junior

ANÁLISE ENERGÉTICA DE UMA USINA NUCLEAR COM REATOR BWR E ESTUDO COMPARATIVO COM A USINA NUCLEAR ANGRA 2 DO MODELO PWR.....26

Filipe de Almeida da Silva Soares, Jonni Guillier Ferreira Madeira, Manuel Luis Pires Clara

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS GERADOS NA IMPLANTAÇÃO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS E USINAS HIDRELÉTRICAS DE MÉDIO PORTE.....43

Luiz Antonio Perrone Ferreira de Brito, Stefano Bueno da Costa

O USO DA DINÂMICA DE SISTEMAS PARA APOIO AO PLANEJAMENTO ELÉTRICO BRASILEIRO.....61

Filipe Rodrigues Nogueira Campos, Gisele de Lorena Diniz Chaves

THE PROCESS OF RURAL ELECTRIFICATION IN DEVELOPING COUNTRIES: SYSTEMIC ANALYSIS BASED ON THE UNDERSTANDING OF POLICIES OF BRAZIL AND CHINA.....85

André Frazão Teixeira, Davi Gabriel Lopes, Juan Arturo Castañeda-Ayarza

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA ESTRATÉGIA DE MODELAGEM NA PREDIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DO LICOR PRETO KRAFT QUEIMADO EM CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO

Jeniffer Cristina Silveira¹
Andréa Oliveira Souza da Costa²
Esly Ferreira da Costa Junior²

¹Universidade Federal de Uberlândia

²Universidade Federal de Minas Gerais

DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i1.399>

RESUMO

Plantas modernas de obtenção de celulose possuem como principal combustível para a geração de energia térmica e elétrica o licor preto. Este necessita passar por um sistema de evaporadores de múltiplo efeito para que seu teor de sólidos aumente até cerca de 80%. Possíveis alterações no processo de evaporação que vise aumentar a eficiência dos mesmos são de grande interesse industrial. Neste trabalho foram comparadas duas estratégias de modelagem empregadas na descrição dos evaporadores de múltiplo efeito de uma fábrica de celulose, com o intuito de identificar a estratégia mais apropriada sob o ponto de vista energético. Numa abordagem, considerou-se que a massa de licor preto se mantém constante no interior do evaporador, enquanto na outra admitiu-se que o volume de licor preto permanece inalterado. As abordagens apresentaram resultados claramente distintos, quando faixas amplas de variação de concentração de licor preto ($\geq 31\%$) foram empregadas em num mesmo evaporador. Para faixas mais restritas ($\leq 10\%$) as abordagens apresentaram perfis semelhantes de concentração. Portanto, para uma variação de concentração de licor preto no evaporador menor ou igual a 10% ambas as abordagens podem ser empregadas sem perda energética para o processo.

Palavras-chave: Produção de celulose, Licor preto, Evaporadores de múltiplo efeito, Modelo fenomenológico.

ABSTRACT

Modern plants for obtaining cellulose have as main fuel for generation of thermal and electric energy the black liquor. This needs to pass for a system of multiple effect evaporators to increase their solids content even about 80%. Possible changes in the evaporation process that aim to increase their efficiency are of great industrial interest. In this work was compared distinct modeling strategies employed in describing of multiple effect evaporators of a cellulose mill, in order to identify the most appropriate strategy from the energy point of view. In one approach, the mass of the black liquor was held constant inside the evaporator, while another admitted that the volume of black liquor remains unchanged. The approaches presented clearly different results, when a wide range of black liquor concentration ($\geq 31\%$) was employed in the same evaporator. For a more restricted range ($\leq 10\%$) the approaches presented similar profiles of black liquor concentration. However, for a concentration variation of black liquor in the evaporator less than or equal to 10% both approaches can be used without energy loss for the process.

Key words: Production of cellulose, Black liquor, Multiple effect evaporators, Phenomenological model.

1. INTRODUÇÃO

Para manter o crescimento econômico o setor industrial constantemente enfrenta desafios na geração de energia em todo o mundo. Como uma possibilidade de descentralização da geração energética, os biocombustíveis têm se mostrado uma alternativa sustentável e lucrativa, sendo aplicados em diferentes segmentos industriais (VIANA et. al., 2017; RIBEIRO E SEABRA, 2017).

Indiretamente envolvidas no comércio energético, as indústrias de papel e celulose dependem dos biocombustíveis para serem mais competitivas. As fábricas de celulose combinam a produção de energia e calor útil por meio da disponibilidade de combustíveis residuais processados (COSTA et. al., 2016). O setor utiliza quase que exclusivamente os subprodutos licor preto e biomassa.

A indústria de papel e celulose é responsável por gerar a maior parte da energia consumida em seus processos produtivos. Segundo Martin (2017) plantas industriais mais modernas são capazes de produzir toda a energia necessária ao processo fabril com sobra. O excedente dessa energia verde vem sendo comercializado e se fortalecendo como frente adicional de negócios do setor.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética Nacional 75% da energia consumida pelo setor em 2018 foi proveniente de fontes renováveis. Destaca-se a participação de 67% de energia térmica e elétrica geradas a partir de biomassa e licor preto.

No balanço energético setorial de 2018 (IBÁ, 2019) o licor preto e a biomassa representaram 64,3% e 18,1%, respectivamente, de toda energia produzida pelo seguimento industrial. Houve um aumento de 2,3% na produção de energia elétrica em relação ao ano anterior. Foram gerados 73,0 milhões de gigajoules (GJ), ou seja, 73% dos 99,8 milhões de GJ foram consumidos pelo setor. Cerca de 18,3 milhões de GJ foram vendidos para a rede pública.

Subproduto da rota kraft, o licor preto é caracterizado como uma mistura complexa, constituído de substâncias orgânicas dissolvidas da madeira e reagentes inorgânicos utilizados no digestor para o cozimento dos cavacos de madeira (ALVES et. al., 2015). Por razões econômicas e ambientais a recuperação dos produtos químicos formados durante o processo é de fundamental importância para a viabilidade de uma planta fabril. A unidade de recuperação de químicos é constituída de um sistema de evaporadores de múltiplo efeito, de caldeiras de recuperação e de caustificadores (MARTIN, 2017).

A solução a ser concentrada passa por todos os evaporadores dispostos em série. Por meio da evaporação a biomassa contida no licor preto é concentrada e seu teor de sólidos varia de 15% para cerca de 80% (ARAUJO et. al., 2016). A principal vantagem na utilização dos evaporadores de múltiplo efeito consiste na economia de energia, verificada ao utilizar o evaporado de um equipamento como fonte de energia de outro equipamento (PERRY E GREEN, 2008). No primeiro efeito o licor preto sofre sua maior alteração de concentração e é neste efeito que se define a concentração final do licor a ser queimado na caldeira.

O licor mais concentrado é o combustível das caldeiras de recuperação. A alimentação de licor com concentração próxima a 80% permite aumentar a eficiência e estabilidade da caldeira (CARDOSO et. al., 2009). O vapor superaquecido gerado nas caldeiras supre a demanda de energia térmica necessária, sendo também empregado na obtenção de grande parte da energia elétrica utilizada pela fábrica. Para garantir condições satisfatórias de funcionamento da caldeira o licor preto deve ser alimentado com umidade controlada, de modo a favorecer sua queima sem prejudicar a estabilidade do sistema. A taxa de alimentação de licor preto à caldeira pode variar em função de sua concentração. As características deste fluido podem afetar fortemente sua queima em caldeiras de recuperação. Suas propriedades físico-químicas podem variar em função da procedência dos mesmos e do processo empregado (CARDOSO, OLIVEIRA E PASSOS, 2009; COSTA et. al., 2016).

Parte significativa da energia demandada pela indústria é consumida no processo de evaporação. Possíveis alterações nesse processo que possibilitem aumentar a eficiência do mesmo são de grande interesse industrial (KHANAM e MOHANTY, 2011). Estudos da

literatura (DARMAWAN et. al., 2017; VERMA et. al., 2018a; CAO et. al., 2018; VERMA et. al., 2018b; DARMAWAN et. al., 2019; MOREIRA et. al., 2019; DARMAWAN et. al., 2020) tem avaliado o efeito de mudanças operacionais e de projeto no sistema de evaporadores de múltiplo efeito, visando a máxima eficiência energética e exergetica. Tais estudos consideraram a integração de outros equipamentos ao sistema de evaporadores, alternativas de economia de vapor para redução de custos, atuação de controladores de melhor desempenho nas alterações transitórias da concentração do produto e a recuperação de exergia. Os estudos citados têm por objetivo comum o máximo aproveitamento do poder energético advindo da evaporação do licor preto.

A simulação computacional deste processo possibilita testar melhores condições de operação dos equipamentos de forma rápida e eficiente. É possível prever a concentração máxima de licor preto para alimentação adequada à caldeira e o consumo mínimo de energia no processo de evaporação (CAMPOS, 2009). Diante da importância do sistema de evaporadores de múltiplo efeito no contexto energético da fábrica, estudos que visam aprimorar a representação matemática do processo são de grande valia, visto que constituem ferramentas úteis a tomada de decisões. Sendo assim, este trabalho tem por objetivo comparar distintas abordagens na modelagem de um sistema de evaporadores de múltiplo efeito de uma fábrica de celulose. Uma das abordagens considerou que a massa de licor preto permanece constante no interior do evaporador, enquanto a outra admitiu que o volume de licor preto se mantém invariável. Ressalta-se que a segunda abordagem se mostra fisicamente mais realista, uma vez que o volume de licor dentro dos evaporadores é controlado. Mesmo com o controle do volume, a massa dentro do evaporar não permanece constante. Isso devido às variações de densidade do licor preto, causadas pelas alterações na concentração de sólidos.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O modelo matemático proposto originalmente por Holland (1983) foi adaptado ao processo de concentração de licor preto de uma fábrica de celulose. Segundo Holland (1983), as considerações do modelo são: (i) mistura perfeita para o líquido retido no evaporador; (ii) retenção de vapor desprezível quando comparada à de líquido; (iii) retenção nula de energia nas paredes do equipamento; (iv) perdas para o ambiente desprezíveis. Além destas, outras considerações foram adotadas no decorrer do trabalho: (v) equilíbrio termodinâmico entre a mistura líquida em evaporação e os seus vapores e (vi) concentração do licor no interior dos evaporadores uniforme e igual ao valor de saída.

Admitiu-se um volume de controle representativo para todos os evaporadores do primeiro efeito, em função das correntes de entrada e saída, conforme apresentado na Figura 1.

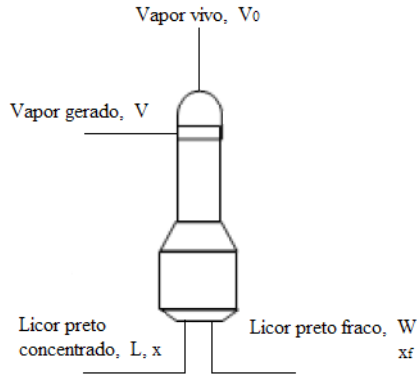


Figura 1 - Representação do evaporador estudado

As equações que compõem o modelo de Holland (1983) ad-vêm do balanço de massa global, balanço de massa de sólidos e balanço de energia, respectivamente, Equação (1), (2) e (3):

$$\frac{d(\mu \cdot x)}{dt} = W \cdot x_f - L \cdot x \quad (1)$$

$$\frac{d(\mu \cdot x)}{dt} = W \cdot x_f - L \cdot x \quad (2)$$

$$\frac{d(\mu \cdot h(\tau, x))}{dt} = W \cdot h(T_f, x_f) + V_0 \cdot Q - V \cdot H(\tau) - L \cdot h(\tau, x) \quad (3)$$

sendo W, L, V e V₀ as vazões mássicas de licor na entrada, licor na saída, vapor gerado e de vapor vivo, respectivamente, μ a massa de licor preto no evaporador, x a concentração de licor preto na saída, x_f a concentração de licor preto na entrada, τ a temperatura de ebulição do licor preto, h(τ, x) a entalpia do licor preto dentro do evaporador, h(T_f, x_f) a entalpia do licor preto na entrada do evaporador, Q o calor latente de condensação da água e H(τ) a entalpia do vapor gerado.

Dois abordagens distintas (Modelagem A e Modelagem B) foram empregadas na modelagem fenomenológica dos evaporadores.

As expressões algébricas para o cômputo de L e V foram determinadas para ambas as abordagens.

2.1 Modelagem A

Esta abordagem foi desenvolvida segundo Costa (2000); Costa e Lima (2003) e Campos (2009). A consideração admitida foi que a massa de licor preto e a pressão dentro do evaporador permanecem constantes ao longo do tempo. A partir desta consideração o balanço de massa (Equação 1) foi reescrito da seguinte forma:

$$L = W - V \quad (4)$$

Derivando pela regra do produto o lado esquerdo da Equação (2) e de acordo com a consideração de massa de licor preto constante tem-se:

$$\mu \cdot \frac{dx}{dt} = W \cdot x_f - L \cdot x \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = \frac{1}{\mu} (W \cdot x_f - L \cdot x) \quad (6)$$

Realizando o mesmo procedimento descrito anteriormente para o balanço de energia (Equação 3) tem-se:

$$\mu \cdot \frac{d[h(\tau, x)]}{dt} = W \cdot h(T_f, x_f) + V_0 \cdot Q - V \cdot H(\tau) - L \cdot h(\tau, x) \quad (7)$$

Considerando pressão (P) constante:

$$\mu \cdot \frac{d[h(\tau, x)]}{dt} = \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial \tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (8)$$

Sabe-se que a temperatura de ebulição do licor preto (τ) é função da pressão e da concentração. Entretanto, durante a operação do evaporador, a pressão em cada efeito é constante e assim:

$$\frac{d\tau}{dt} = \frac{d\tau}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (9)$$

Substituindo a Equação (9) na Equação (8) e rearranjando tem-se:

$$D_A = \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial\tau} \cdot \frac{d\tau}{dx} + \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial x} \quad (10)$$

Sendo D_A a variação da entalpia com a concentração:

$$\frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial\tau} = \frac{dx}{dt} \cdot D_A \quad (11)$$

Substituindo a Equação (11) na Equação (8) obtém-se:

$$\mu \cdot \frac{dx}{dt} \cdot D_A = \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial\tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} + \frac{\partial[h(\tau, x)]}{\partial x} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (12)$$

Substituindo a Equação (6) e a Equação (4) na Equação (12) é possível obter:

$$V = \frac{W \cdot [h(T_f, x_f) - h(\tau, x) + D_A \cdot (x - x_f)] + Q}{D_A \cdot x + H(\tau) - h(\tau, x)} \quad (13)$$

O sistema de equações a ser resolvido, considerando a massa de licor preto no evaporador constante, é composto pelas Equações (4), (6) e (13).

2.2 Modelagem B

Nesta abordagem a consideração admitida foi que o volume de licor preto e a pressão dentro do evaporador permanecem constantes ao longo do tempo. A modelagem B é apresentada segundo os trabalhos de Schuina, Costa e Costa Jr. (2009) e Carvalho, Costa e Costa Jr. (2009).

Derivando pela regra do produto, no lado esquerdo da Equação (2) tem-se:

$$x \cdot \frac{d\mu}{dt} + \mu \cdot \frac{dx}{dt} = W \cdot x_f - L \cdot x \quad (14)$$

Substituindo a Equação (14) na Equação (1) obtém-se:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{W}{\mu} (x_f - x) + \frac{V}{\mu} \cdot x \quad (15)$$

A relação matemática para determinar o vapor gerado no evaporador (V) é representada pela Equação (13). A mesma relação para V é utilizada nas duas abordagens. Esta relação foi obtida por meio do balanço de energia, o qual não sofre influência das considerações massa de licor preto constante (Modelagem A) e volume de licor preto constante (Modelagem B).

Para determinar a equação que computa a vazão mássica de licor preto na saída do evaporador (L), foi aplicada a consideração de volume constante:

$$\frac{\mu}{\rho(\tau, x)} = Vol \quad (16)$$

onde Vol corresponde ao volume de licor preto dentro do evaporador e ρ a densidade do licor preto. Derivando a Equação (16) em relação ao tempo tem-se:

$$\frac{d\left[\frac{\mu}{\rho(\tau, x)}\right]}{dt} = \frac{d[Vol]}{dt} = 0 \quad (17)$$

Aplicando a derivada do quociente no lado esquerdo da Equação (17) encontra-se:

$$\rho(\tau, x) \cdot \frac{d\mu}{dt} - \mu \cdot \frac{d\rho(\tau, x)}{dt} = 0 \quad (18)$$

Após substituir a Equação (1) na Equação (18) e aplicar a regra da cadeia para a derivada da densidade com o tempo, obteve-se:

$$\rho(\tau, x) \cdot (W - V - L) - \mu \cdot \left(\frac{d\rho}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{d\rho}{d\tau} \cdot \frac{d\tau}{dt} \right) = 0 \quad (19)$$

Substituindo a Equação (9) na Equação (19) obtém-se:

$$\rho(\tau, x) \cdot (W - V - L) - \mu \cdot \left(\frac{d\rho}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{d\rho}{d\tau} \cdot \frac{d\tau}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \right) = 0 \quad (20)$$

Substituindo a Equação (15) na Equação (20) e rearranjando, obteve-se:

$$L = \frac{\left[-(W \cdot (x - x_f) + V \cdot x) \cdot \left(\frac{d\rho}{dx} + \frac{d\rho}{d\tau} \cdot \frac{d\tau}{dx} \right) + \rho(\tau, x) \cdot (W - V) \right]}{\rho(\tau, x)} \quad (21)$$

As Equações (1), (13), (15) e (21) compõem o sistema de equações matemáticas a serem resolvidas para a modelagem B, que considerou volume de licor preto no evaporador constante.

2.3 Relações adicionais

Relações empíricas foram utilizadas para descrever a entalpia, a elevação do ponto de ebulição (EPE) e a densidade do licor preto, como também a entalpia do vapor gerado no evaporador.

Segundo Costa, Passos e Cardoso (1999), que estudaram a densidade do licor preto proveniente da CENIBRA (Celulose Nipo-Brasileira), a Equação (22) descreve a densidade do licor preto em função da concentração de sólidos.

$$\rho(x) = \left[\left(\frac{x}{1829,2} \right) + \left(\frac{(1-x)}{997,3} \right) \right]^{-1} \quad (22)$$

Para determinar a elevação do ponto de ebulição do licor preto utilizou-se a Equação (23), obtida por Costa (2000) a partir de um conjunto de dados experimentais. Segundo a pesquisadora, esta relação foi capaz de descrever 96,68% da variabilidade experimental.

$$\text{EPE}(x) = 1,0099140 \cdot e^{3,940961 \cdot x} \quad (23)$$

A temperatura do licor preto foi obtida por meio da soma entre a temperatura de saturação da água, na mesma pressão do licor preto no evaporador, com a elevação do ponto de ebulição do licor preto. De acordo com Costa (2000) essa relação é dada por:

$$\tau(x, P) = T_{\text{saturação}}(P) + \text{EPE}(x) \quad (24)$$

A entalpia do licor preto foi obtida segundo Costa (2000) que integrou a Equação (25), correspondente ao calor específico do licor $C_p(\tau, x)$, de modo a obter a Equação (26).

$$C_p(\tau, x) = 4053,7372 + 0,3349 \cdot \tau - 3312,3550 \cdot x + 2,6808 \cdot x \cdot \tau \quad (25)$$

$$h(\tau, x) = 3963,6 \cdot \tau - 1094968,28 + 0,165 \cdot \tau^2 - 4044,40 \cdot x \cdot \tau + 1004749,77 \cdot x + 1,34 \cdot x \cdot \tau^2 \quad (26)$$

A equação apresentada anteriormente foi utilizada para descrever a entalpia do licor na temperatura de entrada e na temperatura de saída do fluido. A expressão que descreve a entalpia do vapor gerado no evaporador é apresentada segundo Costa (2000):

$$H(\tau) = 1174,6 \cdot \tau + 2 \cdot 10^6 \quad (27)$$

As condições operacionais necessárias para a simulação do comportamento dinâmico do evaporador estudado são apresentadas na Tabela 1. Esses valores foram obtidos por meio de dados industriais de uma fábrica de celulose.

Tabela 1 - Condições operacionais

Variáveis	Valores
x	0,649
W	1.10 ⁵ kg/h
T _{sat}	396,4 K
T _f	400,9 K
T ₀	420,5 K
P	220 kPa
V ₀	15 ton./h

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Inicialmente, a quantidade de calor disponível no evaporador foi determinada por meio da vazão de vapor vivo alimentado ao evaporador (V_0) e o calor latente de condensação ($H_{\text{condensação}}$) da respectiva corrente. Foi considerado somente o calor latente de condensação, visto que, a perda de energia atribuída à mudança de fase é consideravelmente superior à energia perdida durante o resfriamento da corrente de vapor. De posse da pressão no evaporador (220 kPa), e com o auxílio de tabelas termodinâmicas (SMITH, ABBOTT E VAN NESS, 2007), obteve-se a entalpia da corrente de vapor de alimentação, correspondente a 2194,07 kJ/kg. O cálculo realizado é apresentado a seguir:

$$Q = H_{\text{condensação}} \cdot V_0 \quad (28)$$

$$Q = 2194,07 \left(\frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \right) \cdot 15 \left(\frac{\text{ton}}{\text{h}} \right) \cdot 1000 \left(\frac{\text{kg}}{\text{ton}} \right) = 3,2911 \cdot 10^{10} \text{J/h} \quad (29)$$

Os modelos matemáticos resultantes da aplicação da modelagem A e da modelagem B foram implementados no software MATLAB®. Para a resolução das equações diferenciais empregou-se a rotina de

integração ode45, a qual utiliza o método numérico Runge-Kutta.

A massa de licor preto retida no evaporador ao longo do tempo de operação, obtida por meio das modelagens A e B, é mostrada na Figura 2(a) e qual apresenta 98% do estado estacionário.

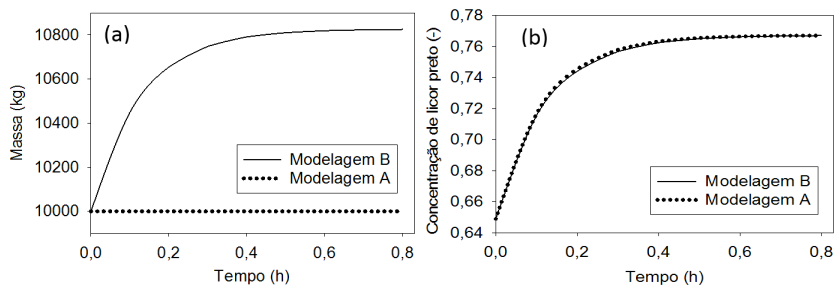


Figura 2 - Perfil dinâmico da massa (a) e da concentração (b) de licor preto retido no evaporador

Analisando-se a Figura 2(a) observa-se que a massa permaneceu constante para a modelagem que utiliza tal consideração (Modelagem A). Entretanto, para a modelagem assumindo volume constante (Modelagem B), percebeu-se um aumento da massa de licor preto no interior do evaporador, sendo o estado estacionário atingido com 10823,2 kg.

A Figura 2(b) ilustra o perfil de concentração de licor preto dentro do evaporador no decorrer da operação, obtido por meio da modelagem A e B. Nota-se que as duas modelagens apresentaram o mesmo perfil de concentração de sólidos. O estado estacionário foi alcançado com $x = 0,767$.

Era esperado que a concentração de licor preto atingisse o estado estacionário de forma distinta para as diferentes modelagens empregadas, entretanto, isso não foi observado. Para a concentração inicial de licor preto utilizada ($x = 0,649$), a consideração de volume constante, embora mais correta do ponto de vista físico, do ponto de vista prático não exerce efeito sobre a concentração final de licor preto.

Para verificar se as modelagens estudadas não possuem comportamentos diferentes em outras condições operacionais, foram testadas diferentes faixas de operação. A concentração de licor preto alimentado ao evaporador foi modificada e, conseqüentemente, a quantidade de calor transferida ao sistema. Para cada situação abordada, manteve-se constante a concentração final do licor preto ($x_f = 0,767$). As condições empregadas nas simulações são apresentadas na Tabela 2, considerando o tempo de operação de 2h. Os perfis dinâmicos obtidos são apresentados na Figura 3.

Tabela 2 - Condições iniciais

Condições	Variáveis	Valores
1	x Q	0,15 15,9.10 ¹⁰ J/h
2	x Q	0,45 8,24.10 ¹⁰ J/h
3	x Q	0,65 3,15.10 ¹⁰ J/h

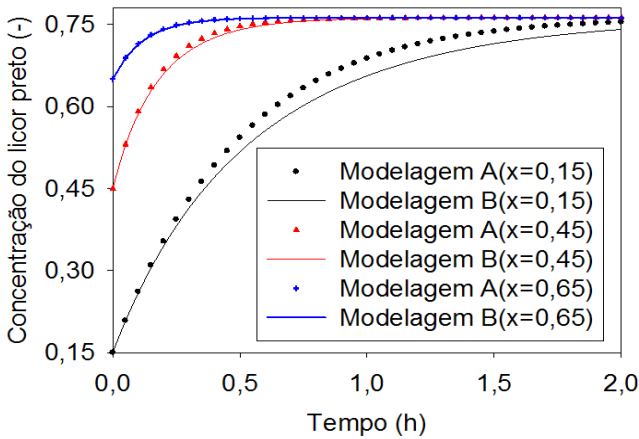


Figura 3 - Variação da concentração de licor preto dentro do evaporador em diferentes condições operacionais, para 2h de operação

De acordo com a Figura 3, tem-se uma diferenciação dos perfis de concentração do licor preto para as modelagens abordadas. Quanto menor a concentração inicial de licor preto na alimentação, maior a diferença entre os modelos. Nota-se que no tempo de operação de 2h não foi possível atingir o estado estacionário para a primeira situação testada ($x = 0,15$). Com isso optou-se por prolongar a operação até que o estado estacionário fosse alcançado, conforme apresentado na Figura 4. Após 3h de operação todas as situações testadas atingiram o estado estacionário. Os perfis de concentração de licor preto em um único evaporador, apresentados nas Figuras 3 e 4, foram semelhantes aos dados industriais reportados por Bahargava et. al. (2007) e Moreira et. al. (2019) para um sistema de evaporadores de múltiplo efeito, operando com uma variação de concentração de sólidos de 39% e 60%, respectivamente.

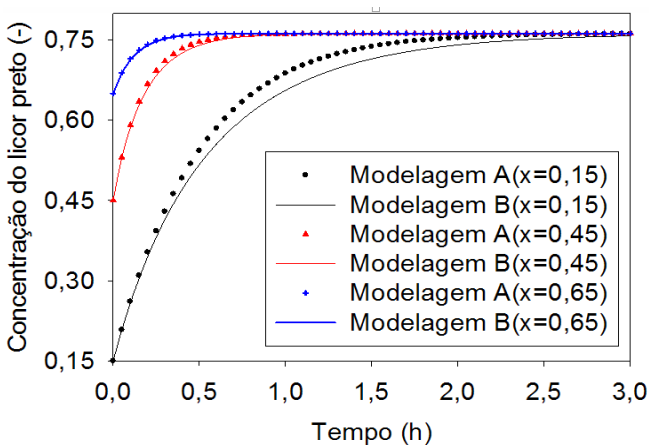


Figura 4 - Variação da concentração de licor preto dentro do evaporador em diferentes condições operacionais, para 3h de operação

Um perfil dinâmico da diferença de concentração de licor preto entre as duas modelagens analisadas é apresentado na Figura 5. Esta diferença foi computada ao longo do tempo de operação do evaporador, em cada uma das três condições iniciais estudadas.

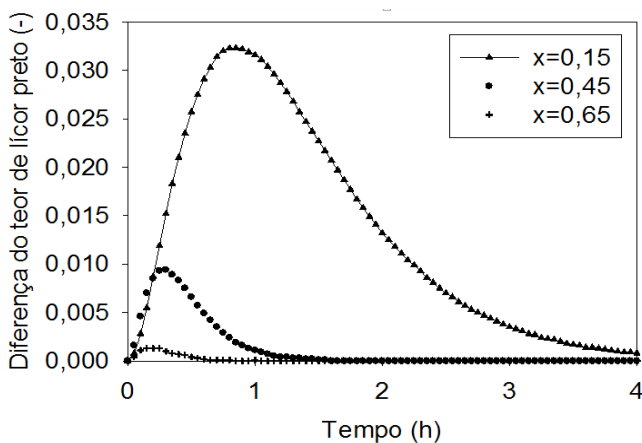


Figura 5 - Perfis dinâmicos da diferença de concentração de licor preto entre as duas modelagens analisadas

Ao analisar a Figura 5 é possível perceber o quão significativa é a diferença entre as duas abordagens, para faixas maiores de operação do evaporador. Ao alimentar licor preto com $x = 0,15$, a diferença atinge seu ápice no tempo de 1h de operação. Sendo assim, quanto maior a faixa de operação do evaporador, maior é a diferença entre as modelagens testadas, sendo esta diferença localizada próxima ao início da operação.

Como a maior faixa de operação do evaporador apresentou diferença significativa entre as modelagens testadas, optou-se por implementar ambas as modelagens na faixa de operação industrial. Segundo Campos (2009), este evaporador recebe licor preto com a concentração de aproximadamente 15% e tem como saída licor concentrado com teor de sólidos equivalente a 25%. O perfil obtido para esta situação é apresentado na Figura 6.

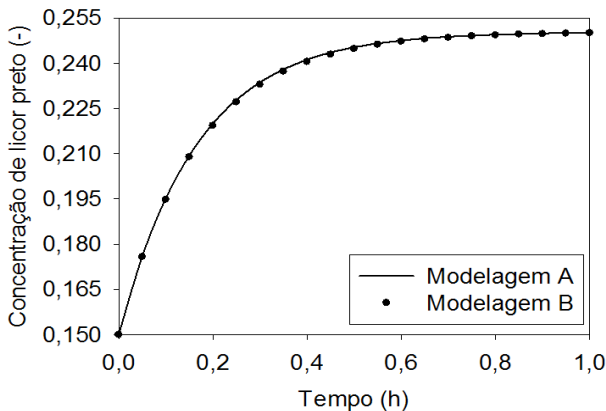


Figura 6 - Variação da concentração de licor preto no evaporador para faixa de operação industrial

De acordo com a Figura 6, após 1h de operação o estado estacionário foi atingido. Observa-se que, ao contrário do comportamento obtido na Figura 4 (a qual apresentou diferença entre as modelagens para uma faixa mais ampla de operação), na Figura 6 não ocorreu diferença significativa entre as modelagens testadas. Pode-se dizer que para a faixa de operação industrial dos evaporados (cuja alimentação consiste em licor com baixo teor de sólidos) as duas modelagens não apresentaram diferenças quanto ao aspecto prático. Ressalta-se que os evaporadores de múltiplo efeito industriais operam em pequenas faixas de concentração ($\leq 10\%$) para garantir a eficiência energética e exérgica dos mesmos, conforme verificado por DARMAWAN et. al. (2017) e CAO et. al. (2018).

4. CONCLUSÕES

No presente trabalho foram testadas distintas abordagens baseadas no balanço de massa e energia para a descrição de evaporadores de múltiplo efeito de uma fábrica de celulose. Uma modelagem considerou massa constante de licor preto no interior do evaporador, enquanto na outra admitiu-se volume constante.

As modelagens apresentaram resultados distintos para faixas amplas de variação de concentração de licor preto ($\geq 31\%$) em um mesmo evaporador. Conforme ampliação da faixa de operação do evaporador, maior foi a diferença entre as modelagens testadas, impactando tanto a concentração de licor preto no evaporador, quanto o tempo necessário para alcançar o estado estacionário.

Para faixas reduzidas de operação do evaporador ($\leq 10\%$) as modelagens apresentaram perfis de concentração de licor preto semelhantes. Em aplicações industriais a faixa, geralmente considerada, é inferior a 10%. Neste caso não há diferença significativa entre as estratégias de modelagem e ambas podem ser empregadas na descrição do processo.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro da FAPEMIG por meio do Edital FAPEMIG 01/2016 - Demanda Universal, Processo TEC APQ 00914-16.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, E. D.; PINHEIRO, O. S.; COSTA, A. O. S.; COSTA Jr., E. F. Estudo do processo de obtenção celulose Kraft com ênfase no forno de cal. *Revista Liberato*, v. 16, n. 26, p. 101-220, 2015.

ARAUJO, M. N.; PINHEIRO, O. S.; COSTA Jr., E. F.; COSTA, A. O. S. Modelagem fenomenológica do comportamento dinâmico de evaporadores de múltiplo efeito. *O PAPEL*, v. 77, n. 6, p. 77-81, 2016.

BHARGAVA, R.; KHANAMB, S.; MOHANTY, B.; RAY, A. K. Selection of optimal feed flow sequence for a multiple effect evaporator system. *Computers & Chemical Engineering*, v.32, p. 2203-2216, 2007.

CAMPOS, S. G. S. Modelagem Matemática e Análise do Coeficiente Global de Transferência de Calor para o Processo de Concentração do Licor Negro de Eucalipto em Sistema de Evaporadores de Múltiplo Efeito. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) – Unileste, MG, Coronel Fabriciano, 110 p., 2009.

CAO, C.; HE, Y.; CHEN, J.; CAO, W.; JIN, H. Evaluation of effect of evaporation on supercritical water gasification of black liquor by energy and exergy analysis. *Hydrogen Energy*, v.43, p.13788-13797, 2018.

CARDOSO, M.; OLIVEIRA, E.D.; PASSOS, M.G. Chemical composition and physical properties of black liquors and their effects on liquor recovery operation in Brazilian pulp mills. *Fuel*, n. 88, p.756–763, 2009.

CARDOSO, M.; OLIVEIRA, K. D.; COSTA, G. A. A.; PASSOS, M. L. Chemical process simulation for minimizing energy consumption in pulp mills. *Applied Energy*, v.86, p. 45-51, 2009.

CARVALHO, P. I. N.; COSTA, A. O. S.; COSTA Jr, E. F. Modelagem Matemática de Evaporadores de Múltiplo Efeito Empregados no Aumento do Teor de Sólidos do Leite. In: VIII COBEQ IC - VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica: Anais, v.1, p. 1-6, Uberlândia, 2009.

COSTA, A. O. Alternativas para o Controle de um Sistema de Evaporadores de Múltiplo Efeito. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2000.

COSTA, A. O. S.; LIMA, E. L. Modelling and Control of an Industrial Multiple-Effect Evaporator System. *Canadian Journal of Chemical Engineering*, v. 81, n. 5, p. 1032-1040, 2003.

COSTA, A. O. S.; PASSOS M. L.; CARDOSO M. Comportamento Reológico do Licor Negro de Eucalipto. In: 6ª Jornada de Engenharia Química UFU/UFMG: Anais, p. 57-60, Uberlândia, 1999.

COSTA, A. O. S.; SILVA, A. C.; BARAÑANO, A. G.; COSTA Jr., E. F. Empirical analysis of the boiling point elevation of eucalyptus Kraft black liquor. *O PAPEL*, v. 77, n. 10, p. 88-92, 2016.

DARMAWANN, A.; AJIWIBOWO, M. W.; AZIZ, M.; TOKIMATSU, K. Efficient black liquor conversion to power and H₂ by adopting negative emission technology. *Energy Procedia*, v.158, p. 266-271, 2019.

DARMAWANN, A.; AJIWIBOWO, M. W.; TOKIMATSU, K. AZIZ, M. Efficient co-production of power and ammonia from black liquor. *Hydrogen Energy*, 2020.

DARMAWANN, A.; HARDI, F.; YOSHIKAWA, K.; AZIZ, M.; TOKIMATSU, K. Enhanced process integration of black liquor evaporation, gasification, and combined cycle. *Applied Energy*, v.204, p. 1035-1042, 2017.

HOLLAND, C. D. *Computer Methods for Solving Dynamic Separation Problems*. New York: McGraw, 1983.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. Relatório 2019.

KHANAM, S.; MOHANTY, B. Development of a new model for multiple effect evaporator system. *Computers & Chemical Engineering*, v.35, p.1983–1993, 2011.

MARTIN, C. Indústria de celulose e papel aposta no potencial da cogeração de energia. *O PAPEL*, v. 78, p. 54-63, 2017.

MOREIRA, J.; CAMPOS, B. L. O.; COSTA Jr, E. F.; COSTA, A. O. S. EXERGY AND SENSIBILITY ANALYSIS OF EACH INDIVIDUAL EFFECT IN A KRAFT MULTIPLE EFFECT EVAPORATOR. *Recovery Cycle*, v. 18, n.10, p. 607-619, 2019.

PERRY, H. R.; GREEN, D. W. *Perry's Chemical Engineering Handbook*, 8ª ed. New York: Editora McGraw-Hill, 2008.

RIBEIRO, C. H.; SEABRA, J. E. A. Proposta de uma metodologia de precificação da cana levando em consideração a contribuição do bagaço e da palha na produção de eletricidade e de etanol de segunda geração. *Revista Brasileira de Energia*, v. 23, n. 2, p. 72-88, 2017.

SCHUINA, G. L. ; COSTA, A. O. S. ; COSTA Jr, E. F. Modelagem Matemática de Evaporadores de Múltiplo Efeito Empregados na Concentração do Extrato de Café. In: VIII COBEQ IC - VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica: Anais, v.1, p. 1-6, Uberlândia, 2009.

SMITH, J. M.; ABBOTT, M. M.; VAN NESS, H. C. *Introdução à termodinâmica da engenharia química*. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

VERMA, O. P.; MANIK, G.; JAIN, V. K. Simulation and control of a complex nonlinear dynamic behavior of multi-stage evaporator using PID and Fuzzy-PID controllers. *Journal of Computation Science*, v. 25, p.238-251, 2018b.

VERMA, O. P.; MANIK, G.; SURYAKANT; JAIN, V. K.; JAIN, D. K.; WANG, H. Minimization of energy consumption in multiple stage evaporator using Genetic Algorithm. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, v. 20, p.130-140, 2018a.

VIANA, N. A.; GUIMARÃES, M. G.; BRASIL, A. C. M.; VALE, A. T.; MACEDO, J. L.; GHESTI, G. F. Gaseificação da casca do jatobá-do-cerrado: caracterização e comparação entre simulação e ensaios laboratoriais. *Revista Brasileira de Energia*, v. 23, n. 3, p. 82-104, 2017.

ANÁLISE ENERGÉTICA DE UMA USINA NUCLEAR COM REATOR BWR E ESTUDO COMPARATIVO COM A USINA NUCLEAR ANGRA 2 DO MODELO PWR

Filipe de Almeida da Silva Soares¹
Jonni Guillier Ferreira Madeira¹
Manuel Luis Pires Clara²

¹CEFET/RJ - Campus Angra dos Reis

²ESTiG - Instituto Politécnico de Bragança

DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i1.422>

RESUMO

Uma usina nuclear gera energia elétrica por meio de reações nucleares que ocorrem controladamente em um reator. Este tipo de termoeletrônica vem se destacando como uma importante fonte de energia elétrica, principalmente a elevados fatores de capacidade, domínio da tecnologia e emissão de pequenas quantidades de gases que influenciam no efeito estufa. Os reatores de água fervente (Boiling Water Reactor - BWR) representam 18% do total de reatores nucleares existentes do mundo, ficando apenas atrás dos reatores de água pressurizada (Pressurized Water Reactor - PWR). Neste trabalho é apresentado um estudo investigativo, no qual foi realizada uma análise energética sobre a central nuclear de LaSalle e seus equipamentos. Foi feita, também, uma comparação com os dados encontrados por Siqueira (2016), que realizou um estudo da usina nuclear de Angra 2 do tipo PWR. A usina nuclear analisada é do tipo BWR, com capacidade de geração de 1144 MW. A eficiência encontrada do ciclo da planta foi de 34,6%, valor ligeiramente superior ao resultado encontrado num PWR. No entanto, esta diferença se torna significativa quando tem-se que essas centrais funcionam com capacidade superior à 1000MW.

Palavras-chave: Energia Nuclear, Reator BWR, Reator PWR, Análise Energética, Energia.

ABSTRACT

A nuclear power plant generates electricity through nuclear reactions that occur in a controlled reactor. This type of thermoelectric has been standing out as an important source of electric energy due mainly to high capacity factors, dominance of the technology and emit small volumes of gases that influence the greenhouse effect. Boiling water reactors (BWRs) account for 18% of the world's existing nuclear reactors, behind only the pressurized water reactors (PWRs). This work presents an investigative study where an energy analysis was performed on the LaSalle nuclear power plant and its equipment. In addition to a brief comparison with the data found by Siqueira (2016) who carried out a study of the Angra 2 nuclear power plant of the PWR type. The nuclear power plant analysis is of type BWR, with a generating capacity of 1144 MW. The efficiency found in the plant cycle was 34.6%, slightly higher than the result found in a PWR. However, this difference becomes significant since it is known that these plans operate with capacity greater than 1000MW.

Keywords: Nuclear Energy, BWR Reactor, PWR Reactor, Energy Analysis, Energy.

1. INTRODUÇÃO

Na sociedade moderna atual é indispensável dispor de energia para satisfazer todas as necessidades existentes. Com o consumo energético crescendo cada vez mais faz-se necessário o aumento da oferta de energia, em especial da elétrica, de forma confiável e com o preço adequado. O suprimento e a segurança energética são de extrema importância para qualquer país e, devido a isto, os governos de forma geral vêm estudando as tecnologias e a energia nuclear vem se destacando com uma importante fonte de energia elétrica (ELETRONUCLEAR, 2016).

Uma usina nuclear gera energia elétrica por meio de reações nucleares que ocorrem controladamente em um reator. O calor gerado pela reação nuclear é o responsável pela transformação da água em vapor e este, por sua vez, aciona uma turbina a vapor que é ligada a um gerador e, dessa forma, é produzida a eletricidade (ELETRONUCLEAR, 2017a).

Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, da sigla em inglês), o setor de produção de eletricidade emite no mundo 10 gigas toneladas de CO_2 para atmosfera. Isso representa a maior parcela da emissão global com aproximadamente 37%. No relatório de comparação das emissões de gases do efeito estufa realizado pela World Nuclear Association, a energia nuclear se

destaca, podendo ser considerada como uma fonte limpa de produção de eletricidade. Neste relatório, a energia nuclear apresenta os menores valores médios de emissão de dióxido de carbono por GWh produzido dentre as fontes não renováveis. Estes valores são semelhantes aos encontrados em fontes renováveis de energia como a hidráulica e a eólica. No caso da energia nuclear, as emissões estão em sua maior parte na construção e desmantelamento (WNA, 2011).

A energia nuclear, presente em vários países, vem se tornando uma das principais fontes de energia devido a fatores como: eletricidade em abundância a partir de pequenas quantidades de material base, já que 1 kg de urânio libera aproximadamente a mesma quantidade de energia que 16 mil toneladas de um combustível fóssil (GOLDEMBERG, 2011); as usinas nucleares requerem uma menor área de instalação quando comparadas às usinas hidroelétricas, por exemplo; emitem pequenas quantidades de gases que influenciam no efeito estufa; produção de energia elétrica independe das condições climáticas; possibilitam também uma maior independência energética para alguns países que dependem do petróleo e gás estrangeiro; elevados fatores de capacidade e domínio da tecnologia (PERRUZO, 2012; SIQUEIRA, 2016).

Apesar destas vantagens ainda existe muita desconfiança, principalmente da população, em relação a segurança e os riscos que se têm na produção de energia elétrica por meio das usinas nucleares. Casos de acidentes nucleares mais recentes como o de Fukushima (2011) e, até mesmo, mais antigos como o de Chernobyl (1986) e o de Three Mile Island (1979) são assuntos de bastante discussão e polêmica (PERRUZO, 2012).

Mesmo com a existente desconfiança, a produção de energia nuclear apresentou um crescimento mundial considerável dentre os anos de 1974 e 2014. Segundo dados da Agência Internacional de Energia (IEA, da sigla em inglês) a participação da energia nuclear na matriz energética mundial passou de 0.9% para 4,8%, do ano de 1974 para o ano de 2014. Especificamente para produção de eletricidade, no ano de 2014, ela representou 10.7% a nível mundial. Tal dado mostra que a geração de eletricidade, a partir da energia nuclear, é bastante expressiva no cenário mundial. Com dados de 2014, a tabela seguinte mostra que países como França, Ucrânia, Suíça, Coreia, Estados Unidos, Reino Unido, entre outros, têm sua energia elétrica altamente dependente da energia nuclear. Por outro lado, pode-se dizer que atualmente a energia nuclear vive um cenário de incerteza. Enquanto países como a China estão investindo e expandindo o uso da energia nuclear para geração de energia, a Alemanha está buscando diminuir a oferta nuclear em sua matriz energética. Enquanto países como a França mantêm constante o uso e investimento na energia nuclear, outros

não cogitam a possibilidade de instalação.

Os reatores presentes nas usinas nucleares convertem a energia gerada na fissão do urânio, que é o material físsil mais utilizado atualmente, para produção de energia elétrica. Quanto às estruturas e formas de trabalho, estes reatores podem ser de diversos tipos (WNA, 2017a). Os reatores de água pressurizada (PWR – Pressurized Water Reactor) e os reatores de água fervente (BWR – Boiling Water Reactor) são considerados os principais tipos e representam cerca de 64% e 18%, respectivamente, do total de reatores existentes no mundo (IAEA, 2016). Os outros tipos equivalem a tecnologias que estão se tornando obsoletas e sumirão da matriz nuclear mundial na medida em que as usinas chegarem ao fim de suas vidas úteis (ELETRONUCLEAR, 2017b).

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Reatores BWR

Os reatores de água fervente (BWR) têm origem na década de 1950 e fizeram uso da tecnologia desenvolvida pela GE Hitachi Nuclear Energy (GEH) no plano de submarino nuclear projetado para marinha dos Estados Unidos. O primeiro reator deste tipo, construído na Califórnia em 1957, com geração de 5 MWe, confirmou a possibilidade de geração de eletricidade com sucesso e segurança (SCHREIBER, 2009). Os BWRs são adotados em países como os Estados Unidos, Japão, Alemanha, Finlândia, Rússia, Suíça e Suécia (IAEA, 2016).

O BWR foi desenvolvido tendo como base o reator de água pressurizada (PWR), com o objetivo de simplificar o projeto e aumentar a eficiência térmica. A maior diferença entre os dois é que o BWR trabalha com um único circuito a pressão e temperatura mais baixas (WNA, 2017b; CLP, 2017). O calor gerado pela fissão do átomo de urânio faz a água de refrigeração ferver no núcleo do reator até se transformar em vapor. O vapor gerado alimenta diretamente as turbinas onde será gerada a energia elétrica. Ao contrário do que ocorre no BWR, em um PWR, a água aquecida no núcleo do reator não entra em seu estado de vapor por estar sob pressão elevada. Em seguida, esta água quente troca calor com uma água sob baixa pressão, que entra no estado de vapor e, assim, é encaminhado para as turbinas. (PERRUZO, 2012; BRENNEN, 2005; SCHNEIDER, et al., 2015).

A simplificação do projeto para um único circuito é vantajosa para a eficiência térmica, porém, a água ao redor do núcleo do reator contém sempre traços de radionuclídeos e isto significa que a turbina deve

ser bem protegida a fim de se evitar a liberação do vapor com produto radioativo ao meio externo (WNA, 2017b). Segundo Perruzo (2012), o sistema de resfriamento de emergência é bem mais complexo do que nos PWRs, já que as injeções de hastes de controle vêm da parte de baixo do vaso de pressão. Para um caso de desligamento de emergência, seria necessária energia para fazer com que estes absorvedores de nêutrons sejam introduzidos no núcleo. Essa energia não é necessária nos PWRs, já que as barras de controle são posicionadas para cair por gravidade. A grande vantagem dos reatores de água fervente, quando comparados os de água pressurizada, está na eficiência energética do ciclo. A melhor eficiência se deve, principalmente, por não ter o gerador de vapor e as perdas associadas a este componente (GEH, 2010; RAGHEB, 2017).

2.2 Estudos energéticos

O estudo energético é uma importante ferramenta para o processo de aumento da eficiência global de geração de energia elétrica das plantas, nas quais são analisados os equipamentos e a planta como um todo. Os estudos energéticos em centrais nucleares são realizados desde a década de 80, com aplicação nas mais diversas plantas e tipos de reatores. Nas bibliografias analisadas as plantas nucleares apresentaram eficiência do ciclo entre 30 a 36% (SIQUEIRA, 2016; ROSEN, SCOTT, 1986; DURMAYAZ, YAVUZ, 2001).

Rosen e Scott (1986) realizaram um estudo energético e exerético de uma central nuclear que apresenta um reator do tipo CANDU. Este tipo de reator é formado por um conjunto tubo gerador composto por turbinas de alta e baixa pressão com sistema de reaquecimento, além de um conjunto de condensador e aquecedores de baixa e alta pressão. Os resultados encontrados sobre a análise energética mostram uma eficiência do ciclo de 30%.

Durmayaz e Yavuz (2001) realizaram uma análise energética e exerética em uma usina nuclear com reator PWR, de potência térmica de 4250 MW com geração de 1500 MWe. Os resultados encontrados sobre a análise energética mostram uma eficiência do ciclo de 36%. As eficiências energéticas das turbinas de alta e baixa pressão são estimados neste estudo em 91.48% e 87.99%, respectivamente. As bombas de alimentação de água e do condensador apresentaram uma eficiência de 90.59% e 78.60%, respectivamente.

Siqueira (2016), em seu estudo, apresentou a análise energética e exerética da usina nuclear de Angra 2 localizada na latitude 22°00' 25.0" S e longitude 44°27' 31.1" W, que opera com reator PWR,

rendimentos do ciclo e dos componentes que constituem o sistema. Os resultados encontrados pela autora sobre a eficiência energética da central são apresentados abaixo.

Tabela 1 - Eficiência energética dos equipamentos de Angra 2

Equipamento	Eficiência Energética
Gerador de Vapor	99.9%
Turbina de Alta Pressão (TAP)	99.8%
Reaquecedor	99.9%
Turbina de Baixa Pressão (TBP)	79.8%
Condensador	100%
Bomba do Condensador (BB)	89.9%
1º Aquecedor de Baixa Pressão (AB1)	100%
2º Aquecedor de Baixa Pressão (AB2)	99.6%
3º Aquecedor de Baixa Pressão (AB3)	99%
4º Aquecedor de Baixa Pressão (AB4)	99.8%
5º Aquecedor de Baixa Pressão (AB5)	99.9%
6º Aquecedor de Baixa Pressão (AB6)	100%
Desaerador	100%
Bomba de Alta Pressão (BA)	87.5%
1º Aquecedor de Alta Pressão (AA1)	99.8%
2º Aquecedor de Alta Pressão (AA1)	99.5%
3º Aquecedor de Alta Pressão (AA3)	94.6%
Ciclo	34.2%

3. METODOLOGIA

3.1 Análise energética

A análise da eficiência energética é um estudo termodinâmico que pode auxiliar na melhoria, nesse caso, da eficiência de uma usina nuclear com reator BWR. Esta melhoria é feita a partir de estudos investigativos sobre as características termodinâmicas e o desempenho da central como um todo, incluindo os equipamentos que a constituem. Se baseando na Primeira Lei da Termodinâmica (PLT), a análise energética é fundamentada no princípio da conservação de energia que nos diz que nenhuma energia é criada ou destruída, ela apenas pode

ser transformada de uma forma para outra, ou ser transferida entre sistemas (ÇENGEL; BOLES, 2013). A PLT correlaciona as variações de energia interna, potencial, cinética, térmica e trabalho no volume de controle. Considerando que as variações de energia potencial e energia cinética são desprezáveis em relação ao termo entalpia e em regime permanente, a PLT pode ser expressa pela Equação 1:

$$\sum \dot{Q}_{vc} - \sum \dot{W}_{vc} + \sum_{i=e=1}^n (\dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e) + \sum_{i=e=1}^n m g (z_i - z_e) + \sum_{i=e=1}^n m \left(\frac{V_i^2 - V_e^2}{2} \right) = 0$$

onde;

$$\sum_{i=e=1}^n m g (z_i - z_e) \equiv 0 \quad e \quad \sum_{i=e=1}^n m \left(\frac{V_i^2 - V_e^2}{2} \right) \equiv 0$$

logo,

$$\sum \dot{Q}_{vc} - \sum \dot{W}_{vc} + \sum_{i=e=1}^n (\dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e) = 0 \quad (1)$$

Assim, temos que a taxa de transferência de calor menos a taxa de trabalho ou potência é igual a variação de energia interna no volume de controle.

A eficiência energética de um sistema pode ser dada como uma comparação entre o desempenho sob dadas circunstâncias reais e o desempenho que ela teria em um processo ideal (reversível). Em geral, esta eficiência energética também pode ser definida como a razão entre o produto energético obtido pela energia disponibilizada para obter este produto. Segundo Siqueira (2016), as centrais termoneucleares utilizam o ciclo de Rankine e sua eficiência pode ser calculada por meio da Equação 2:

$$\eta_{ciclo} = \frac{W_{ciclo}}{Q_{in}} \quad (2)$$

onde,

W_{ciclo} - Potência líquida total produzida no ciclo (W)

$$W_{ciclo} = Q_{in} - Q_{out}$$

Q_{in} - Calor fornecido ao ciclo (W)

$$Q_{in} = h_{it} - h_{eb}$$

Q_{out} - Calor retirado do ciclo (W)

$$Q_{out} = h_{et} - h_{ib}$$

Sendo:

h_{it} - Entalpia específica na entrada da turbina (kJ/kg);

h_{et} - Entalpia específica na saída da turbina (kJ/kg);

h_{ib} - Entalpia específica na entrada da bomba (kJ/kg);

h_{eb} - Entalpia específica na saída da bomba (kJ/kg) .

Neste trabalho considerou-se o condensador como um equipamento dissipativo, dessa forma, não foi calculada a eficiência do mesmo.

3.1.1 Bombas

A eficiência energética das bombas, segundo a Primeira Lei da Termodinâmica, e em condições adiabáticas, pode ser expressa segundo a Equação 3:

$$\eta_b = \frac{\dot{W}_{ideal}}{\dot{W}_{real}} = \frac{\dot{m} (h_i - h_{es})}{\dot{m} (h_i - h_e)} \quad (3)$$

Sendo:

h_i - Entalpia específica de entrada (kJ/kg);

h_e - Entalpia específica de saída (kJ/kg);

h_{es} - Entalpia isentrópica específica de saída (kJ/kg).

3.1.2 Turbinas

Nas turbinas, o cálculo da eficiência energética é feito comparando a potência real com a potência ideal nos equipamentos. Apresenta-se assim a Equação 4:

$$\eta_t = \frac{\dot{W}_{real}}{\dot{W}_{ideal}} = \frac{\dot{m}(h_i - h_e)}{\dot{m}(h_i - h_{es})} \quad (4)$$

Sendo:

h_i - Entalpia específica de entrada (kJ/kg);

h_e - Entalpia específica de saída (kJ/kg);

h_{es} - Entalpia isentrópica específica de saída (kJ/kg).

3.1.3 Trocador de calor

Pela Primeira Lei da Termodinâmica apresentada, a eficiência bruta dos trocadores de calor pode ser expressa pela Equação (5):

$$\eta = \frac{E_{Fluxo\ Aquecido}}{E_{Fluxo\ Aquecedor}} \quad (5)$$

3.2 Central nuclear de Lasalle

A central nuclear de LaSalle (LaSalle County Nuclear Generating Station) fica localizada na cidade Marseilles, Illinois. O funcionamento total começou no início da década de 80 e opera com duas unidades que, juntas, possuem capacidade de geração de 2320 MW, que abastecem cerca de 2,3 milhões de casas com energia elétrica. As duas unidades da central nuclear de LaSalle operam com reatores do tipo BWR, desenvolvidos pela General Electric e são operadas pela Exelon Generation.

O fluxo de água que entra no recipiente do reator como líquido comprimido, com uma pressão de 7308 kPa, é circulado no núcleo por meio de dois circuitos de recirculação. Em um destes circuitos existe uma etapa em que ocorre uma limpeza que desmineraliza a água e este fluxo de água volta a se misturar com a alimentação principal que vem da estação 1. Passando pelo reator, o líquido comprimido, transformado em vapor sobreaquecido, sai do recipiente do reator como vapor saturado de alta qualidade por meio da estação 8 com uma pressão de 6653 kPa. Este vapor será enviado para a turbina de alta pressão onde será expandido até atingir a pressão de 1138 kPa. O fluido então entra em um separador de umidade e flui com sentido às turbinas de baixa pressão. Atravessado por estes percursos a energia fornecida pelas turbinas já foi transferida para os geradores e o fluxo de vapor é condensado e direcionado aos aquecedores onde ocorrerá o reaquecimento para reiniciar o processo novamente. O diagrama esquemático de uma usina da central nuclear de LaSalle com reator BWR é representado na Figura 1 abaixo.

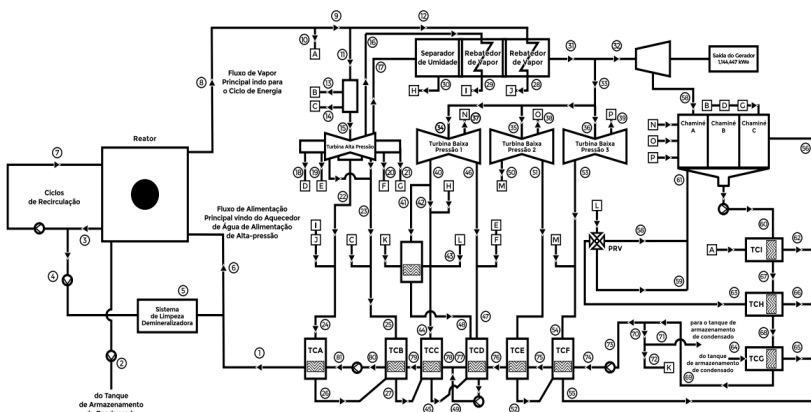


Figura 1 - Diagrama esquemático da estação nuclear LaSalle Country

Os dados termodinâmicos em cada ponto identificado no diagrama são apresentados na tabela abaixo. Os valores de entalpia e entropia foram definidos utilizando o programa SteamTable, do fornecedor Augsys Technologies Private Limited a partir dos estados e valores identificados no estudo de Dunbar, Moody e Lior (1995). A energia em megawatts de cada ponto foi definida utilizando o fluxo de massa (H_2O) e a entalpia.

Tabela 2 - Dados termodinâmicos e energia da Usina de LaSalle

Nº Estação	Fluxo de Massa (kg/h)	Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg-K)	Energia (MW)
1	6412584	7308	216	926,82	2,4715	1650,9100
8	6425971	6653	282	2776,97	5,8401	4956,8643
10	7031	6653	282	2776,97	5,8401	5,4236
15	6166982	6329	279	2780,85	5,8645	4763,7382
16	310270	4068	251	2800,56	6,0627	241,3694
17	5129398	1138	186	2783,06	6,5427	3965,3935
18	1322	1144	186	2782,59	6,5395	1,0218
19	1531	1144	186	2782,59	6,5395	1,1834
20	1531	1144	186	2782,59	6,5365	1,1834
21	1322	1144	186	2782,59	6,5395	1,0218
22	422745	2365	221	2801,33	6,2771	328,9576
23	298863	1144	186	2782,59	6,5395	231,0040
24	978491	2275	219	2800,76	6,2900	761,2538
25	304227	1103	184	2780,61	6,5525	234,9824
26	978513	2206	188	799,13	2,2152	217,2097
27	1282746	1069	163	688,86	1,9722	245,4536
30	684550	1124	185	784,05	2,1878	149,0892
31	4444961	1096	267	2977,36	6,9500	3676,1820
34	1562869	1082	267	2977,82	6,9566	1292,7636
35	1452809	1082	267	2977,82	6,9566	1201,7249
36	1349579	1082	267	2977,82	6,9566	1116,3358
37	1153014	7	39	2571,76	8,2746	823,6858
38	1153014	8	41	2575,33	8,2369	824,8305

Tabela 2 - Dados termodinâmicos e energia da Usina de LaSalle (continuação)

Nº Estação	Fluxo de Massa (kg/h)	Pressão (kPa)	Temperatura (°C)	Entalpia (kJ/kg)	Entropia (kJ/kg-K)	Energia (MW)
39	1153014	9	43	2578,89	8,1999	825,9727
40	131747	648	214	2878,86	6,9927	105,3558
44	804712	620	160	2757,43	6,7491	616,3715
45	2087459	607	145	610,16	1,7907	353,7991
46	278109	393	164	2784,51	7,0121	215,1100
50	43795	63	87	2654,62	7,5170	32,2942
51	256001	117	105	2683,90	7,3114	190,8561
52	256001	110	72	301,46	0,9793	21,4372
53	196566	32	71	2627,92	7,7477	143,4890
54	240360	31	70	2626,14	7,7571	175,3386
55	496361	30	52	217,71	0,7296	30,0176
61	4060271	483	43	180,50	0,6121	203,5724
62	7031	28	52	217,71	0,7296	0,4252
63	3266	276	133	2726,18	7,0320	2,4735
64	4303	34	443	3368,99	9,1729	4,0269
65	4303	28	54	226,07	0,7552	0,2702
66	3266	28	52	217,71	0,7296	0,1975
67	4060271	448	44	184,64	0,6253	208,2496
68	4060271	414	45	188,79	0,6385	212,9282
69	4060271	379	46	192,94	0,6516	217,6060
73	4032551	345	46	192,91	0,6516	216,0872
74	4032511	1207	46	193,66	0,6512	216,9266
75	4032511	1172	67	281,3963	0,9176	315,2038
76	4032511	1138	101	424,0927	1,3175	475,0440
78	6412726	1103	139	585,3982	1,7281	1042,7773
79	6412726	1069	157	662,842	1,9121	1180,7289
80	6412726	1020	181	767,6071	2,1492	1367,3483
81	6412726	7584	182	775,3135	2,1499	1381,0758

O estudo da eficiência energética, a fim de aumentar a eficiência global na produção de energia elétrica, é realizado em uma determinada planta, analisando os pontos onde há mais perdas, para assim pensar nas melhorias. Estes estudos são aplicados a equipamentos, sistemas e, até mesmo, à planta de usinas nucleares. Os balanços energéticos referentes ao reator nuclear não serão apresentados nesse artigo, visto que envolve física nuclear, assunto não abordado.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A tabela abaixo mostra a eficiência global do ciclo da usina analisada neste trabalho e de alguns importantes equipamentos presentes na planta. Os cálculos foram feitos a partir das equações apresentadas na metodologia.

Tabela 3 - Eficiência energética dos equipamentos de LaSalle

Equipamento	Eficiência Energética
Turbina de Alta Pressão	95%
Separador de Umidade	96.5%
Turbina de Baixa Pressão 1	88.5%
Turbina de Baixa Pressão 2	87.2%
Turbina de Baixa Pressão 3	86.8%
Bomba de Alta Pressão	95.6%
Bomba Condensador	99.1%
Aquecedor de Alta Pressão A	87.2%
Aquecedor de Alta Pressão B	98.74%
Aquecedor de Baixa pressão C	80.57%
Aquecedor de Baixa Pressão D	-
Aquecedor de Baixa Pressão E	98.11%
Aquecedor de Baixa Pressão F	83.45%
Aquecedor de Baixa Pressão G	100%*
Aquecedor de Baixa Pressão H	100%*
Aquecedor de Baixa Pressão I	99.85%
Ciclo	34.6%

Os resultados de eficiência energética encontrados para as bombas e turbinas na faixa dos 80-90% são semelhantes aos encontrados por Durmayaz e Yavuz (2001). O estudo de Siqueira (2016) apresentou valores bem próximos de 100% para as eficiências energéticas dos equipamentos, salvo alguns equipamentos como a turbina de baixa pressão, bombas de alta pressão e a bomba do condensador. Apesar de alguns equipamentos do presente estudo também apresentarem valores próximos de 100%, pode-se considerar que os resultados foram satisfatórios.

Especificamente para a eficiência energética do ciclo, o valor obtido de 34,6% se encontra na faixa do que se esperava alcançar e comprovou-se que as centrais nucleares com reatores de água fervente são mais eficientes que as que funcionam com reatores de água pressurizada, devido principalmente a simplificação da planta.

A análise a partir da Primeira Lei, sozinha, não pode ser usada para identificar áreas prospectivas para melhorar a eficiência da produção de energia elétrica. Ela é necessária, principalmente, para fins de contabilidade (para a modelagem tradicional e design de processos e plantas). A análise a partir da Segunda Lei serve para identificar as verdadeiras ineficiências da geração de energia que ocorrem em toda a central. Para uma melhor compreensão seria necessário realizar uma análise exergética.

5. CONCLUSÃO

A análise energética da planta da Central Nuclear de LaSalle mostrou uma eficiência energética do ciclo e dos equipamentos com valores semelhantes aos encontrados por Diana Siqueira (2016). O resultado mostra que esta central nuclear, assim como outras centrais que funcionam com reatores de água fervente, tem uma eficiência do ciclo próximo de 35%. As bibliografias estudadas mostraram que as usinas nucleares BWR apresentam uma maior eficiência, porém, neste projeto, verificou-se que as BWR são, em variação percentual, apenas 1% mais eficientes que as PWR. Os resultados se tornam satisfatórios quando temos que os dados obtidos para este projeto são de 1995 e, devido a isto, não passou pelas melhorias estruturais e operacionais que a usina nuclear de Angra 2 passou ao longo do tempo. Além de que estas centrais trabalham com geração de mais de 1000 MW; logo, esta diferença torna-se significativa.

Apesar da maior eficiência e menores custos, as usinas nucleares de água fervente não são as mais presentes do globo devido, principalmente, à segurança associada a esta. O desastre natural que

gerou problemas para as centrais de Fukushima no Japão, e suas consequências, fizeram com que ocorresse um estudo sobre as possíveis melhorias na planta a fim de se evitar acidentes futuros, elevando o custo deste tipo de reator. Há quem diga que os operadores da central nuclear de Fukushima teriam mais chances de controlar o acidente se fossem usinas nucleares com reatores PWR.

As usinas de energia nuclear que empregam o reator de água fervente para geração de vapor são, aproximadamente, 14-24% menos eficientes do que as centrais de combustíveis fósseis (DUNBAR, MOODY, LIOR, 1995). Sendo assim, esta análise energética, em conjunto com uma análise exergética, é de extrema importância para determinar pontos onde podem ocorrer ajustes/melhorias na planta, de modo que aumente a eficiência das usinas nucleares para níveis que se aproximam das centrais elétricas de combustíveis fósseis, tornando-as mais competitiva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BRENNEN, C. E. An Introduction to Nuclear Power Generation. Pasadena: Dankat Publishing Company, p. 177, 2005.

ÇENGEL, Y. A. e BOLES, M. A. Thermodynamics, An Engineering Approach. 5th Edition. Nova Iorque, p. 963, 2005.

CLPGroup. Commonly Used Nuclear Reactors. Disponível em: <https://www.clpgroup.com/NuclearEnergy/Eng/power/power4_1_1.aspx>. Acesso em: 02 de maio de 2017.

DUNBAR, W. R.; MOODY, S. D. e LIOR, N. Exergy Analysis of an Operating Boiling Water Reactor Nuclear Power Station. Energy Conversion, v. 36, n. 3, p. 149-159, 1995.

DURMAYAZ, A. e YAVUZ, H. Exergy Analysis of a pressurized-water reactor nuclear-powerplant. Applied Energy, v. 69, p. 39-57, 2001

EIA. International Energy Outlook 2016. U.S. Department of Energy. Washington, p. 290, maio de 2016.

Eletronuclear. Panorama da Energia Nuclear no Mundo. Brasil, p. 207, edição de 2016.

Eletronuclear. Energia Nuclear: Como funciona uma usina nuclear? Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/SaibaMais/Espa%C3%A7oConhecimento/Pesquisaescolar/EnergiaNuclear.aspx>>. Acesso em: 29 de março de 2017a.

Eletronuclear. Esclarecimentos sobre as diferenças entre as usinas do tipo PWR, existentes no Brasil, e as BWR, de Fukushima Daiichi, no Japão. Disponível em: <<http://www.eletronuclear.gov.br/Not%C3%ADcias/NoticiaDetalhes.aspx?NoticialID=321>>. Acesso em: 15 de abril de 2017b.

GEH. Advantages of Boiling Water Reactors (BWR). GE Hitachi Nuclear Energy. Califórnia, p. 2, 2010.

GOLDEMBERG, J. O futuro da energia nuclear. REVISTA USP, São Paulo, n.91, p. 6-15, setembro/novembro 2011.

IAEA. Nuclear Power Reactors in the World. International Atomic Energy Agency. Series No2. Viena, p. 86, 2016.

IEA. Key World Energy Statistics. International Energy Agency. Paris, p. 80, 2016.

PERUZZO, J. Fundamentos da ENERGIA NUCLEAR. Irani-SC, p.485, 2012.

RAGHEB, M. Nuclear Reactors Concepts and Thermodynamic Cycles. Capítulo 1, p.45, 2017.

ROSEN, M. A. e SCOTT, D. S. Energy and Exergy Analyses of a Nuclear Steam Power Plant. Canadian Nuclear Society. 7th Annual Conference, Toronto, Canadá, p. 187-196. 9-10 June 1986.

SCHNEIDER, M.; FROGGATT, A.; HAZEMANN, J.; KATSUTA, T.; ROMANA, M.V. e THOMAS, S. The World Nuclear industry - Status Report 2015. MYCLE SCHNEIDER CONSULTING PROJECT. Paris, London, p. 202. 2015.

SCHREIBER, R. Boiling Water Reactors BWRs. In: KOK, K. D. Nuclear Engineering Handbook. Boca Raton: Taylor & Francis Group. Cap. 3, p. 790, 2009.

SIQUEIRA, D. S. Análise Energética e Exergética de uma Usina Nuclear com Reator PWR. Dissertação (Mestrado em Conversão de Energia) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 132p, 2016.

WNA. Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources. WNA Report. Londres, p. 12, julho de 2011.

WNA. Nuclear Power in the World Today. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/information-library/current-and-future-generation/nuclear-power-in-the-world-today.aspx>>. Acesso em: 02 de maio de 2017a.

WNA. Nuclear Power Reactors. Disponível em: <<http://www.world-nuclear.org/information-library/nuclear-fuel-cycle/nuclear-power-reactors/nuclear-power-reactors.aspx>>. Acesso em 28 de abril de 2017b.

AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS SOCIOAMBIENTAIS GERADOS NA IMPLANTAÇÃO DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS E USINAS HIDRELÉTRICAS DE MÉDIO PORTE

Luiz Antonio Perrone Ferreira de Brito¹
Stefano Bueno da Costa¹

¹Universidade de Taubaté

DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i1.480>

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo avaliar o impacto social e ambiental devido à instalação de PCHs e UHE em pequenos municípios, localizada na Região Metropolitana do Vale do Paraíba (RMVALE) no Estado de São Paulo. A pesquisa utiliza um método comparativo de dados relacionados ao desenvolvimento humano, impostos sobre serviços de qualquer natureza, compensação financeira e o produto interno bruto dos municípios, que são disponibilizados de forma on-line pelos órgãos oficiais. Observou-se o aumento das contribuições socioeconômicas com maior expressividade no período das obras, verificou-se também que para o desenvolvimento local a compensação financeira é extremamente importante, uma vez que, este recurso é geralmente aplicado na sociedade, no entanto, pequenas centrais hidrelétricas estão isentas de pagamento e prejudicam estados e municípios. Mas para o socioambiental, ambos os tipos de empreendimentos hidrelétricos causam impactos ambientais, extraem seus recursos hídricos e deixam de possuir outras possíveis atratividades para economia local.

Palavras-chave: Hidroeletricidade, Desenvolvimento Sustentável, Desenvolvimento Regional.

ABSTRACT

This work aims to evaluate the social and environmental impact after the construction of three hydroelectric plants, located in the Metropolitan Region of Valley do Paraíba (RMVALE). The research uses a comparative method of data related to human development, taxes on services of any nature, financial compensation and gross domestic product of municipalities, which are made available on-line by official bodies. It was observed the increase in socioeconomic contributions with greater expressiveness in the period of the works, it was also verified that for the local development the financial compensation is extremely important, since, this resource is generally applied in the society, however, small hydroelectric plants are exempt of payment and they damage states and municipalities. But for the socio-environmental, both types of hydroelectric projects cause environmental impacts, extract their water resources, and also do not have other possible attractiveness to the local economy.

Keywords: Hydroelectricity, Sustainable Development, Regional Development.

1. INTRODUÇÃO

A energia tem contribuição histórica na humanidade. Desde a revolução industrial os países vêm travando a competitividade econômica no cenário mundial. Existem crescentes preocupações com a questão ambiental em um mercado global que se mostra cada vez mais decisivo (TOLMASQUIM; GUERREIRO; GORINI, 2007). Segundo Fonseca (2013), a geração de energia em um país é condição básica para promover desenvolvimento econômico e tecnológico, onde é o elemento fundamental para estabelecimento da política industrial. Segundo Reis e Santos (2015), a energia elétrica é fundamental para o desenvolvimento contribuindo para o crescimento econômico, reduzindo a desigualdade social e pobreza, sendo relevante para o desenvolvimento sustentável.

Conforme Fontes, Xavier e Guimarães (2010), o Brasil, durante muito tempo, optou pelas usinas hidrelétricas (UHE) de grande porte em detrimento às pequenas centrais hidrelétricas (PCH) para produção de energia em virtude da necessidade, à época, de se construir enormes reservatórios de água. Para Nilton (2009) o desenvolvimento econômico e social do país necessita de uma reavaliação das construções e instalações das grandes e médias centrais hidrelétricas devido a questão da sustentabilidade, mas ao mesmo tempo, a infraestrutura com base nas hidrelétricas contribui para o desenvolvimento econômico em nível federal e regional. O principal objetivo é garantir o abastecimento

de energia no país, mas os estados são beneficiados pelo uso da água dos rios e também os municípios que abrigam estes empreendimentos e que possuem área alagadas recebem a compensação financeira que geralmente é aplicada na segurança, educação, saúde e outros setores (ANEEL, 2007). Segundo a ANEEL (2018), os estados e municípios recebem a compensação financeira de acordo com as atuais alterações da Lei nº 13.360/2016, sendo 6,25% para os Estados, 45% para os Municípios, 4% para o Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, 3% para o Ministério de Meio Ambiente, 3% ao Ministério de Minas e Energia e o restante destinado à Agência Nacional de Águas.

Segundo Figueiredo (2012), o cenário hidrográfico brasileiro merece destaque pela sua grande capacidade de recursos, cerca 178 mil m³/s, que se somado aos 73 mil m³/s da região Amazônia Internacional, representa 53% da capacidade de produção de água do continente sul americano e 12% do globo. Entretanto, existem problemas de regiões com altíssima densidade demográfica com baixo recurso hídrico e outras com baixa densidade demográfica com enormes recursos e farturas hídricas. Essa situação demanda uma grande quantidade de linhas de distribuição além de um sistema de gestão energética complexo (ONS, 2017).

O recurso da água possibilita a sobrevivência humana, a higiene. Com o aumento do crescimento econômico e produtivo do país, para que todas as atividades possam desempenhar seu papel, é necessária uma boa gestão da água e dos recursos hídricos (BRASIL, 2006. p. 18). Segundo Araújo, Moura e Silva (2012), existem estudos a respeito da forte tendência para a possibilidade de falta de recursos hídricos para o futuro que poderá atingir toda uma sociedade. Os motivos atrelados a essa situação são os desperdícios exagerados da população, mudanças climáticas, crise energética, perdas no processo de distribuição de energia, crescimento demográfico, poluição, má gestão dos recursos hídricos, além do uso abusivo da agropecuária e indústrias.

O estado de São Paulo é a região brasileira que detém uma contribuição no crescimento e desenvolvimento econômico do país e é altamente beneficiada pelos seus recursos hídricos (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2017). No Estado de São Paulo, assim como em várias partes do Brasil, a situação de má distribuição de recursos hídricos se repete com o agravante da poluição das águas de grandes mananciais, o que demanda investimentos financeiros de grande porte, que geram impactos ambientais e sociais, como sistemas de transposição entre bacias (FIGUEIREDO, 2012). Essa situação exige uma consciência energética para que não haja falta de recursos já que existem fatores imponderáveis como os climáticos, mas também existem os previsíveis como os já citados (SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE

DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2011). A capacidade instalada do estado em 2015 era de 22.3334 MW, que corresponde no cenário brasileiro 16,7 % de todo sistema nacional com sua matriz energética distribuída em hidroelétricas com 14.783 MW; sendo: 51 Usinas Hidroelétricas (UHE), 48 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH), 28 Centrais de Geração Hidrelétrica (CGH). As termelétricas detêm capacidade 7.459,3 MW; sendo: 210 movidas a biomassa e 369 a combustível fóssil; possui também 40 usinas fotovoltaicas totalizando 1,3 MW e capacidade eólica de 0,002 MW (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2017). Considera-se uma UHE a usina com capacidade de geração superior a 30 MW e PCH usinas com capacidade de geração de 1 a 30 MW (BURANI et al., 2004). As bacias hidrográficas do Estado de São Paulo são divididas em 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI), para questões de planejamento e gestão dos mesmos.

Segundo Rebouças et al. (2002), a bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul, ilustrada na Figura 1, foi a grande precursora para evolução das estruturas estaduais de gerenciamento de recursos hídricos para o país e colabora para o desenvolvimento Região Metropolitana do Vale do Paraíba com uma disponibilidade de total vazão de 93 m³/s onde a demanda total gira em torno de 10 m³/s (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2017). Esta encontra-se atualmente descaracterizada em virtude de diversos motivos como devastações de ordem ambiental, aumento populacional e industrial, construção de barragens, transposição de suas águas pela Light Energia S/A para abastecimento da baixada fluminense e controle da vazão em seu curso médio e superior, portanto, cada um desses fatores caracteriza impactos localizados em virtude das ações do homem (ARAÚJO; MOURA; SILVA, 2012).

O Ministério Público Estadual tem feito exigências de estudos de licenciamento das usinas hidroelétricas devido a vários problemas de ordem ambiental e social ocasionados pelos empreendimentos na bacia hidrográfica do rio Paraíba do Sul. Ainda afirma que existem inúmeros efeitos que as usinas hidrelétricas proporcionam a respeito dos conflitos de usos dos recursos naturais nos setores da própria economia regional, de um modo geral, relacionados à mineração, ocupação de encostas e nascentes, atividades agropecuárias, desmatamentos em áreas protegidas, efluentes não tratados de indústrias e áreas urbanas (AGEVAP, 2014).

Segundo Sousa (2000), existem impactos ambientais físicos e biológicos gerados pela implantação de UHEs além de grandes entraves de infraestrutura econômica e ambiental decorrentes do licenciamento gerados por questões jurídicas, e nesse caso, aumentando o preço de novas contratações em leilões de energia de fonte térmica. Desta forma coloca-se a dicotomia de interesses entre a necessidade energética do

país para sustentar o desenvolvimento e preservação das condições sociais e ambientais da população. As PCHs são uma alternativa para os grandes investimentos de elevado impacto social e ambiental. Possuem também um período de licenciamento ambiental inferior as UHEs pois o instrumento utilizado é o Relatório Ambiental Preliminar (RAP), menos que complexo que o Estudo de Impacto Ambiental (EIA) necessário para as UHEs (BRASIL, 2017).

Na Figura 1 é possível observar a área de abrangência da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul no Estado de São Paulo (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2017).

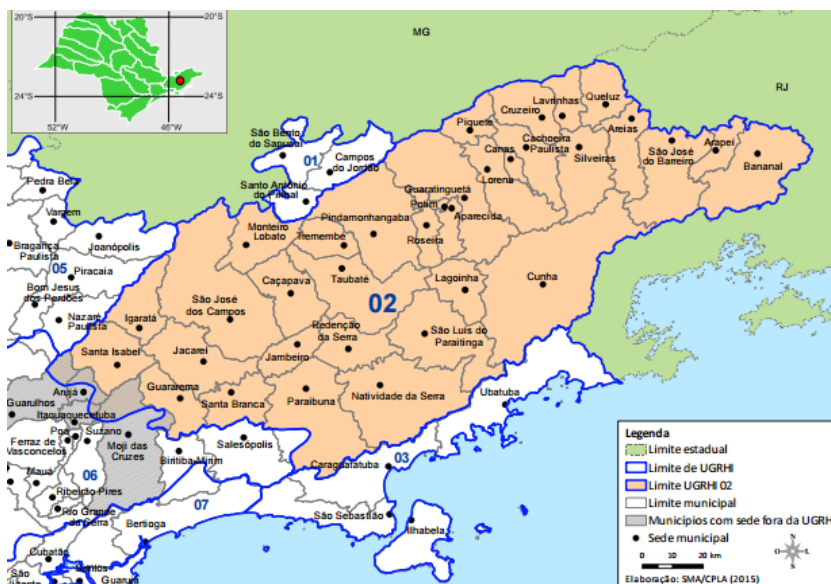


Figura 1 - Área de abrangência da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul no Estado de São Paulo

Em virtude de deter um enorme potencial hídrico, o Brasil sempre direcionou de maneira significativa atenção na construção de reservatórios de água para geração de energia elétrica, as UHE. Entretanto, a construção de grandes reservatórios e utilização das barragens costumam provocar impactos ambientais nas alterações nos cursos hídricos. A geração destes impactos ocorre à montante e à jusante do barramento, podendo afetar áreas em toda região (SOUZA JÚNIOR, 2015).

Segundo Arruda (2014), existem diversos impactos causados pela construção de represas, nos quais, geram situações positivas e negativas à população de maneira em geral, ou seja, relacionados aos aspectos ambientais, aspectos econômicos e aspectos sociais. Como aspectos positivos têm a harmonia paisagística pela presença do lago, disponibilidade de água reservada para o abastecimento e irrigação, produção de energia (hidroeletricidade), geração de emprego, criação de oportunidades de recreação e turismo, aumento da possibilidade de pesca e aquicultura, regularização de vazões e controle de enchente, possibilidade de novas atividades econômicas. Como aspectos negativos têm a perda de biodiversidade aquática e terrestre, a transformação abrupta de um ambiente lótico (ambiente relativo a águas continentais moventes, com tempo de residência inferior a 2 dias) para um lêntico (ambiente que se refere à água parada, com movimento lento ou estagnado, com tempo de residência superior a 40 dias) e desequilíbrios na estrutura físico-química e biológica do meio aquático, redução do oxigênio no fundo do reservatório e nas vazões liberadas redução da temperatura e do material em suspensão nas vazões liberadas e retenção de sedimento carregado, necessidade de compensação de propriedades e madeira, prejuízo a agricultura familiar, perda de valores estéticos e perda de patrimônio cultural, remoção de famílias e em certos casos de cidades inteiras.

As Pequenas Centrais Hidroelétricas (PCHs) têm contribuição histórica no cenário energético brasileiro desde final do séc. XIX, mas somente em 1988, através da portaria nº 109, do Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE estes empreendimentos ficaram oficializados sob caracterização de operação a fio d'água com máxima altura de 10 metros em barragens e vertedouros, com potência total instalada de até 10,0 MW (FARIA; KNISS; MACCARI, 2012). As Pequenas Centrais Hidrelétricas detêm um grande potencial de expansão no país na contribuição da matriz energética brasileira, inclusive, com grandes capacidades de atendimento a regiões menos privilegiadas e consideradas isoladas, sem contar que diminuem as perdas de transmissão no SIN – Sistema Interligado Nacional (SANTANA, 2016). Segundo Nilton (2009) as PCHs também possuem a vantagem da geração de energia descentralizada, próxima aos centros de carga, o que reduz as perdas e custos de transmissão.

Desta forma o objetivo desse trabalho é avaliar o impacto social e ambiental devido à instalação de PCHs e UHE em pequenos municípios, localizada na Região Metropolitana do Vale do Paraíba (RMVALE) no Estado de São Paulo.

2. MÉTODO

O método empregado neste estudo é uma pesquisa documental direta sobre a influência de hidrelétricas de pequeno e médio porte no desenvolvimento local, nas cidades de Lavrinhas, Queluz e Santa Branca na Região Metropolitana do Vale do Paraíba no Estado de São Paulo, sendo esta a delimitação do trabalho.

Conforme dados do IBGE (2017), atualmente o município de Santa Branca dispõe de uma população aproximada 13.763 habitantes, com abrangência de área 272.238 km². Está situada no Alto Vale do Paraíba, Estado de São Paulo, a aproximadamente 79 km da capital paulista, possui uma economia bastante diversificada, com destaque ao setor industrial e agropecuário (ÂNTICO e LEAL, 2016). A UHE possui capacidade de geração de 56 MW.

O município de Lavrinhas dispõe de uma população aproximada 6.590 habitantes, com abrangência de área 167.067 km² (IBGE, 2017). As principais atividades econômicas do município são a indústria e o turismo. A PCH Lavrinhas detém uma capacidade instalada de 30 MW, com energia firme de 23MW e possui uma área de drenagem que opera a fio d'água com um reservatório 0,76 km² (BORGES; MEIRA, 2009).

O município de Queluz dispõe de uma população aproximada 11.309 habitantes, com abrangência de área 249.399 km². As principais atividades econômicas são ligadas à pecuária, à agricultura e o comércio, tendo o milho e o feijão como marco cultural e na pecuária a criação de gado e a avicultura. No local o comércio detém pouca diversificação de setores, já as indústrias estão vinculadas aos setores de laticínios, química e mineração de quartzo (IBGE, 2017). A PCH de Queluz detém uma capacidade instalada de 30 MW, com energia firme de 23,07 MW e possui uma área de drenagem que opera a fio d'água com um reservatório 1,27 km² (BORGES; MEIRA, 2009).

Foram feitos levantamentos a partir da base de dados online nos órgãos oficiais. Buscou-se dar suporte para tal embasamento destes procedimentos técnicos por intermédio também das pesquisas com delineamento bibliográfico e assim chamadas fontes secundárias. Algumas informações de caráter documental foram feitas de forma presencial como Cartórios de Registro de Imóveis dos municípios e nas Prefeituras locais, bem como o acesso de dados de fonte primária na CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo, nos processos dos empreendimentos (SMA 13641 / 2002; SMA 13641 / 2002 e SMA 1.348 / 1994) no que se diz respeito aos dados de fatores sociais, econômicos e ambientais que estão contidos no processo de licenciamento ambiental das usinas.

Para as questões econômicas foram coletadas amostras disponibilizadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, como o Produto Interno Bruto dos Municípios, disponibilizados pelas prefeituras locais. Para questão social foram coletados através do IBGE e PNUD os dados do IDH – Índice de Desenvolvimento Humano, dados estes com foco na saúde e educação. Por fim, fez-se um levantamento do número de empresas abertas no município e números de empregos com carteira assinadas, bem como do número de pessoas ocupadas por setor.

A interpretação dos dados socioeconômicos e ambientais dos municípios de Lavrinhas, Queluz e Santa Branca, foram comparados com dados expressos em forma de gráficos, tabelas e ilustrações de forma qualitativa extraídas de órgãos públicos referentes aos dados socioeconômicos e ambientais, também foram enviados solicitações de informações por e-mail.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Usina Hidrelétrica de Santa Branca, a geração de energia é controlada pela antiga The Rio de Janeiro Tramway, Light and Power Limited, atualmente chamada de Light Energia S/A, pertencente ao Grupo Light S/A. Em 1971, foi assinado um acordo de convênio com participação da União, os governos dos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, e o então grupo LIGHT Serviços de Eletricidade S/A para a construção do reservatório do Alto Paraíba do Sul na cidade de Santa Branca, cujo objetivo era o controle da vazão dessa bacia hidrográfica, importante para o abastecimento do Rio de Janeiro (BITTENCOURT, 2008).

Segundo o CEIVAP (2007), a UHE de Santa Branca apresenta impactos ao meio ambiente e socioeconômicos. Os impactos negativos no meio ambiente são o escorregamento de encostas marginais, mineração de pedra, solo areia para construção do empreendimento, desaparecimento de importantes habitats, perda de áreas úmidas destinadas a agricultura, principalmente a familiar, prejuízos aos ecossistemas aquáticos com a transformação do ambiente lótico em lêntico e pelo barramento do rio, impedindo a migração de algumas espécies e inundação de remanescentes de matas nativas. Apesar dos impactos negativos listados não há nenhum programa de recuperação ambiental em operação, como o de ictiofauna com objetivo de preservação local e melhoria nas condições do reservatório (CEIVAP, 2007), mas por outro lado já implantou um reflorestamento de cerca de 103 ha (COSTA, 2018).

Sobre a sociedade pode-se listar como impactos negativos a redução da pecuária leiteira, interrupção de acessos rodoviários devido ao lago, interferência na infraestrutura de energia e de telecomu-

nicações, diminuição da população residente e perda de terras e atividades produtivas. Os impactos positivos seriam a promoção do uso múltiplo do reservatório, possibilitando atividades de abastecimento público, irrigação, navegação e pesca esportiva, turismo e lazer e aquicultura (CEIVAP, 2007). Nota-se que todos os impactos causados no meio ambiente no entorno do reservatório são irreversíveis.

Observa-se que os impactos causados pela construção de represas de grande porte, de um modo geral, são semelhantes aos impactos causados pela construção da UHE de Santa Branca. Em suma, se assemelham nos aspectos ambientais negativos quanto à perda de biodiversidade aquática e terrestre, nas alterações da qualidade e fluxo da água, ou seja, desaparecimento de importantes habitats, além de prejuízos aos ecossistemas aquáticos com a transformação do ambiente lótico em lêntico, neste caso, em específico pelo barramento do rio Paraíba do Sul.

A responsável pela PCH de Lavrinhas é a usina paulista Lavrinhas de Energia S/A. Seus principais acionistas são ALUPAR e ENIXE, com capacidade de geração de 30 MW para abastecimento de uma cidade com aproximadamente de 75 mil habitantes (BORGES; MEIRA, 2009). Em Queluz a responsável pela PCH é a Queluz de Energia S/A, do grupo ALUPAR, com capacidade de geração de 30 MW também suficiente para abastecer uma cidade com aproximadamente 75 mil habitantes (HABTEC, 2002).

A análise do Relatório Ambiental Preliminar (RAP), segundo a HABTEC (2008), aponta os principais impactos relacionados ao meio ambiente e socioeconômicos. Os impactos ao meio ambiente positivos são o reflorestamento da mata nativa, já os negativos são a interferência em áreas de autorizações e concessões minerais do reservatório, início ou aceleração de processos erosivos, alterações na fauna aquática a montante da barragem e comprometimento de rotas migratórias. Os impactos socioeconômicos positivos são a criação de expectativas para novos negócios, alteração na renda regional e nas arrecadações municipais, alteração no mercado de trabalho e aumento da oferta de energia para a região e uma nova infraestrutura viária. Os impactos socioeconômicos negativos são a intensificação do tráfego, necessidade de compensação de propriedades devido a desapropriações de terras, perda de recursos hídricos, perda de valores estéticos, perda de patrimônio cultural (HABTEC, 2008).

Os RAPs, apesar de não apresentarem nenhum impacto direto em termos de qualidade das águas, apresentam um programa de monitoramento limnológico e de qualidade da água, com a justificativa da possibilidade de alteração nas condições hidrológicas, podendo provocar sua deterioração (CEIVAP, 2009). Outro fator a se considerar é o impacto na ictiofauna, que é sempre avaliada de forma isolada, e não integrada, pois na bacia hidrográfica do Rio Paraíba do Sul, existe um

potencial de instalação de 117 empreendimentos hidroelétricos previstos, sendo 30 em operação (COSTA, 2018).

Os Índices de Desenvolvimento Humano e Renda (IDH) dos municípios apresentam similitudes nos indicadores e sensíveis melhoras em relação aos últimos recenseamentos demográficos, entre os anos de 2000 e 2010. Observa-se que o indicador que melhorou foi o da Educação, nos municípios de Lavrinhas, Queluz e Santa Branca (PNUD, IPEA, FJP; 2013). Pode se tomar por base de comparação o município de São José dos Campos que é o ponto de referência regional, pois ocupa a 24ª posição entre os 5.565 municípios brasileiros e é o mais desenvolvido da Região Metropolitana do Vale do Paraíba. Assim o IDH nas três cidades estudadas, obviamente são inferiores a base de comparação, mas apresentam uma semelhança quanto à evolução através dos anos (PNUD, IPEA, FJP; 2013), de modo que não podem ser relacionados unicamente a operação das PCHs e UH.

Nos municípios envolvidos foram executadas desapropriação de áreas que poderiam ser utilizadas por outras atividades produtivas e que geraram perdas socioeconômicas nas localidades. A Tabela 1 apresenta os números de desapropriação de imóveis e área para construção das PCHs e UHE obtidas nos Cartórios de Registros de Imóveis de Santa Branca; Queluz; Cruzeiro, (2017); CEIVAP (2009) e LIGHT ENERGIA S/A (2017).

Tabela 1 - Desapropriação de imóveis para construção das PCHs e UHE

Usinas	PCH Lavrinhas	PCH Queluz	UHE Santa Branca
Municípios	Lavrinhas	Queluz	Jambeiro, Paraibuna, Santa Branca, Jacaref
Quantidade de matrículas	19	21	82
Área em hectares por município	796 ha	316ha	2841 ha 725 ha ¹
Área de reservatório	1,27 km ²	0,76 km ²	28,41 km ²

1 - Apenas no Município de Santa Branca

A Usina Hidrelétrica de Santa Branca, segundo a LIGHT (2017), possui um reservatório com área na região de 2.841 ha, que envolvem os municípios de Santa Branca, Jambeiro, Paraibuna e Jacareí. Observa-se que no município de Santa Branca a área perdida corresponde 725 ha, ou seja, 725 campos de futebol. A atual LIGHT ENERGIA S/A foi a empresa responsável pelas 354 desapropriações situadas nos municípios de Jacareí, Jambeiro, Paraibuna e Santa Branca para construção do reservatório, no período do governo de Getúlio Vargas, via decreto nº 35.686, de 18 de Junho de 1954 conforme as informações do Cartório de Registros de Imóveis de Santa Branca (2017).

No município de Lavrinhas o total da área desapropriada pela proprietária da PCH, Lavrinhas Energia S/A é de 796 ha, conforme os processos de desapropriação das Fazendas Boa Vista, São Benedito, Remanso e boa parte da Estrada Velha M. Silveira (CARTÓRIO DE REGISTROS DE IMÓVEIS DE CRUZEIRO, 2017). No município de Queluz, por mais que a PCH utilize a própria calha do rio, só o espelho d'água do reservatório tem 76 ha de área perdida. O total de área desapropriada é de 316 ha (CARTÓRIO DE REGISTROS DE IMÓVEIS DE QUELUZ, 2017).

O que chama atenção é extensão de área desapropriada para a construção de uma PCH. O total desapropriado para a construção de duas PCHs foi de 1112 ha com capacidade instalada de 60 MW representando uma relação de 0,0540 MW/ha. Ao passo que para a construção da UHE foram desapropriados 725 ha no Município de Santa Branca para uma capacidade instalada de 56 MW, representando 0,0704 MW/ha, ou seja, as PCHs geraram uma perda de área 23,3% superior a UHE em relação a potência instalada. Ao considerar todos os municípios que perderam áreas para construção do lago, 2841 ha, a área desapropriada para a PCHs corresponde a cerca de 40% do total. Compara-se também a área desapropriada em Lavrinhas, onde não se esperava grande impactos com perdas de áreas (796 ha), com a de Santa Branca (725 ha). Esses são números inesperados que vão contra as previsões contidas na literatura e no processo de licenciamento ambiental. Nota-se que os empreendimentos, tanto de médio e quanto de pequeno porte, desapropriaram uma considerável área na Região Metropolitana do Vale do Paraíba Paulista, com objetivo da expansão de energia do sistema elétrico e segurança energética nacional.

A Figura 2 (IBGE, 2017) apresenta o gráfico com os dados do Produto Interno Bruto (PIB) dos três municípios, envolvendo uma economia diversificada, bem semelhante e detentora da parte setorial com comércio, serviços, turismo e os laticínios. No caso do município de Lavrinhas, nos anos de 2009 e 2010, houve um índice de crescimento relevante no PIB, período de obras das PCHs, pois o canteiro de obras de ambas estava localizado nesse município e ali recolhia seus

impostos. Pode-se notar que o município de Queluz apresenta um crescimento constante do PIB ligado às outras atividades econômicas da região. Observa-se após a construção das hidrelétricas de médio e pequeno porte, os indicadores referentes ao PIB tiveram melhoras no crescimento econômico, embora tenha havido, no decorrer desses anos, fatores de reajustes inflacionários. É possível notar algumas oscilações e uma maior expressividade no aumento do crescimento econômico no município de Santa Branca, na comparação dos três municípios envolvidos. Uns dos fatores que também podem contribuir para essa condição são os relacionados às condições regionais e federais que impactam a economia como um todo. Dados semelhantes foram obtidos no PIB de São José dos Campos, utilizados como base de comparação.

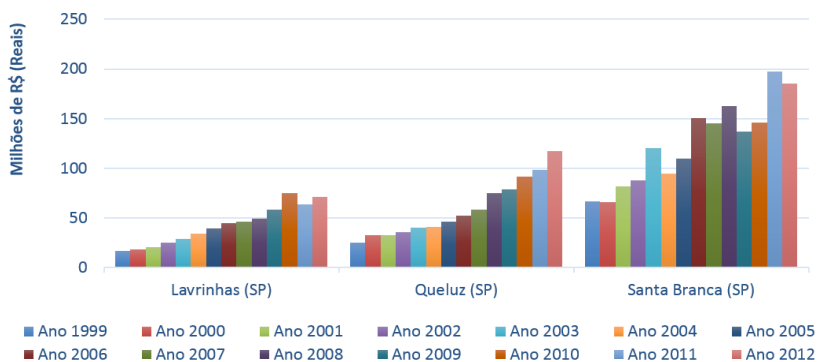


Figura 2 - Evolução do Produto Interno Bruto (PIB) dos municípios de Lavrinhas, Queluz e Santa Branca entre os anos de 1999 e 2012

A Tabela 2 (ANEEL, 2018) demonstra as arrecadações de compensações financeiras das PCHs e UHE nos municípios de Lavrinhas, Queluz e Santa Branca. Observa-se que as PCHs são isentas de compensação financeira. O município de Queluz recebe a contribuição referente à UHE do Funil, está fora da delimitação deste estudo (ANEEL, 2018).

Segundo a ANELL (2018), a compensação financeira pode ser aplicada em diversos setores para contribuição do desenvolvimento local e regional, na educação, saúde e segurança. Entretanto, observa-se que a falta de isonomia de critérios referente aos recursos hídricos e as políticas públicas de incentivos de isenção dadas as UHEs e PCHs, mesmo estas supostamente causando menores impactos ambientais, acaba prejudicando de certa forma o desenvolvimento local dos municípios. Segundo Borges e Meira (2009), as PCHs contribuem para segurança

energética e asseguram o crescimento econômico de um modo geral, porém deixam de contribuir com compensação financeira para o estado e municípios. É válido ressaltar, segundo visão de Candiani et al. (2013), que existem inúmeras vantagens que as pequenas centrais hidrelétricas representam na geração de energia elétrica, cuja fonte é eficiente e rápida: proporcionam descentralização, beneficiam os centros de carga e principalmente ocorre a diminuição de perdas nos processos de transmissão. Esses empreendimentos precisam de uma melhor atenção da sociedade, de um modo geral, assim como as grandes usinas hidrelétricas do ponto de vista ambiental.

Tabela 2 - Compensação Financeira – UHE e PCHs

Ano	PCHs		UHE	
	Queluz	Lavrinhas	Queluz	Santa Branca
2010	0	0	260.458,24	203.925,64
2011	0	0	240.681,32	172.533,04
2012	0	0	226.652,49	177.533,04
2013	0	0	235.913,51	139.464,09
2014	0	0	189.129,05	168.355,26
2015	0	0	116.263,22	76.841,49
2016	0	0	195.023,30	64.681,01
2017	0	0	172.360,82	97.789,10
Total (R\$)	0	0	1.636.481,95	1.101.122,67

Segundo a Queluz Energia S/A a PCH de Queluz possui 24 funcionários contratados diretos e 20 funcionários contratados indiretos. Já a de Lavrinhas, segundo a Lavrinhas Energia S/A, possui 26 funcionários contratados diretos e 20 funcionários contratados indiretos, totalizando nas duas localidades 90 empregos na região (COSTA, 2018). Conforme os dados referentes ao último censo (IBGE, 2017), observa-se que no município de Queluz existem 2003 empregos, de maneira que a PCH de Queluz, que conta com 44 funcionários diretos e indiretos, o representa apenas 2,19 % do pessoal com carteira de trabalho assinada na localidade. A mesma observação se faz para o município de Lavrinhas, onde o número de empregados é de 838 pessoas e a PCH de Lavrinhas, com 46 funcionários diretos e indiretos, representa cerca 5,48 % do pessoal registrado no município (COSTA 2018). A UHE pesquisada não forneceu os dados de quantidade de

funcionários diretos e indiretos.

4. CONCLUSÕES

Verificou-se nesta pesquisa que a implantação de uma UHE ou PCH não influi diretamente no PIB dos municípios analisados. Apenas o município de Santa Branca recebe uma compensação financeira devido à perda de área produtiva para construção do lago para a implantação da UHE o que prejudica as atividades econômicas locais. Neste caso a compensação financeira é de cerca de R\$ 8000,00 ao mês para o ano de 2017, o que não possibilita grandes expectativas. A área desapropriada para implantação das PCHs é 28,5% superior à da UHE, considerando o município de Santa Branca, apesar de não haver um lago, e mesmo assim não recebem compensação financeira por essa perda de áreas produtivas. Ainda importante ressaltar que a área desapropriada para a construção de uma PCH em Lavrinhas é superior a desapropriada para a UHE em Santa Branca. No caso específico das PCHs verificou-se uma pequena influência no PIB durante o período de implantação do empreendimento apenas devido aos serviços de apoio às obras.

A contribuição das PCHs com a empregabilidade local também é de pouca expressão para Lavrinhas e Queluz, ao contrário da expectativa gerada no processo de licenciamento ambiental, onde se esperava a criação de novos negócios, vagas no mercado de trabalho, melhoria da renda da população e elevação nas arrecadações municipais. Como consequência direta também não houve a melhora do IDH, seja devido a novos negócios, melhoria da oferta de empregos, e no caso da UHE devido à compensação financeira.

O incentivo de políticas públicas quanto à isenção de compensação financeira e baixa empregabilidade prejudicam o crescimento do PIB, pois extraem seus recursos hídricos e sua operação impede outras possíveis atividades e contribuições para economia local reduzindo assim a arrecadação de impostos municipais. Em nome da segurança energética e da expansão da oferta de energia para o sistema nacional, a economia local é prejudicada, e desta forma, caminha na contramão na questão de desenvolvimento sustentável.

A simplificação do licenciamento ambiental das PCHs não considera o efeito da instalação de sucessivos empreendimentos em uma mesma bacia e sim apenas do empreendimento em análise de forma isolada. No caso específico em estudo, como já observado, surpreendeu a área desapropriada para instalação das PCHs, o que poderia ser evitado, ou melhor compreendido, com a dita integração. Outro ponto a se observar é a alteração no regime de escoamento de águas em

sucessivas partes de uma mesma bacia hidrográfica.

De um modo geral, as PCHs e as UHEs necessitam uma melhor atenção da sociedade sob o aspecto do meio ambiente, em especial na questão da alteração da velocidade da correnteza, e dos desmoronamentos de encostas que trazem como consequência o assoreamento da calha.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. A compensação Financeira e seu município. 2007. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/documents/656835/14876406/cartilha_compensacao_financeira_2.pdf/f7f20b3b-829f-42df-a981-1e192418c7f4>. Acesso em 25/01/2018.

_____. Compensação Financeira. 2018. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/cmpf/gerencial/>> Acesso em 25/01/2018.

ANTICO, C.; LEAL, J. L. Região de Governo de São José dos Campos. Migração em São, 4. Textos Nepo, 26. UNICAMP, Núcleo de Estudos de População, 1993.

ARAÚJO, J. R. S.; MOURA, W. O. R.; SILVA, M. B. Avaliação Ambiental do Rio Paraíba do Sul: Trecho Funil - Santa Cecília. Rio de Janeiro: Instituto Estadual do Ambiente – INEA, 2012.

ARRUDA, N. M. B. Avaliação de Variáveis de Qualidade de Água dos reservatórios das Usinas Hidrelétricas de Foz do Areia, Segredo e Caixias, como Instrumento de Gestão de Bacias Hidrográficas. Tese (Doutorado). UFP, Curitiba. 2014.

ATLAS DE DESENVOLVIMENTO HUMANO NO BRASIL. 2013. Disponível: <<http://www.atlasbrasil.org.br/2013/>> Acessado: 15/12/2016.

BITTENCOURT, L. F. Análise sócio-ambiental de ocupação urbana da área de preservação permanente do Rio Paraíba do Sul no Município de Caçapava/SP. Dissertação Programa de pós-graduação em Ciências Ambientais Universidade de Taubaté. 2008.

BORGES, R. R.; MEIRA, R.L. Impactos socioambientais de Pequenas Centrais Hidrelétricas e Estudo de Caso PCH-Queluz-SP e Lavrinhas-SP no Rio Paraíba do Sul. Cadernos UniFOA, edição especial, 2009.

BRASIL. MMA – Ministério do Meio Ambiente. Caderno de Licenciamento Ambiental. Disponível: <http://www.mma.gov.br/estruturas/dai_pnc/_arquivos/pnc_caderno_licenciamento_ambiental_01_76.pdf> Acessado: 23/07/2017.

BURANI, G. F.; UDAETA, M. E. M.; FUJII, R. J.; GALVÃO, L. C. R. O Cenário dos Recursos Energéticos Distribuídos no Estado de São Paulo. São Paulo; GEPEA – USP, 2004.

_____. MMA – Ministério do Meio Ambiente. Caderno setorial de recursos hídricos: Geração de energia hidrelétrica. 2006. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/161/_publicacao/161_publicacao23022011031204.pdf> Acessado em: 10/11/2016.

CANDIANI, G.; PENTEADO, C. L. C.; CENDRETTI, E. C.; SANTOS, E. M.; BIONDI, A. E. C. Estudo de caso: aspectos socioambientais da pequena central hidrelétrica (PCH)-Queluz-SP, na bacia do rio Paraíba do Sul. Revista do Departamento de Geografia – USP, (25): 98-119, 2013.

CBDB – Comitê Brasileiro de Barragens. A história das barragens no Brasil, Séculos XIX, XX e XXI: cinquenta anos do Comitê Brasileiro de Barragens. Rio de Janeiro: CBDB, 2011.

CEIVAP – Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Análise dos Impactos e das Medidas Mitigadoras que envolvem a Construção e Operação de Usinas Hidrelétricas. Relatório Final-PSR-009-R1. Relatório Contratual – R6. 2007. Disponível em: <www.ceivap.org.br/downloads/PSR-RE-009-R1.pdf> Acessado em 30/07/2016.

_____. Comitê de Integração da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul. Pelas Águas do Paraíba. Revista Ano III. Edição 3. 09/2009.

COSTA, S. B. Estudo da Influência de Hidrelétricas de Pequeno e Médio Porte no Desenvolvimento Local. (Dissertação de Mestrado) Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento e Planejamento Regional. Universidade de Taubaté, 2018.

FARIA, R.; KNISS, C. C. T.; MACCARI, E. A. Sustentabilidade em Grandes Usinas Hidrelétricas. Revista de Gestão e Projetos – GEP. São Paulo, v. 3, n. 1, Jan./Abr. 2012.

FONSECA, I. F.. A Construção de Grandes Barragens no Brasil, Na China e na Índia: Semelhanças e Peculiaridades dos Processos de Licenciamento Ambiental em Países Emergentes. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – IPEA, 2013.

FONTES, G. A.; XAVIER, Y. M. A.; GUIMARÃES, P. B. V. Princípio Fundamental ao Meio Ambiente: Pequenas Centrais Hidrelétricas na Matriz Energética Brasileira. Constituição e Garantia de Direitos. vol. 1, ano 4. Natal, RN, 2010.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. Balanço Energético do Estado de São Paulo. 2017. Disponível em <<http://www.energia.sp.gov.br/a2sitebox/arquivos/documentos/724.pdf>> Acesso em: 25 ago. 2016.

_____. Secretaria do Meio Ambiente / Coordenadoria de Educação Ambiental. Recursos hídricos. São Paulo: SMA / CEA, 2011.

HABTEC. Engenharia Ambiental. RAP – Relatório Ambiental Preliminar. Pequena Central Hidrelétrica – Lavrinhas. SMA 13641 / 2002.

_____. Engenharia Ambiental. RAP – Relatório Ambiental Preliminar. Pequena Central Hidrelétrica – Queluz. SMA 13642 / 2002.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produto Interno Bruto dos Municípios. Disponível:<<https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/5938>> Acessado em: 20/11/2017.

_____. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Produto Interno Bruto dos Municípios. Disponível:<<https://sidra.ibge.gov.br/Tabela/21>> Acessado em: 20/11/2017.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica. Endogeneização no Desenvolvimento Regional e Local. Planejamento e Políticas Públicas, vol. 23, junho 2001.

NILTON, C. L O Impacto das Pequenas Centrais Hidrelétricas PCHS no Meio Ambiente. TCC Apresentado ao Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, para Obtenção do Título Especialista em Formas Alternativas de Energia. Lavras, 2009.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. Sistema de Transmissão. 2017. Disponível em: <http://apps05.ons.org.br/conheca_sistema/mapas_sin.aspx>. Acesso em: 15/12/2017.

PROMON. Engenharia. Usina Hidrelétrica de Santa Branca. 2017. Disponível em: <<http://www.promonengenharia.com.br/pt-br/projetos/Paginas/usina-hidreletrica-de-santa-branca.aspx>> Acessado em 02/05/2017.

REBOUÇAS, A. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. Hidroeletricidade. Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação, 2. ed. revisada e ampliada, São Paulo: Escrituras, 2002.

REIS L. B.; SANTOS, E. C. Energia Elétrica e Sustentabilidade: Aspectos Tecnológicos, Socioambientais. São Paulo: Editora Manole, 2015.

SANTANA, E. A. Pequenas Centrais Hidrelétricas: A Livre Iniciativa em Números. Boletim Energético. Maio, 2016.

SOUSA, W. L. Impacto Ambiental de Hidrelétricas: Uma Análise Comparativa de duas abordagens. Tese do Programa de Pós Graduação de Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2000.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz Energética Brasileira: Uma Prospectiva. São Paulo. Revista n.79 – CEBRAP. São Paulo, Nov. 2007.

O USO DA DINÂMICA DE SISTEMAS PARA APOIO AO PLANEJAMENTO ELÉTRICO BRASILEIRO

Filipe Rodrigues Nogueira Campos¹
Gisele de Lorena Diniz Chaves¹

¹*Universidade Federal do Espírito Santo*

DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i1.421>

RESUMO

O consumo energético mundial vem mostrando padrões de crescimento sistemático, exigindo assim uma capacidade cada vez maior de produção e distribuição de energia elétrica. No cenário brasileiro, devido à alta participação hidrelétrica na matriz elétrica brasileira, diversos riscos podem incidir, o que requer o planejamento de expansão e diversificação desse setor. Dentre os modelos para planejamento de sistemas de energia, destacam-se os baseados em Dinâmica de Sistemas (DS). Este artigo verifica a existência de estudos envolvendo a aplicação do método de DS no planejamento do sistema elétrico nacional, com foco no uso de recursos energéticos renováveis (RER). O levantamento bibliográfico a partir da base Scopus, indica poucas publicações relacionadas ao cenário brasileiro, assim como envolvendo a segurança energética em modelos de DS em nível internacional. Dessa forma, este trabalho contribui ao propor um modelo inicial para análise dinâmica da diversidade e segurança do setor elétrico brasileiro baseando-se em RER.

Palavras-chave: Segurança do Suprimento Elétrico, Diversidade Energética, Recursos Energéticos Renováveis, Sistemas de Energia.

ABSTRACT

The world's energy consumption has been showing patterns of systematic growth, thus requiring an increasing capacity of production and distribution of electric energy. In the Brazilian scenario, due to the high hydroelectric participation in the Brazilian electricity matrix, several risks may be involved, which requires expansion planning and diversification of this sector. Among the models for planning of energy

systems, the ones based on System Dynamics (SD) stand out. This article verifies the existence of studies involving the application of the SD method in the planning of the national electric system, focusing on the use of renewable energy resources (RER). The literature review from the Scopus database indicates few publications related to the Brazilian scenario, as well as involving energy security in SD models at the international level. Thus, this work contributes to propose an initial model for dynamic analysis of the diversity and safety of the Brazilian electric sector based on RER.

Keywords: Electrical Supply Security, Energy Diversity, Renewable Energy Resources, Energy Systems.

1. INTRODUÇÃO

Os últimos anos registraram um crescimento sólido no uso global das energias renováveis, de forma a fornecer 28% da eletricidade global em 2018 e com projeções de alcançar 50% do fornecimento até 2050 (EIA, 2019). No entanto, mesmo com incentivos recentes para fontes alternativas de energia e políticas de eficiência energética, a participação dos combustíveis fósseis (tende a permanecer dominante no contexto global, caracterizado pelo crescimento econômico e pela segurança energética nacional ameaçada. Reduzir as emissões de GEE associadas à demanda e oferta de energia sem afetar a qualidade de vida da população mundial exige um grande esforço para, além de diversificar a matriz energética, mudar os padrões de consumo (UNEP, 2011).

A diversificação de recursos e fornecedores para a produção de eletricidade diminui o risco de fornecimento de energia (Mathiesen et al., 2011). A diversificação nos recursos de oferta não só reduzem a vulnerabilidade de interrupções no suprimento, mas também diminui o poder dos fornecedores e os riscos de preços mais elevados no mercado (Dybvig e Ross, 2003; IEA, 2007a).

À medida que as economias globais crescem, aumenta-se a concorrência pelos recursos naturais, fazendo com que várias nações coloquem a SSE como prioridade em sua agenda de desenvolvimento futuro. Para isso, planejamento é fundamental. No entanto, as constantes mudanças nos aspectos econômicos, políticos, demográficos, mercadológicos, tecnológicos, entre outros, aumentam a complexidade das decisões relacionadas ao uso da energia. Além disso, o horizonte de planejamento no setor energético é de longo prazo (Chaves e Tosta, 2016).

Os modelos baseados em DS buscam evidenciar como este método pode ser utilizado com diversas abordagens para o planejamento do setor elétrico. Por meio da análise de cenários, esta técnica permite avaliar o efeito da variação de diversos fatores que influenciam o setor energético em longo prazo, fornecendo subsídios para o planejamento estratégico (Chaves e Tosta, 2016). Por mais de 30 anos, a DS desempenhou um papel notável no desenvolvimento da política energética para muitos estados, empresas e países (Aslani et al., 2014; Ford, 1997).

Aslani et al. (2014) afirmam que, apesar do sucesso da dinâmica de sistemas como uma ferramenta voltada ao conhecimento detalhado e projeção dos conceitos de sistemas de energia, poucas pesquisas abordam os efeitos dos RER sobre a segurança energética. Neste sentido, este estudo visa verificar se existem trabalhos na literatura que abordem os conceitos de segurança energética e diversidade no planejamento do sistema energético brasileiro por meio da utilização do método de DS e que envolvam RER.

Desta forma, uma análise da literatura foi realizada. Um levantamento das principais e mais atuais publicações relacionadas aos objetivos desta pesquisa foi realizado na plataforma Scopus. Esta base possui um espectro de periódicos expandido e recente, apresentando uma análise de citações mais rápida e ampla (Aghaei Chadegani et al., 2013). Foram pesquisados artigos publicados entre os anos de 2007 e 2017, e que contivessem no título, resumo ou nas palavras-chave do trabalho termos que se relacionassem com os temas deste artigo. Obteve-se 40.077 publicações relacionadas a energias renováveis (“renewable energy”). Desses, 723 trabalhos também estavam relacionados à Dinâmica de Sistemas (“System Dynamics”), refletindo 1,8% do total analisado. Quando aplicado o filtro de inclusão do termo “energy security”, o percentual cai para 0,18% (72 trabalhos). Após leitura dos resumos, identificou-se que dos 25 artigos com aplicação direta do método de DS no planejamento energético com uso de RER, apenas cinco artigos apresentavam alguma relação com segurança energética.

Após esta introdução, a Seção 2 apresenta uma breve revisão bibliográfica a respeito do setor elétrico brasileiro, da importância do planejamento energético e dos conceitos e alguns indicadores de segurança do suprimento elétrico. As Seções 3 e 4 apresentam, respectivamente, uma revisão do método de dinâmica de sistemas e sua aplicação no planejamento do setor elétrico de maneira global, destacando os principais trabalhos publicados nesse segmento. Na Seção 5 é proposto um modelo preliminar para análise da segurança e diversidade do setor elétrico brasileiro utilizando o método de DS. Por fim são apresentadas as considerações finais desta pesquisa.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O setor elétrico brasileiros

O Brasil abriga uma das matrizes energéticas mais renováveis do mundo, com 45,3% de energia proveniente desse tipo de fonte (EPE, 2019a). Em 2018, a geração de energia elétrica no país foi predominantemente composta por fontes de energia renovável distribuídas em 66,6% de hidrelétricas, 8,5% de biomassa e 7,6% de energia eólica e 0,5% solar. O gás natural e os produtos petrolíferos representam uma quota de 8,6% e 2,4%, respectivamente, enquanto os produtos do carvão representam 3,2% e nuclear 2,5% (EPE, 2019a). Esses percentuais fizeram com que o Brasil ocupasse, ainda em 2018, o terceiro lugar mundial em capacidade instalada baseada em energia renovável, atrás apenas da China e dos Estados Unidos. (REN21, 2019).

Entretanto, o setor elétrico brasileiro enfrenta uma mudança de paradigma que levanta preocupações adicionais sobre a segurança do suprimento para os tomadores de decisão (Santos et al., 2015). O setor possui uma forte dependência de usinas hidrelétricas (entre 65 a 80% da energia elétrica provém da hidrelétrica nos últimos dez anos) (EPE, 2019), cuja expansão de capacidade instalada enfrenta sérios desafios. Além disso, sendo altamente dependentes da pluviosidade, as mudanças nas condições climáticas podem pôr em causa a grande contribuição da energia hidrelétrica para a produção de energia no país no futuro (Pao e Fu, 2013).

No ano de 2001, um sério racionamento de energia elétrica ocorreu no Brasil. Bajay (2006) aponta que, além do longo período de estiagem apresentado no ano, os principais motivos dessa ocorrência foram gerenciais e políticos, como atrasos na implantação de novas instalações, baixo nível de investimento proveniente do setor privado e falhas no planejamento conjunto dos principais órgãos nacionais responsáveis pelo setor. Desta forma, fica claro que a segurança do suprimento elétrico (SSE) é também, decorrente de estratégias definidas no seu planejamento, ou até por falta de um planejamento adequado.

No lado da demanda, as projeções para o consumo futuro de energia elétrica revelam um aumento anual médio esperado de 3,2% entre 2019 e 2029 (EPE, 2019b), o que exige uma rápida expansão da capacidade de geração de energia. Nesse contexto, as tecnologias de energia renovável, como energia eólica, solar e de biomassa, podem complementar as unidades hidrelétricas.

No entanto, em um cenário de referência, estudos mostram uma maior penetração de usinas de energia baseadas em combustíveis fósseis no futuro (Lucena et al., 2016). Estes cenários mostram que

o carvão e o gás natural desempenhariam um papel cada vez mais importante na geração de energia, alterando o papel atual do gás natural como geração sobressalente na carga máxima ou quando as condições hidrológicas são ruins. Uma maior penetração dessas fontes de energia primária, no entanto, significará que as importações de combustíveis fósseis podem levar o Brasil a uma posição de maior dependência externa no futuro.

Algumas tecnologias de energias renováveis são normalmente referidas como não competitivas quando comparadas com alternativas convencionais de combustíveis fósseis. Contudo, se a competitividade inclui não apenas aspectos econômicos, mas também externalidades sociais e ambientais, o planejamento da expansão da geração de energia pode tomar outras direções. Eventualmente, a integração de fontes de energia renováveis no sistema pode até ser melhorada (Lins et al., 2012).

A complexidade do setor elétrico, cujos investimentos precisam ser planejados a médio e longo prazo, requer um sistema de planejamento, programação, operação e regulação (Chaves e Tosta, 2016). Entretanto, o caso brasileiro não reflete tais aspectos. Bajay (2013) aponta um alto nível de discordância (ou falta de coordenação) entre diversos agentes do setor elétrico brasileiro no que tange a planejamento, simulação, operacionalização e operação de longo prazo.

Adicionalmente, Pedrosa (2009) aponta a necessidade de revisão dos padrões de segurança do suprimento atualmente adotados, principalmente sob a égide do custo-benefício, pois o modelo atual vem frequentemente requerendo longas operações de elevado custo operacional.

Chaves e Tosta (2016) enfatizam a importância do suporte consistente de informações confiáveis que subsidiam técnicas e metodologias de planejamento. O planejamento energético deve ser capaz de acompanhar os aspectos políticos, econômicos, tecnológicos e culturais da sociedade, o que reforça a importância de escolher um bom método de planejamento para simulação dessas abordagens.

2.2 Planejamento Energético

Os papéis do planejamento energético são os de permitir a elaboração de metas realistas para as políticas energéticas do governo e monitorar o comportamento dos mercados de energia, bem como o desempenho de seus agentes (produtores, transportadores, armazenadores, distribuidores, comercializadores, governo e órgãos reguladores)

(Bajay, 2013). Dessa forma, o planejamento energético mostra-se uma ferramenta indispensável para auxiliar não apenas as tomadas de decisão, mas também a elaboração de políticas energéticas sustentáveis (Silva e Bermann, 2002).

A análise do setor de energia envolve, entre outros aspectos mais técnicos, as políticas energéticas de um país, que estimulam o aumento do suprimento de energia e seu uso eficiente. O planejamento de energia precisa considerar não só a quantidade e qualidade da energia a ser distribuída para a sociedade, mas também suas áreas geográficas e sociais, de modo a garantir que o fornecimento de energia seja um serviço ao público, conforme determinado pela Constituição Brasileira de 1988 (Chaves e Tosta, 2016).

Segundo Goldemberg e Moreira (2005) o governo de um país tem um papel muito importante na gestão da expansão de sistemas de energia, pois políticas energéticas bem desenvolvidas podem atrair investimentos privados. Pelo lado da oferta, o planejamento energético permite identificar as fontes de energia mais adequadas em termos tecnológicos, sociais e ambientais para atender às demandas da sociedade. Pelo lado da demanda, permite a identificação de tecnologias de uso final capazes de tornar o uso de fontes de energia mais eficiente e racional (Silva e Bermann, 2002).

Pearce e Webb (1987) destacam a necessidade de integração entre planejamento energético e planejamento do desenvolvimento, apontando a impossibilidade de se planejar sem uma adequada base de informações a respeito das mais diversas variáveis de um sistema energético. Da mesma forma, o próprio planejamento energético deve-se manter flexível no que se relaciona às mudanças econômicas, tecnológicas e culturais da sociedade, visando acompanhar novas tendências.

2.3 Segurança do suprimento energético

Há, na literatura, diversas tentativas de definição de segurança do suprimento elétrico (SSE) e de elaboração de seus indicadores (Kruyt et al., 2009; Yao e Chang, 2014). Entretanto, a definição mais citada é um fornecimento confiável e adequado de energia a preços razoáveis (Chester, 2008; Sovacool e Mukherjee, 2011; Pfenninger et al., 2014). Alguns autores também incorporam um aspecto ambiental ao definir a SSE (Gouveia et al., 2014; Vera e Langlois, 2007).

Alguns estudos apresentam abordagens amplas de avaliação da SSE. Por exemplo, Chester (2008) usa uma grade de quatro dimensões (disponibilidade, adequação de capacidade, acessibilidade e

sustentabilidade) para examinar as políticas, existentes e propostas, que impulsionam a SSE da Austrália em termos das quatro dimensões. Kruyt et al. (2009) classificam as dimensões da segurança energética pela disponibilidade, adquiribilidade, acessibilidade e aceitabilidade da energia e usam-nas para analisar a SSE da Europa Ocidental nas próximas décadas. Von Hippel et al. (2009) estabelecem um quadro de seis dimensões para identificar os benefícios e custos relativos de futuros caminhos de energia direcionados pelas políticas energéticas. Outros autores, como Vera e Langlois (2007), avaliam a SSE com vistas a associá-la à sustentabilidade energética, identificando indicadores sociais, econômicos e ambientais. Mais recentemente, Yao e Chang (2014) classificaram a SSE da China segundo quatro dimensões: a disponibilidade de recursos energéticos, a aplicabilidade da tecnologia, a aceitabilidade da sociedade e a acessibilidade (financeira) dos recursos energéticos.

Os conceitos de SSE descritos e as estruturas para avaliar seu nível mostram que a noção de segurança energética tornou-se multidimensional. O caminho para a multidimensionalidade, até certo ponto, exhibe a evolução histórica do conceito. Enquanto alguns trabalhos tratam de um aspecto isolado da SSE (indicadores desagregados ou simples), outros tentam agregar vários elementos relevantes em um único indicador (indicadores agregados). Essas facetas mostram que a segurança energética é uma questão complexa que necessita de uma abordagem abrangente, capaz de envolver toda a complexidade do conceito (Sovacool e Mukherjee, 2011).

A diversidade de fontes de energia é outro importante indicador de segurança por parte da oferta (Jansen et al., 2004) e a diversidade entre os fornecedores um indicador de segurança do mercado (IEA, 2007a). Uma medida quantitativa genérica para diversidade pode, portanto, servir como um indicador de SSE. Stirling (1999) argumenta que um índice de diversidade deve considerar três elementos-chave: variedade (o número de categorias), o saldo (a amplitude entre categorias) e a disparidade (o grau em que as categorias são diferentes entre si). No entanto, a viabilidade de utilização desse índice é comprometida, dada a dificuldade em definir a disparidade. Assim, na ausência de uma medida apropriada de disparidade, os índices que medem apenas dois dos três elementos-chave da diversidade são formalmente chamados de índices de “conceito duplo”.

Jansen et al. (2004) apontam os dois principais índices utilizados para medir a diversidade, destacando-se o índice Shannon, também chamado de índice Shannon-Wiener (Equação 1).

$$H = - \sum_i p_i \cdot \ln(p_i) \quad (1)$$

Com p_i representando a quota de mercado do fornecedor i . Quanto maior o valor de H , mais diversificado é o sistema (conceito duplo). Este índice aumenta uniformemente com a crescente variedade e equilíbrio. Vários estudos aplicaram o índice de Shannon ou uma variação do mesmo para avaliar a diversidade de combustível (Pfenninger et al., 2014; Ranjan e Hughes, 2014).

A estabilidade política dos países também é importante para a segurança do abastecimento energético, uma vez que os governos controlam tanto o real abastecimento energético, quanto as condições em que outras partes o desenvolvem. Alguns estudos objetivaram quantificar tal elemento qualitativo (estabilidade política) para uso como medida de SSE. A Agência Internacional de Energia (IEA) utiliza a classificação de risco político do Guia Internacional de Risco País (ICRG) (IEA, 2007b). Jansen et al. (2004) baseiam a sua medida de estabilidade sociopolítica em longo prazo no índice de desenvolvimento humano (IDH) do Plano das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) e o utilizam na criação de um indicador agregado.

O cerne deste indicador agregado é o índice Shannon (Equação 1). Em seu estudo, Jansen et al. (2004) aplicam um índice Shannon combinado, de forma a captar tanto a diversidade de combustível, quanto a diversidade nos fornecedores, ligadas à participação das importações de vários combustíveis. Adicionalmente, atribui-se a esses fornecedores um fator de estabilidade política, com base em uma modificação do IDH do PNUD. Assim, mais peso é dado aos fornecedores classificados estatisticamente como estáveis. Além desse índice, o esgotamento de recursos é levado em consideração por meio da inclusão de um índice de depreciação, considerando as regiões fornecedora e compradora (Jansen et al., 2004). Embora esse índice agregado capture vários aspectos da SSE, o equilíbrio entre diferentes elementos (diversidade de fontes, dependência de importações, estabilidade política e depreciação) não possui uma base fundamental e, como tal, permanece arbitrário (IEA, 2007b).

De outro modo, Galarraga et al. (2011) demonstram um conjunto de indicadores voltados à avaliação da SSE do ponto de vista da diversidade de fornecimento de energia (Diversity of Energy Supply - DES). Tais indicadores baseiam-se, majoritariamente, na Teoria da Carteira, em finanças (Aslani et al., 2012). Seu cálculo é demonstrado na Equação 2.

$$DES = - \left(\frac{\sum_{i=1}^N a_i \cdot \ln(a_i)}{\ln(N)} \right) \quad (2)$$

Nessa equação, a_i é a parcela de cada fonte primária de energia no fornecimento total de energia. N é o número de fontes. Geralmente, maior pontuação de DES para um país significa alta SSE e baixo risco. De acordo com esta teoria, o risco global de fornecimento de energia é menor se houver um portfólio diversificado de fornecedores (Dybvig e Ross, 2003). A diversificação em fontes de suprimentos pode reduzir a vulnerabilidade das interrupções do fornecimento de uma determinada fonte. Além disso, a diversificação diminui o poder de mercado de qualquer fornecedor e os riscos de preços mais elevados (Ranjan e Hughes, 2014).

Por fim, vale destacar o trabalho de Aslani et al. (2012), que implementa dois indicadores (sendo um deles o DES – Equação 2) para a verificação da segurança energética dos países nórdicos (Finlândia, Suécia, Noruega, Dinamarca e Islândia). O estudo desta região, em termos políticas de diversificação e promoção de RER, se mostra interessante devido às características regionais. Em outro trabalho, Aslani et al. (2014) aplicam os mesmos indicadores, especificamente para o caso da Finlândia, objetivando discutir o papel da diversificação na dependência e segurança do aprovisionamento de energia do país. O estudo desenvolve uma análise com foco especial no papel dos RER por meio de fatores qualitativos e quantitativos.

3. MÉTODOS DE DINÂMICA DE SISTEMAS

A DS estuda a mudança no comportamento do sistema ao longo do tempo, com base em conceitos fundamentais como sistema, dinâmica, estruturas e comportamento, de forma a permitir a avaliação das consequências das decisões tomadas. Um sistema é um conjunto de elementos que interagem continuamente ao longo do tempo. As variáveis deste sistema estão em constante mudança. As relações e conexões entre os componentes são chamadas de estruturas do sistema e as formas com que estes componentes variam indicam o comportamento do sistema. Por definição, a estrutura de um sistema determina seu comportamento (Morecroft, 2015). A Figura 1, adaptada de Aslani et al. (2014), mostra os estágios de desenvolvimento da metodologia de dinâmica de sistemas.

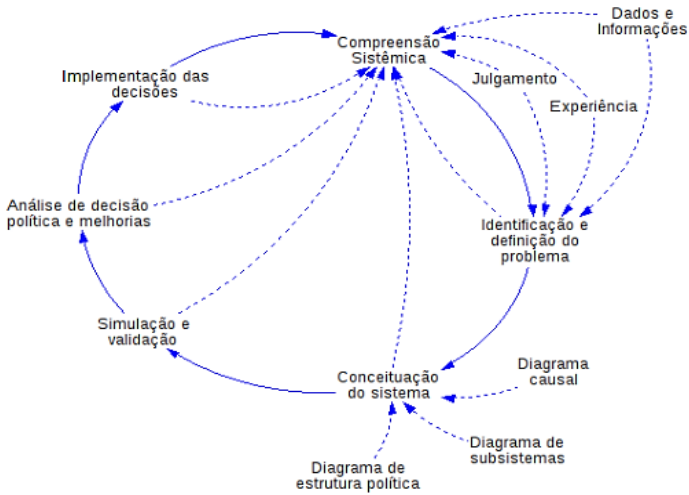


Figura 1 - Metodologia de Dinâmica de Sistemas

O método inicia com a identificação do sistema e a definição de seus limites e interfaces, ou seja, as limitações do sistema e o objetivo do estudo, bem como as variáveis de entrada e saída. Em seguida, o modelo conceitual é construído com o Diagrama de Causa e Efeito (DCE), que representa a relação causal entre as variáveis identificadas e ajuda a definir as hipóteses causais preliminares para simplificar a representação do sistema (Morecroft, 2015). Um DCE consiste em “variáveis conectadas por setas, denotando as influências causais entre as variáveis” (Sterman, 2000, p.138).

O detalhamento do sistema consiste no Diagrama de Estoque e Fluxo (DEF), ou seja, acumulação de recursos e a taxa de mudança dos recursos (Sterman, 2000). A partir dessa representação podem ser formuladas as expressões matemáticas (Morecroft, 2015). Uma das técnicas possíveis para solução do modelo é a simulação computacional que, a partir do DEF, configura as equações diferenciais numericamente resolvidas com auxílio de softwares especializados (Morecroft, 2015).

No estágio de verificação do modelo, o comportamento esperado para as condições estabelecidas é verificado. Feito isso, o tomador de decisão usa o modelo para criar diferentes cenários futuros para o sistema analisado (Senge, 2014). A análise de diferentes cenários permite a estruturação do problema o mais próximo possível da realidade, diminuindo as incertezas na tomada de decisão e maximizando a robustez da análise.

4. DINÂMICA DE SISTEMAS APLICADA AO PLANEJAMENTO ENERGÉTICO

Muitos trabalhos foram desenvolvidos com esta temática (Ford, 1997). Naill (1992), por exemplo, descreveu um exemplo emblemático: o modelo de política energética norte-americano chamado FOSSIL2/IDEAS, um dos principais casos de sucesso para a modelagem de sistemas dinâmicos. Entre 1978 e 1995, FOSSIL2/IDEAS ainda era o modelo da Política Nacional de Energia para a maioria dos analistas de energia dos EUA e internacionais. Depois de quase 20 anos, este modelo foi substituído por outro modelo com o mesmo método, o Sistema de Modelagem de Energia Nacional (National Energy Modeling System – NEMS) (Backus e Amlin, 2009).

Xavier et al. (2013) apresentam uma extensa revisão a respeito dos modelos de análise e planejamento de sistemas integrados de energia, oferecendo maior destaque aos modelos Threshold 21 (T21), de Bassi (2010), e IMAGE/TIMER, de Van der Sluijs et al. (2002). O primeiro mostra-se um modelo causal-descritivo, em que a DS é empregada representando relações sociais, econômicas e ambientais. Esse modelo oferece uma abordagem complementar que permite avançar em direção a fluxos de energia ideais, ao mesmo tempo em que simula a interação de um grande número de ciclos de feedback com os principais fatores no restante da economia, da sociedade e do meio ambiente (Bassi e Shilling, 2010). Isso fornece informações úteis para análise e formulação de políticas (Morecroft, 2015).

Já o IMAGE/TIMER é um modelo de simulação que não otimiza os resultados do cenário durante um período de modelagem completo com base na previsão perfeita, mas simula as decisões de investimento ano a ano com base em uma combinação de informações bottom-up e regras específicas sobre investimento comportamento, substituição de combustível e tecnologia. A saída é uma imagem bastante detalhada de como a demanda de energia, os custos de combustível e as tecnologias de fornecimento concorrentes poderiam se desenvolver ao longo do tempo em várias regiões. Os principais insumos exógenos incluem crescimento do PIB, população, desenvolvimento tecnológico e esgotamento de recursos (Xavier et al., 2013).

Diferentemente do T21, o TIMER não leva em conta os feedbacks que ligam o setor de energia a outros (Xavier et al., 2013). Embora as incertezas envolvidas nesses feedbacks possam ser grandes, a falta de inter-relações entre os diferentes setores é uma limitação importante que não é abordada com modelos de otimização ou econométricos, razão pela qual o autor tenta propor uma abordagem mais abrangente das questões energéticas.

Alguns pesquisadores utilizaram a DS para avaliar a estrutura física dos sistemas de energia e criar diferentes cenários (Chi et al., 2009; Connolly et al., 2010). Um segundo grupo de pesquisadores implementou modelos de DS para avaliar fatores ambientais e os efeitos das emissões de CO₂ nos sistemas de energia (Han e Yoshitsugu, 2008; Jin et al., 2009; Trappey et al., 2012; Feng et al., 2013). Esses autores desenvolveram diferentes modelos para apoiar políticas relacionadas a temas como a melhoria da sustentabilidade urbana e a análise de custos das emissões de CO₂.

Um terceiro, e ainda restrito grupo de pesquisa de DS e abordagem de pensamento sistêmico, foca na política energética em termos de segurança do abastecimento de energia (Chi et al., 2009; Huang e Liu, 2011; Shin et al., 2013; Xavier et al., 2013; Aslani et al., 2014). Esses modelos ajudam os especialistas a avaliar e implementar quadros de indicadores ou políticas em um determinado país, identificando os principais componentes voltados à segurança de sistemas de energia.

Alguns trabalhos também se concentram na modelagem dinâmica de políticas de RER (Krutilla e Reuveny, 2006; Aslani et al., 2012; Bennett, 2012; Hsu, 2012; Mediavilla et al., 2013). Essas pesquisas analisam a substituição dos combustíveis fósseis e fontes não renováveis por RERs. A Figura 2, adaptada de Mediavilla et al. (2013, p. 298), mostra um exemplo de diagrama de causa e efeito usado para mostrar os padrões de exaustão mundial de combustíveis fósseis e sua possível substituição por RERs.

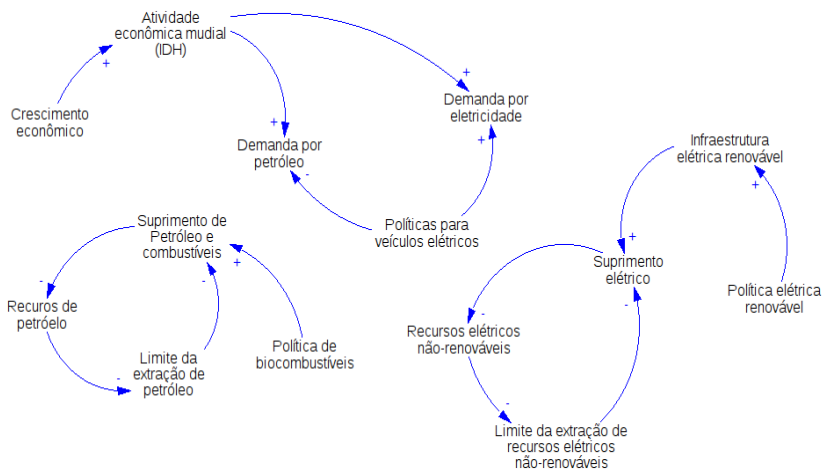


Figura 2 - Diagrama de causa e efeito da substituição dos combustíveis fósseis por renováveis

Esse modelo mostra que o crescimento econômico dos países faz aumentar a atividade econômica mundial, o que impacta em aumento na demanda energética, como o petróleo ou a própria eletricidade. As políticas de incentivo ao uso de veículos elétricos fazem aumentar a demanda por eletricidade, na medida em que impactam negativamente na demanda por derivados de petróleo. Da mesma forma, os recursos de petróleo são limitados, de forma que, quanto maior a demanda e consequente extração desse bem, menor a quantidade disponível. O mesmo acontece com os recursos não-renováveis voltados à produção elétrica. Dessa forma, as políticas de incentivo à produção de biocombustíveis e produção elétrica a partir de recursos renováveis são reforçadas.

Kiani et al. (2010) destacam a aplicação de DS à análise de sistemas energéticos que utilizam combustíveis fósseis (Figura 3). Segundo esses autores, a demanda energética impulsiona as atividades de exploração e produção de energia, a fim de acelerar o suprimento energético. Esse abastecimento fomenta a atividade econômica, gerando uma crescente demanda por energia e, conseqüentemente, uma elevação nos preços. Esse aumento influi na busca de fontes substitutas, voltadas à redução ou manutenção dos preços.

Outro fator de influência sobre os preços são os próprios custos da atividade de exploração e produção. Quanto mais escassos se tornam os insumos, maiores os custos de exploração e, conseqüentemente, maiores os preços. Entretanto, investimentos voltados aos avanços tecnológicos na produção de energia a partir de outras fontes podem equilibrar esse cenário.

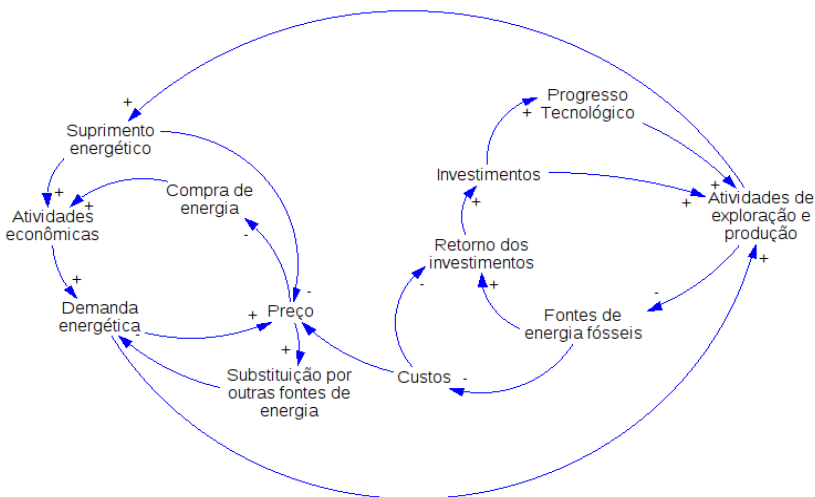


Figura 3 - Diagrama de cauda e efeito do setor de energia

Para obter uma visão significativa do comportamento em longo prazo dos mercados de energia liberalizados, Olsina (2005) propôs um modelo que envolve uma análise de seu comportamento em longo prazo, em que os preços e a confiabilidade da oferta em longo prazo são o centro de interesse, de acordo com a Figura 4.



Figura 4 - Diagrama de causa e efeito para o mercado de energia

Esse modelo mostra que, quanto maior a capacidade de produção, maior o montante de reserva de energia elétrica de determinada localidade, subtraída quando da demanda por essa eletricidade. Maiores valores de reserva impactam em menores preços, que podem ser elevados em caso de aumento das margens de lucro dos componentes da rede. A previsão de longo prazo desses preços influencia diretamente a expectativa de lucratividade, podendo ser impactada tanto pela estimativa de preço dos combustíveis, quanto pela expectativa dos custos. Após determinado período, a expectativa de lucratividade impacta sobre a decisão de investimentos futuros, influenciando no aumento da capacidade de produção no médio ou longo prazo.

Aslani et al. (2014) propõem um modelo de DS para avaliar a segurança e a dependência externa do setor energético na Finlândia com foco especial no papel das fontes renováveis (Figura 5), que é avaliado por meio de três cenários para as políticas de energias renováveis

do setor energético de um país, apresenta um foco especial no papel das fontes renováveis, o que contribui para os objetivos deste artigo. Evidencia-se, portanto, o baixo volume de trabalhos científicos publicados que envolvam o uso desse método voltado à análise de políticas energéticas e segurança de suprimento no longo prazo, sobretudo no cenário brasileiro. Neste sentido, a próxima seção apresenta um modelo preliminar aplicado à realidade brasileira.

5. PROPOSTA DE MODELO PARA O CASO BRASILEIRO

O estudo de Aslani et al. (2014) forneceu um método de avaliação da efetividade das políticas de RER para geração de eletricidade e calor sobre a dependência de importações para o suprimento de energia no cenário da Finlândia. Diferentemente do trabalho de Aslani et al. (2014), propõe-se para o caso brasileiro, relacionar as políticas de RER para a geração de eletricidade sobre a diversidade e, consequentemente, a segurança de suprimento elétrico brasileiro. As variáveis de interesse para essa análise e suas relações podem ser visualizadas na Figura 6, que representa o diagrama de causa e efeito do papel da energia renovável para a SSE no Brasil.

Deve-se levar em consideração que a população e o crescimento econômico afetam positivamente o PIB de um país (Lee e Chang, 2007). Vale ressaltar que outros fatores afetam o crescimento econômico de um país, além da capacidade de geração de energia, principalmente, as renováveis. No entanto, estes fatores extrapolam a fronteira estabelecida para a análise deste sistema. Quando o PIB é aumentado, o consumo de eletricidade também é elevado e, por consequência, a demanda de energia aumentará (Wolde-Rufael, 2014). O crescimento da demanda de eletricidade aumenta o risco de falta de suprimento, reduzindo a segurança do sistema. Com a redução de segurança no suprimento, o governo é pressionado no sentido da ampliação da capacidade de suprimento por meio do uso de fontes não renováveis de energia, importação direta e/ou o uso de fontes renováveis (Aslani et al., 2014).

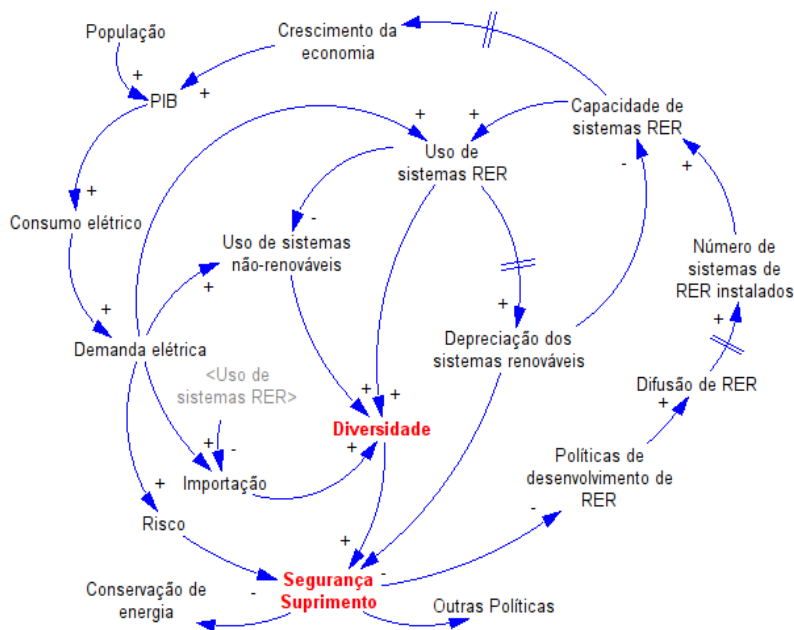


Figura 6 - Diagrama de causa e efeito do papel da energia renovável para a SSE no Brasil

Nesse sentido podem-se destacar políticas de conservação de energia, de desenvolvimento da utilização de RER na geração elétrica e outras frentes de ação. Sugere-se considerar nas fronteiras desta pesquisa somente as relações das políticas de desenvolvimento de RER.

Essas políticas envolvem elementos distintos e complementares, incluindo investimentos diretos, auxílios fiscais e outras políticas de incentivo. Ressalta-se que investimentos governamentais ou subsídios ao setor privado para participar de programas de desenvolvimento de RER ajudam a acelerar os programas de difusão de RER (Aslani, 2014; Aslani et al., 2012; Kiani et al., 2010; Mediavilla et al., 2013). Portanto, os programas de difusão influenciam positivamente, de forma diferida, o número de sistemas renováveis instalados e a capacidade dos sistemas renováveis. O comportamento de atraso no tempo relativo a essas variáveis é representado, na Figura 6, por duas retas perpendiculares ("||") às setas de indicação de relação.

O aumento da capacidade instalada baseada em RER permite um maior uso desses sistemas para suprimento elétrico, não só aumentando a diversidade e, conseqüentemente, a segurança energética no curto prazo, como proporcionando oportunidades para criação de empresas e empregos que promovem crescimento econômico e bem-estar social em longo prazo. Adicionalmente, um maior uso desses sistemas reduz tanto a necessidade de suprimento proveniente de sistemas baseados em fontes não renováveis – como termelétricas (gás natural) e nucleares – quanto da importação (Aslani et al., 2014).

Por outro lado, o próprio uso dos sistemas baseados em RER passa a causar, após determinado tempo, um efeito negativo, tanto na segurança elétrica, quanto na capacidade de produção desses sistemas. Entretanto, alguns anos são necessários para que os efeitos causados pela depreciação sejam notáveis (Zhao et al., 2015).

O diagrama de causa e efeito permite uma melhor visualização e compreensão da situação a ser estudada (Sterman, 2000; Morecroft, 2015). Por meio dessas relações é possível determinar quais variáveis serão inseridas em um modelo a ser simulado, de modo a se estabelecer as fronteiras do sistema estudado e, posteriormente, as equações sobre as quais serão simulados cenários.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Muitos países se esforçam para serem eficazes na gestão do abastecimento de energia. Neste sentido, a segurança do fornecimento de energia é caracterizada como um sistema complexo por sua importância e vários encadeamentos. À medida que a análise estratégica e política dos problemas de energia está se tornando mais complexa e difícil de gerenciar, a abordagem de modelagem de dinâmica de sistemas oferece uma importante contribuição para o planejamento do setor de energia. Esta abordagem pode ajudar pesquisadores e formuladores de políticas a compreenderem a complexidade e a dinâmica da segurança elétrica e da diversificação das fontes de suprimento desses sistemas.

Este estudo forneceu uma pesquisa inicial, partindo da verificação da existência de trabalhos envolvendo o método de DS como apoio ao planejamento energético brasileiro. Evidenciou-se apenas um trabalho em periódicos de alcance internacional que avalia o setor de energia pelo método de dinâmica de sistemas. Em função dos benefícios deste método no planejamento do setor público e casos já publicados de aplicação em outros países, este artigo propôs um modelo preliminar aplicável ao cenário nacional de geração elétrica. Para

pesquisas futuras, o diagrama criado pode servir de base para a criação do DEF para equacionamento e simulação de cenários de diversidade e segurança do setor elétrico brasileiro.

Espera-se que este estudo seja precursor de pesquisas futuras que envolvam os desafios do planejamento do setor energético por meio da DS. O planejamento energético carece de ferramentas adequadas que orientem, de forma mais técnica, a tomada de decisões envolvendo a complexidade dos elementos inerentes a este setor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGHAEI CHADEGANI, A.; SALEHI, H.; YUNUS, M.; FARHADI, H.; FOOLADI, M.; FARHADI, M.; ALE EBRAHIM, N.. A Comparison between Two Main Academic Literature Collections: Web of Science and Scopus Databases. *Asian Social Science*, Vol. 9, No. 5, pp. 18-26, April 27, 2013.

ASLANI, A. Private sector investment in renewable energy utilisation: strategic analysis of stakeholder perspectives in developing countries. *International Journal of Sustainable Energy*, v. 33, n. 1, p. 112-124, 2014.

ASLANI, A.; ANTILA, E.; WONG, K. V. Comparative analysis of energy security in the Nordic countries: The role of renewable energy resources in diversification. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, v. 4, n. 6, p. 062701, 2012.

ASLANI, A.; HELO, P.; NAARANOJA, M. Role of renewable energy policies in energy dependency in Finland: System dynamics approach. *Applied Energy*, v. 113, p. 758-765, 2014.

ASLANI, A.; NAARANOJA, M.; ZAKERI, B. The prime criteria for private sector participation in renewable energy investment in the Middle East (case study: Iran). *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 4, p. 1977-1987, 2012.

BACKUS, G.; AMLIN, J. A history of making energy policy. In: *The 27th International Conference of the System Dynamics Society*. Albuquerque, New Mexico. 2009.

BAJAY, S. V. Integrating competition and planning: a mixed institutional model of the Brazilian electric power sector. *Energy*, v. 31, n. 6-7, p. 865-876, 2006.

_____. Evolução do planejamento energético no Brasil na última década e desafios pendentes. *Revista Brasileira de Energia*, Itajubá, v. 19, n. 1, p. 255-266.

BASSI, A. M. Evaluating the use of an integrated approach to support energy and climate policy formulation and evaluation. *Energies*, v. 3, n. 9, p. 1604-1621, 2010.

BASSI, A. M.; SHILLING, John D. Informing the US energy policy debate with Threshold 21. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 77, n. 3, p. 396-410, 2010.

BENNETT, S. J. Using past transitions to inform scenarios for the future of renewable raw materials in the UK. *Energy policy*, v. 50, p. 95-108, 2012.

CHANG, Y.; LEE, J. L.. Electricity market deregulation and energy security: a study of the UK and Singapore electricity markets. *International Journal of Global Energy Issues*, v. 29, n. 1-2, p. 109-132, 2008.

CHAVES, G. L. D.; TOSTA, M. C. R. Planejamento governamental do setor energético no Brasil. In: CHAVES, Gisele L. D.; TOSTA, Marielce C. R. (Org.). *Gestão de Sistemas de Energia*. Curitiba: Editora CRV, 2016.

CHESTER, L. The (default) strategy determining the security of Australia's energy supply. In: *Second International Association for Energy Economics (IAEE) Asian Conference: Energy Security and Economic Development under Environmental Constraints in the Asia-Pacific Region*. Curtin University of Technology, 2008. p. 97-122.

_____. Conceptualising energy security and making explicit its polysemic nature. *Energy policy*, v. 38, n. 2, p. 887-895, 2010.

CHI, K. C.; NUTTALL, W. J.; REINER, D. M. Dynamics of the UK natural gas industry: System dynamics modelling and long-term energy policy analysis. *Technological Forecasting and Social Change*, v. 76, n. 3, p. 339-357, 2009.

CHUANG, M. C.; MA, H. W. Energy security and improvements in the function of diversity indices - Taiwan energy supply structure case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 24, p. 9-20, 2013.

CONNOLLY, D.; LUND, H.; MATHIESEN, B. V.; LEAHY, M. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems. *Applied Energy*, v. 87, n. 4, p. 1059-1082, 2010.

DYBVIG, P. H.; ROSS, S. A. Arbitrage, state prices and portfolio theory. *Handbook of the Economics of Finance*, v. 1, p. 605-637, 2003.

EIA. *International Energy Outlook*. [S.l.]: US Energy Information Administration (EIA), 2019.

EPE. Balanço Energético Nacional. Brasil: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2019a. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.697.7835&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 02 maio 2020.

_____. Plano Decenal de Expansão de Energia 2029. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2019b. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-423/topico-481/02%20Demandada%20de%20Energia.pdf>>. Acesso em: 02 maio 2020.

FENG, Y. Y.; CHEN, S. Q.; ZHANG, L. X. System dynamics modeling for urban energy consumption and CO₂ emissions: A case study of Beijing, China. *Ecological Modelling*, v. 252, p. 44-52, 2013.

FORD, A. System dynamics and the electric power industry. *System Dynamics Review: The Journal of the System Dynamics Society*, v. 13, n. 1, p. 57-85, 1997.

GALARRAGA, I.; GONZÁLEZ-EGUINO, M.; MARKANDYA, A. (Ed.). *Handbook of sustainable energy*. Edward Elgar Publishing, 2011.

GOLDEMBERG, J.; MOREIRA, J. R. Política energética no Brasil. *Estudos avançados*, v. 19, n. 55, p. 215-228, 2005.

GOUVEIA, J. P.; DIAS, L.; MARTINS, I.; SEIXAS, J.. Effects of renewables penetration on the security of Portuguese electricity supply. *Applied Energy*, v. 123, p. 438-447, 2014.

HAN, J.; YOSHITSUGU H. A system dynamics model of CO₂ mitigation in China's inter-city passenger transport. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 13, n. 5, p. 298-305, 2008.

HSU, C.. Using a system dynamics model to assess the effects of capital subsidies and feed-in tariffs on solar PV installations. *Applied Energy*, v. 100, p. 205-217, 2012.

IEA. Contribution of renewables to energy security. [S.l.]: International Energy Agency (IEA), 2007a. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/so_contribution.pdf>. Acesso em: 26 jul. 2017.

_____. Energy Security & Climate Policy. [S.l.]: International Energy Agency (IEA), 2007b. Disponível em: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/energy_security_climate_policy.pdf>. Acesso em: 12 abr. 2017.

JANSEN, J. C.; ARKEL, W. V.; BOOTS, M. G. Designing indicators of long-term energy supply security. Energy research Centre of the Netherlands (ECN), 2004.

JIN, W.; XU, L.; YANG, Z. Modeling a policy making framework for urban sustainability: incorporating system dynamics into the ecological footprint. *Ecological Economics*, v. 68, n. 12, p. 2938-2949, 2009.

KIANI, B.; MIRZAMOHAMMADI, S.; HOSSEINI, S. H. A survey on the role of system dynamics methodology on fossil fuel resources analysis. *International Business Research*, v. 3, n. 3, p. 84, 2010.

KRUTILLA, K.; REUVENY, R. The systems dynamics of endogenous population growth in a renewable resource-based growth model. *Ecological Economics*, v. 56, n. 2, p. 256-267, 2006.

KRUYT, B.; VAN VUUREN, D. P.; DE VRIES, H. J.; GROENENBERG, H. Indicators for energy security. *Energy policy*, v. 37, n. 6, p. 2166-2181, 2009.

LEE, Chien-Chiang; CHANG, Chun-Ping. Energy consumption and GDP revisited: a panel analysis of developed and developing countries. *Energy Economics*, v. 29, n. 6, p. 1206-1223, 2007.

LINS, M. E.; OLIVEIRA, L. B.; DA SILVA, A. C. M.; ROSA, L. P.; PEREIRA JR, Amaro O. Performance assessment of alternative energy resources in Brazilian power sector using data envelopment analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 1, p. 898-903, 2012.

LUCENA, A. F. P.; CLARKE, L.; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A.; ROCHE-DO, P. R.R.; NOGUEIRA, L. P. P.; DAENZER, K.; GURGEL, A.; KITOUS, A.; KOBER, T. Climate policy scenarios in Brazil: A multi-model comparison for energy. *Energy Economics*, v. 56, p. 564-574, 2016.

MEDIAVILLA, M.; DE CASTRO, C.; CAPELLÁN, I.; MIGUEL, L. J.; ARTO, I.; FRECHOSO, F. The transition towards renewable energies: Physical limits and temporal conditions. *Energy Policy*, v. 52, p. 297-311, 2013.

MORECROFT, J. DW. *Strategic modelling and business dynamics: a feedback systems approach*. John Wiley & Sons, 2015.

NAILL, R. F. A system dynamics model for national energy policy planning. *System Dynamics Review*, v. 8, n. 1, p. 1-19, 1992.

OLSINA, F. *Long-term dynamics of liberalized electricity markets*. Universidad Nacional de San Juan, 2005.

PAO, Hsiao-Tien; FU, Hsin-Chia. Renewable energy, non-renewable energy and economic growth in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 25, p. 381-392, 2013.

PEARCE, D.; WEBB, M. Rural electrification in developing countries: a reappraisal. *Energy Policy*, v. 15, n. 4, p. 329-338, 1987.

PEDROSA, P. Modelo setorial e perspectivas de evolução para o mercado livre de energia, apresentação feita no Seminário—5 anos do Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro. Rio de Janeiro, RJ, 2009.

PFENNINGER, S.; HAWKES, A.; KEIRSTEAD, J. Energy systems modeling for twenty-first century energy challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 33, p. 74-86, 2014.

REN21. Renewables 2019: Global status report. REN21 Secretariat, 2019. Disponível em: <https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/gsr_2019_full_report_en.pdf> Acesso em 04 de maio de 2020.

RANJAN, A.; HUGHES, L. Energy security and the diversity of energy flows in an energy system. *Energy*, v. 73, p. 137-144, 2014.

SANTOS, M. J.; FERREIRA, P.; ARAÚJO, M.; PORTUGAL-PEREIRA, J.; LUCENA, A. F. P.; SCHAEFFER, R. Scenarios for the future Brazilian power sector based on a multi-criteria assessment. *Journal of Cleaner Production*, v. 167, p. 938-950, 2017.

SENGE, P. M. The fifth discipline fieldbook: Strategies and tools for building a learning organization. Crown Business, 2014.

SHIN, J.; SHIN, Wan-Seon; LEE, C. An energy security management model using quality function deployment and system dynamics. *Energy Policy*, v. 54, p. 72-86, 2013.

SILVA, M. V. M.; BERMANN, C. O planejamento energético como ferramenta de auxílio às tomadas de decisão sobre a oferta de energia na zona rural. Proceedings of the 4th Encontro de Energia no Meio Rural, 2002.

SOVACOOOL, B. K.; MUKHERJEE, I. Conceptualizing and measuring energy security: A synthesized approach. *Energy*, v. 36, n. 8, p. 5343-5355, 2011.

STERMAN, J. D. Business dynamics: systems thinking and modeling for a complex world. 2000.

STIRLING, A. On the economics and analysis of diversity. Science Policy Research Unit (SPRU), Electronic Working Papers Series, Paper, v. 28, p. 1-156, 1998.

TEUFEL, F.; MILLER, M.; GENOESE, M.; FICHTNER, W. Review of System Dynamics models for electricity market simulations. KIT Scientific Publishing, 2013.

TRAPPEY, A. J. C.; TRAPPEY, C. V.; LIN, G. Y. P.; CHANG, Yu-Sheng. The analysis of renewable energy policies for the Taiwan Penghu island administrative region. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 1, p. 958-965, 2012.

UNEP. *Towards a green economy: Pathways to sustainable development and poverty eradication*. [S.l.]: United Nations Environment Programme (UNEP), 2011.

VAN DER SLUIJS, J. P. et al. Uncertainty assessment of the IMAGE/TIMER B1 CO₂ emissions scenario, using the NUSAP method. Dutch National Research Programme on Global Air Pollution and Climate Change, Report No. 410, v. 200, p. 104, 2002.

VENTOSA, M.; BAILLO, Á.; RAMOS, A.; RIVIER, M. Electricity market modeling trends. *Energy policy*, v. 33, n. 7, p. 897-913, 2005.

VERA, I.; LANGLOIS, L. Energy indicators for sustainable development. *Energy*, v. 32, n. 6, p. 875-882, 2007.

VON HIPPEL, D.; SUZUKI, T.; WILLIAMS, J. H.; SAVAGE, T.; HAYES, P. Energy security and sustainability in Northeast Asia. *Energy policy*, v. 39, n. 11, p. 6719-6730, 2011.

WOLDE-RUFAEL, Y. Electricity consumption and economic growth in transition countries: A revisit using bootstrap panel Granger causality analysis. *Energy Economics*, v. 44, p. 325-330, 2014.

XAVIER, M. V. E.; BASSI, A. M.; DE SOUZA, C. M.; BARBOSA FILHO, W. P.; SCHLEISS, K.; NUNES, F. Energy scenarios for the Minas Gerais State in Brazil: an integrated modeling exercise using System Dynamics. *Energy, Sustainability and Society*, v. 3, n. 1, p. 17, 2013.

YAO, L.; CHANG, Y. Energy security in China: a quantitative analysis and policy implications. *Energy Policy*, v. 67, p. 595-604, 2014.

ZHANG, Y.; ZHENG, H.; YANG, Z.; SU, M.; LIU, G.; LI, Y. Multi-regional input-output model and ecological network analysis for regional embodied energy accounting in China. *Energy Policy*, v. 86, p. 651-663, 2015.

ZHAO, H.; WU, Q.; HU, S.; XU, H.; RASMUSSEN, C. N. Review of energy storage system for wind power integration support. *Applied Energy*, v. 137, p. 545-553, 2015.

THE PROCESS OF RURAL ELECTRIFICATION IN DEVELOPING COUNTRIES: SYSTEMIC ANALYSIS BASED ON THE UNDERSTANDING OF POLICIES OF BRAZIL AND CHINA

André Frazão Teixeira¹
Davi Gabriel Lopes²
Juan Arturo Castañeda-Ayarza³

¹*Faculdade La Salle Manaus*

²*Faculdade Cantareira*

³*Pontifícia Universidade Católica de Campinas*

DOI: <https://doi.org/10.47168/rbe.v25i1.418>

RESUMO

O presente artigo, utilizando uma abordagem sistêmica, analisou políticas e programas de eletrificação rural na China e no Brasil, dois países que já atingiram o objetivo de fornecer energia elétrica a 99% da população em áreas rurais. A análise foi focada em quatro macro-fatores (governança, financiamento, implementação e monitoramento e disponibilidade tecnológica), os quais influenciam de forma positiva ou negativa a evolução da política de eletrificação rural. O estudo permitiu concluir que foi dada uma clara prioridade aos macro-fatores financiamento (principalmente público) e às tecnologias disponíveis, o que possibilitou os avanços quantitativos na eletrificação rural, mas prejudicou a confiabilidade do sistema e sua relação com os processos locais de geração de renda. No caso da China, observou-se participação em nível local (concessionárias, formas de geração de energia e participação da população), mas com pontos negativos para governança e monitoramento. No caso brasileiro, o gargalo continua sendo a região amazônica, que requer estruturas baseadas no dimensionamento dos macro-fatores de forma individualizada para a região. Finalmente, uma estrutura de tomada de decisão com base em cenários de eletrificação rural nos países em desenvolvimento é sugerida, mostrando que é possível sustentar o processo de eletrificação rural a partir de fortes estruturas de financiamento e tecnologias disponíveis, mas a universalização do atendimento não terá prazo definido se não houver estruturas sólidas de governança e gestão em nível local.

Palavras-chave: Análise Sistêmica, Eletrificação Rural, Países em Desenvolvimento, Desenvolvimento local.

ABSTRACT

The present article, based on a systemic approach, analyzed rural electrification policies and programs in China and Brazil, two countries that have already reached 99% of the population receiving electricity in rural areas. This analysis was focused on four macro-factors (governance, funding, implementation and monitoring and technological available), which together collaborated in a positive or negative way for the evolutionary process of rural electrification policy. The study allowed to conclude that a clear priority was given to macro-factors funding (mainly public) and available technologies, which made possible the advances in rural electrification but undermined the reliability of the system and its relationship with local income generation processes. In the case of China local participation (utilities, energy and population) was observed, but with negative points for governance and monitoring. In the Brazilian case, the bottleneck remains the Amazon region, which requires structures based on the macro factors that are dimensioned for the region. Finally, a decision-making framework was set up based on scenarios for rural electrification in developing countries, showing that it is possible to maintain the rural electrification process from the strong funding structures and available technologies, but the deadline for universalization will have no set term if there are no solid structures of governance and management at the local level.

Keywords: Systemic Analysis, Rural Electrification, Developing Countries; Local Development.

1. CONTEXTUALIZATION

In 2014, according to a study by the International Energy Agency (IEA), there were around 1.1 billion people in the world without uninterrupted and reliable access to electricity. This situation should be a worldwide concern, especially since it is assumed that sustainable development will only occur endemically in all countries if broad access and financing is set up so as to guarantee, inter alia, the electricity service to nations which need it or may need it in the future. This condition was highlighted in the recent Sustainable Development Goals (SDGs) (Sachs, Schmidt-traub, & Durand-delacre, 2016).

In fact, the agenda adopted based on the SDGs suggests that attaining goals related to sustainable socioeconomic development,

social equity, and human rights is a basic prerequisite for permanently combating and eradicating extreme poverty worldwide. Consequently, an exclusive goal for the generation of electric energy from renewable energy sources is often presented in worldwide policies. This situation makes it clear that rural electrification and sustainable development are inextricably linked in the same direction, being positively correlated, based on an institutional and global context.

Based on this idea, studies of alternative and clean forms of electric power generation, rural electrification, and distributed generation have become more profound and comprehensive, in recent years. For example, according to a survey conducted by (Schillebeeckx, Parikh, Bansal, & George, 2012), between 1990 and 2011, the number of articles in specialized journals using the keyword rural electrification as the main theme increased by 297% in this period.

This scenario has some external incentives, such as the rising scientific certainty about climate change. This increases the urge for the use of renewable energy sources and practices related to more energy security, such as reducing the weight of fossil fuels in the energy matrix of countries (United Nations, 2015). In spite of that, the main cause for the increase of policies and programs directed at rural electrification and the use of renewable sources in developing countries is economic, as is the case of Brazil and China. Both seek to reduce the distance between rural and urban development levels in order to increase income generation and improve the life quality of rural population and of the people who does not live in large urban centers (MME, 2015b; Shyu, 2012).

In these countries, electricity service provision has reached approximately 99% of their respective populations; however, this has neither resulted in a process of socioeconomic development nor in significant improvements in quality of life. According to IEA (2015a), based on data referring to 2012, concerning the use of renewable and less polluting sources for cooking, in China only about 17% of the rural population has access to non-solid fuels, while in Brazil this number is 66%. These examples suggest that only the availability of electricity to the population will not be sufficient to contribute to the diversification of the end uses of electricity and even less to the popularization of the use of other less polluting forms of energy, at least in the short term.

For these countries, the definition of initial priorities and the connection with broader policies and their own governance aspects were adopted with some success in electrification programs. In addition, because it was a public policy, they had the option of taking into account the efficiency and effectiveness of the process of electrification and universalization to propose and implement changes during its own validity. In other words, electrification programs are evaluated as successful, from their efficiency and effectiveness in view of the

universal service goal. However, when other expected impacts are taken into account, even though they are included as objectives within the programs themselves, the success of this policy becomes doubtful (Teixeira, Castañeda-Ayarza, Lopes, & Sampaio, 2015).

Therefore, an electrification program, when planned in accordance with objectives that consider the universalization of electric service in conjunction with socioeconomic development, should define clear and measurable objectives. Those should meet the initial intentions proposed, which could be:

- i - To Make access to electricity universal. This refers to the absolute service, by increasing absolute numbers of residential connections; however, it does not necessarily takes into account the reliability of the electric network and the forecast of increase in demand and supply in the medium and long term;
- ii - To Improve quality of life. This refers to improvements in aspects related to quality of life as a result of electrification, such as the use of a larger number of refrigerators, more hours of study, and modern and clean cooking methods; however, it does not necessarily means increases in levels of jobs and wages;
- iii - To Integrate a framework conducive to socioeconomic development. This refers to quantitative and qualitative improvements in the quality of life and in aspects such as levels of employment and wages for the beneficiary population.

Electrification policies observe the breadth of possible outcomes as systematically attainable or influenceable effects. However, given the passive stance of public policies with a developmental bias, specially related to populations far from large urban centers or medium housing centers, in practice it is observed in most cases that only the first and/or the second choice of results is actually achieved (Bhattacharyya & Ohiare, 2012).

This limitation is directly related to the process of prioritization of the governmental sphere responsible for the policy, whether these definitions are imposed by conditions external to the process or not. By subordinating the electrification program to an exclusively policy of electrification, the agent responsible for formulating it will prioritize the generation of electric energy as an end goal, regardless of the quality of this supply or possible positive or negative externalities that the policy will have. Furthermore, by linking the process to the use of a single technology, one chooses to exclude the other technological options that may be applicable. This prioritization of one choice over another collaborates either to advance or to delay the progress of the electrification program.

Based on this scenario, the multi-objective policy analysis should consider the process of technical and political understanding, including priorities assumed about the adoption of specific forms of governance, definitions of technological options, and financing choices. Thus, there is a need for a systemic approach, which allows the decision-making process to distance itself from its usual generic character and also makes it replicable to other developing countries or realities.

From the systemic analysis of the Brazilian and Chinese experiences, the final objective of this article is to propose a decision making framework oriented to the policies of electrification, determining key points that make the process can be sustainable from the technological, financial and management structures points of view. It was also determined, from the evolution of the electrification process in both countries, scenarios for processes that ended in the universalization of electric energy service in rural areas.

In this way, this article is subdivided into six topics: a contextualization of the problem presenting the motivations; a topic describing the methodological process used; topics 3 and 4 that present the data and the respective analyzes of the electrification programs of China and Brazil; topic 5 that presents the comparative systemic analysis, showing scenarios for rural electrification from the case studies of China and Brazil; and finally the final considerations.

2. MATERIAL AND METHODS

The methodological process was outlined, firstly, through a comparative assessment (among political, regulatory, financing and technological decisions) between Brazil and China. After that, a decision-making framework directed to electrification policies was proposed.

In order to evaluate holistically the electrification program of China and Brazil, including variables related to quality of life and socioeconomic development, the following questions were suggested:

- Is it administratively sustainable? This question was raised and studied in the works of (Abdellah & Markandya, 2012, Aklin, Bayer, Harish, & Urpelainen, 2014, Andrade, Rosa, & Da Silva, 2011, Bazilian, Nakhoda, & Van de Graaf, 2014, Echeverri, Monga, Nakicenovic, & Schreck, 2013; Gómez & Silveira, 2015; Luo & Guo, 2013; Shyu, 2012);
- Is there available technology to be implemented and replicated? (Blum, Sryantoro Wakeling, & Schmidt, 2013; Fuso Nerini, Dargaville, Howells, & Bazilian, 2015; Fuso Nerini, Howells, Bazilian, 2015; Fuso

Nerini, Howells, Bazilian , And Gomez, 2014, Hirmer & Cruickshank, 2014, Holtmeyer, Wang, & Axelbaum, 2013, Lahimer et al., 2013, Mainali & Silveira, 2013, Poudyal & Paatero, 2014, Winkler et al., 2011, Zhaohong & Yanling , 2015);

- Is there available capital for necessary investments or for subsidies for the beneficiary population, given the magnitude of the program? This question was made in the following financing studies (Bazilian et al., 2011; Bhattacharyya, 2013; Delina, 2011; Gupta, 2016; IEA, 2011; Liming, 2009; Mainali & Silveira, 2011; Schillebeeckx et al., 2012; Ximei, Ming, Xu, Lilin, & JunRong, 2015);
- Was the population part of the procedure of formulating, implementing and managing the process and/or had any decision-making power that would collaborate with it? This was a central concern in the works of implementation of (Gómez & Silveira, 2010, 2015; Hirmer & Cruickshank, 2014; Parikh, Chaturvedi, & George, 2012; Poudyal & Paatero, 2014; Rojas-Zerpa & Yusta, 2015; Schillebeeckx et al (2005), Teixeira, Franco, & Litaiff, 2010, Van Els, De Souza Vianna, & Brazil, 2012, and Zerriffi, 2007).

Considering the questions above as the main points to be analyzed in this study, the method of joint evaluation of factors was used in this work (Bhattacharya, Paramati, Ozturk, & Bhattacharya, 2016; Schillebeeckx et al., 2012; Teixeira, 2010). These factors were called macro-factors and they converge toward the broadest goal of an electrification program, to promote the socioeconomic development.

Four macro-factors were defined: funding structures, governance structures, form of implementation and monitoring, and available technologies. Separately, these macro-factors were analyzed in a historical context for China and Brazil, justifying, in a systemic approach, the way adopted for the decision in each macro-factor. Then, the interactions between the four macro factors and the consequences on the final result of the rural electrification policy were analyzed.

Thus, the analysis will indicate four framing options for each macro-factor – governance, funding, technology and form of implementation and monitoring – indicating its importance in the process of rural electrification and socioeconomic development. Framing options and their degree of importance within rural electrification policy are:

1. It has no importance within the electrification policy;
2. It is contemplated, but has no/has little relevance;
3. It is relevant;
4. It is a key point.

Finally, systemic convergence analyzes the importance of the rural electrification process to boost socioeconomic development for the populations contemplated: it analyzes the degree of convergence of macro-factors to facilitate socioeconomic development for the regions included in government policies.

1. The policy is potentially relevant for aiding a process of socioeconomic development;
2. The policy is not relevant for aiding a process of socio-economic development.

Systemic analysis predicts that all factors participate in the process of socioeconomic development. Thus, in order to have minimum conditions, it is necessary that all factors are at least relevant, option 3, indicating, for systemic convergence, option 2, as follows in the table 1:

Table 1 - Systemic Analysis

Macro-factor	Framing options	Sistemic convergence
Governance	1. It has no importance within the electrification policy.	1. The policy is potentially relevant for aiding a process of socioeconomic development.
Funding	2. It is contemplated, but has no/has little relevance.	
Technology	3. It is relevant.	2. The policy is not relevant for aiding a process of socio-economic development.
Form of Implementation and Monitoring	4. It is a key point.	

The size of the forms that represent the macro-factors also served as an indicator of importance and priority of one over the other, providing clues about the decisions and objectives proposed by the government policy studied.

Next step was the preparation of a Figure with the main conclusions and recommendations of each macro-factor for Brazil and China, correlating the results with evolution and stage of rural electrification observed in each country. From the analysis of the interaction between the four macro factors, highlighting positive and negative aspects of the process in detail, it was possible to describe recommendations for rural electrification policies that have this three specific objectives: universalization, rural electrification or socioeconomic development.

The sequential structure of analysis is presented in the flowchart contained in Figure 1.

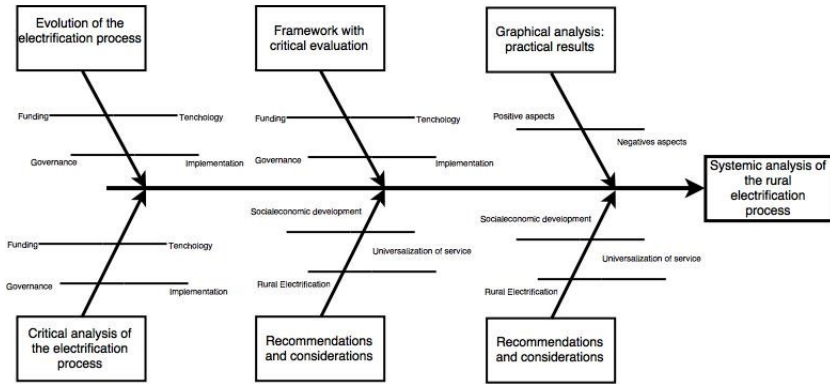


Figure 1 - Methodological structure

3. THE PROCESS OF RURAL ELECTRIFICATION IN CHINA

With a population of 1.3 billion people, much of it still living in small towns, China has unique characteristics regarding the process of rural electrification and its connection with economic development. Considering the size of the population, it is a remarkable achievement the implementation of a policy that universalized the electric service in urban areas and benefited 99% of the inhabitants of rural areas at the end of the first decade of the 2000's.

The policy for rural electrification in China, mainly after the economic reform of 1979 in the rural areas, establishes that the promotion of universal service, together with policies for the modernization of agriculture and the stimulation of the industrialization of cities and towns, is an opportunity to foster national industry and generate income. In addition, it promotes direct and indirect externalities for economic development at local, regional, and national levels (Bhattacharyya & Ohiare, 2012; Yisheng, Minying, & Zhen, 2004).

Out of a lot accumulated experience, the country started from a nonexistent electricity service in the rural areas in the 1950's to 99% of its population served in the 2000's (Bhattacharyya & Ohiare, 2012; Yisheng et al., 2004). Table 2 shows the main characteristics of the rural electrification policy in China from 1998 on.

Table 2 - Summary of the Main Characteristics of Rural Electrification Policy in China since 1998

Rural Electrification Policy in China from 1998 on	
Variable	Characteristic
Primary objective	Rural electrification and promotion of socioeconomic development for rural areas.
Main financial agents	Central Government directly. Development agencies, banks, and private initiative indirectly.
Type of policy formulation	Top-down: formulation by central government alone.
Type of policy application	Bottom-up: implementation by the concessionaires and local and provincial governments, with participation of the population involved if considering distributed generation.
Main points	Subsidized tariffs.
	Financing and stimulating the use of renewable sources.
	Financing economic activities.
	Financing the acquisition of autonomous systems of electric power generation.

Since 1998, the so-called Plan to renovate rural grids has been launched pursuing the goal of modernizing the structure of electric energy service in rural areas in locations already served, which would reduce system losses and provide more security and reliability to the system. Up to 32 billion euros was available for the plan, with a five-year completion date. Thus, in 2003, official data presented significant reductions in energy losses, below 10% for high voltage levels and below 12% for low voltage in rural networks (Bhattacharyya & Ohiare, 2012; Zhaohong & Yanling, 2015).

In 1999, the Brightness Program was implemented, which lasted until 2002. The program initially served to implement pilot projects for the generation of electric power in a distributed way in isolated locations, opening comparative parameters for: forms of financing; possible sources of energy; generation and maintenance costs; and political governance of the process. Following the initial phase, the program was meant to reach up to 50,000 people in northern China and in the provinces of Mongolia, Tibet, and Gansu (Bhattacharyya & Ohiare, 2012; Zhaohong & Yanling, 2015). Through direct financing and subsidies, the central government made a contribution of 5.5 million euros to pilot projects and up to 1.3 billion euros for the remainder of the program's

duration (Bhattacharyya & Ohiare, 2012, Shyu, 2012).

Starting in 2002, with the first phase scheduled to last until 2005, the Township Electrification Program is launched as the largest rural electrification program in the world in terms of investments, financing, and number of electrical connections (Shyu, 2012; Zhang & Kumar, 2011). The problem was to adjust the policy so that towns and cities considered isolated in geographic terms could be contemplated with electrical energy in an uninterrupted and reliable way (Zhang & Kumar, 2011).

To do so, by taking advantage of the know-how acquired in previous programs, the central government in China considered for each case several distributed generation options, which stimulated mainly the use of renewable sources, such as: Small Hydroelectric Power Plants (SHPPs); photovoltaic systems; wind systems; hybrid systems, and small coal-fired thermals already used in some locations. In addition, the program suggested that the use of small networks where feasible. It was also stressed that the whole process should include productive activities and the local population as an interested party, as well as local governments and concessionaires - public or private – when they were present (Liming, 2009; Teixeira, Lopes, & KN Cavaliero, 2010).

The program's initial goal was to reach at least 1 million people in 1,000 districts in northern and western China, including the provinces of Xinjiang, Qinghai, Gansu, Shaanxi, Sichuan, Hunan, Yunnan, Tibet, and inland regions of Mongolia (Zhaohong & Yanling, 2015). In terms of individual electrical connection, it was stipulated as a goal the delivery of 100 watts per person safely and uninterrupted (Shyu, 2012).

By the end of 2005, another 600 million euros were made available by the central government to the program, making it possible to compute more than 1,000 districts, towns, and communities resulting in more than 1 million people contemplated in the program. Table 3 shows a summary of the amounts available for the 1998 to 2005 plans:

Table 3 - Summary of the amounts available for 1998-2005 plans

Program	Amounts in CNY (RMB)	Amounts in Euros
Brightness Programme (pilot projects)	40,000,000	5,575,200
Total Brightness Programme	9,880,000,000	1,377,074,400
Township Programme	4,700,000,000	655,086,000
Program and 1998 to 2003 renewal of the rural network (CYN/RMB)	230,000,000,000	32,057,400,000

*The Euro quotation of 01/28/2016 was the amount of 0.14 CNY (RMB);

Since 2005, plans have been focusing on reducing economic and social disparities between rural and urban areas, promoting rural electrification. In 2007, these plans resulted in the universalization of services in large and medium-sized cities and a level of service that reached over 99% of the population of geographically isolated villages and communities. All this process has been mostly supported by the central government (Luo & Guo, 2013). Table 4 shows the evolution of electrification in China.

Table 4 - History of the Rural Electrification Rate in China between 1978 and 2015

History of the Rural Electrification Rate in China (%)				
Index	1978	1998	2010	2015
Township	86.83	98.20	99.72	100
Village	61.05	98.10	99.76	100
Household	59.4	93.87	99.93	99.99

In recent programs, the massive use of renewable sources for distributed generation has been favored, interconnected or not to the national main network. Programs such as Village Electrification Program, which favored SHPPs, solar systems, and hybrid systems benefitted over 20 thousand villages with isolated electric power generation systems, between 2005 and 2010. According to Zhaohong & Yanling, 2015, this phase also counted on the support of international agencies in conjunction with the central government and local governments.

Based on the main data presented, a summary of the process of rural electrification in China can be assembled since 1998:

- Regarding funding: strong support from the central government, with smaller contributions of local governments, international development agencies, and private banks;
- Regarding the technology used: government incentives to universalize service and rural electrification directly, focusing on the massive use of SHPPs, photovoltaic systems, mini-coal plants and interconnection with the system, with renewable sources taking precedence over distributed generation;
- Regarding governance: policy formulation by central government, large participation of local governments, concessionaires, and cooperatives for electric power generation. In certain projects, participation

of the population, involved in choosing the technology for distributed generation;

- Regarding the form of implementation and monitoring: the greater responsibility is attributed to the concessionaires or governments responsible for the supply of electric power. They are also responsible for the maintenance and operation of the system and for possible increases in the amount of electric energy offered.

Table 5 - Summary of the Characteristics of the Electrification Process in China between 1998 and 2014

Summary of the electrification process in China from 1998 on	
Aspect Analyzed	Values/References
Governance	<p>Formulation: central government;</p> <p>Implementation: concessionaires, cooperatives, and local governments;</p> <p>Additional responsibilities: the concessionaires and local governments are responsible for the generation and distribution of electric energy.</p>
Funding	<p>Agent responsible: Mostly by the central government directly (subsidies and direct specific financing lines);</p> <p>Value (until 2005): 34,095,135,600 (CNY/RMB).</p>
Technology	<p>Initial priority: extension of distribution and transmission lines.</p> <p>Other features: use of large-scale distributed generation for geographically isolated communities; great diffusion of the use of renewable sources after governmental stimulus.</p>
Form of Implementation	<p>Main: through several programs for rural electrification;</p> <p>Responsible agents: concessionaires, cooperatives, and local governments;</p> <p>Other agents involved: the beneficiary population participates in part of the process related to distributed generation;</p> <p>Other features: the electrification policy pertaining to a series of policies with the greater objective of promoting economic development.</p>

3.1 Systemic analysis of the rural electrification process in China

Table 6 - Decision-Making Process - China

Decision-making process			
Macro-Factor	Structure used	Decision-making process	Negative aspects
Governance	Governance is poorly defined.	The structure chosen in the decision-making process provided more rapidity in the process of rural electrification. In addition, it involved the beneficiary population in specific parts of the process.	The governance focused on fast fulfillment of goals and creation of high numbers of electrical connections, result in problems of management, overlap, and lack of definition of skills for a second phase. Therefore, that delayed the fulfillment of the whole program and jeopardized the connection with other policies for rural development.
Funding	Mainly through public funding, including all government spheres.	It clearly defines the importance of public funding for increasing speed, notably where there is no economic attractiveness. In addition, it allowed the attraction (even to a lesser extent) of private capital, international development agencies, and banks.	There is criticism of the excessive level of subsidies, especially for renewable sources, not considering system maintenance needs and improvements in network (or mini-networks) quality.
Technology	Mainly through interconnection with the existing network; however, on the second stage, there is a great emphasis on distributed generation.	From an extensive and targeted government policy, it provided the rapid development of technologies to meet the needs of electrification in rural areas. It is a problem overcome in the Chinese case.	Only the absence of a clearer and more direct link with development in rural areas is highlighted.
Form of Implementation and Monitoring	participation of all the agents involved and benefited in parts of the process.	It was favorable to the rapid increase in the number of electrical connections, with a strong emphasis on the participation of the beneficiary population in the stage of implementation and in case of distributed generation.	It has flaws related to the participation of all the agents involved, especially if the process is analyzed from a socioeconomic development perspective. Over focused on the implementation of electric energy; however, the monitoring and even the management and operation of the implanted systems was relegated to second place. Revisions are required.

The analysis of the macro-factors in Table 6 concluded that the decision-making processes were structured with a greater focus on the universalization of electric service. This preference has resulted in few clear and replicable interconnections for the promotion of improvements in the quality of life of the population (observed only in some cases) and socioeconomic development. This occurred even considering that the macro-factors had internal structures for these improvements and development to be performed, based on the productive use of electricity in rural areas.

It should also be noted that there are important consequences of the decision-making process, such as the development of industries and productive chains of technologies for the use of renewable sources; however, these are not directly related to a process of socioeconomic and local development for the rural environment.

3.2 The learning about the electrification decision-making process in China

The program for the universalization of electric energy and rural electrification in China has the most success on the decisions based on the learning regarding technological and financing aspects. The energy policy, which encompasses rural electrification, provided sufficient capital and technological alternatives to make the process moved on rapidly and to promote positive developments for the national industry, more specifically regarding renewable energies such as wind, solar, and small and medium-sized hydroelectric.

On the other hand, the process did not bring about significant changes in quality of life improvements and socioeconomic development at the local level, due mainly and coincidentally to the rapid advance of the new electric power connections provided by the rural electrification program. The large number of concessionaires and state-owned companies responsible for the generation and distribution of electric power, which since 1998 gained autonomy to carry out the process at local level, ended up harming the management of the program after the implementation phase. Moreover, this caused problems regarding the efficiency and quality of the network, such as constant power outages.

It should be stressed that this is a governance problem, which can be solved by applying clearer rules about the responsibilities of each agent in each stage of the process and by monitoring it. In fact, the universalization policy should propose a tariff structure that is as horizontal as possible, but that also includes differential tariffs or decreasing subsidies to attract private capital or to make the electric power

supply efficient even for public and cooperative concessionaires.

It is also necessary to provide conditions for the maintenance of electric energy service in the Chinese countryside from the consumer's perspective. A more solid path is crucial for the generation of income in a sustainable way for the population served regardless of its location. The rural electrification program analyzed here proves that with a suitable financing structure and the use of available technologies, it is possible to provide infrastructure for socioeconomic development. This way, a new structure does not have to be built, but old ones can be modified and adapted to make improvements in quality of life and local development possible.

That is, if for the implementation process this structure was good enough, for management it was not the best choice, requiring at least better inspection and clear definitions of attributions regarding the management, maintenance, and operation of generation systems, especially when done in a distributed way. In 2015, these problems were obstacles to the effective use of electric energy as a vector for socioeconomic development in regions that are still behind.

In conclusion, the structure defined for China's rural electrification policy was more successful due to solid financing structures and technological choices than because of its structures for implementation, monitoring, and governance. The first two ended by leveraging the process while the latter worked as a brake on it, in 2015.

Finally, it is understood that the objective of harnessing electric energy as a vector for the promotion of economic development will only succeed if the process is integrated, offering the same weight for governance, form of implementation, and monitoring at the local level. Table 7 shows the integration of the macro-factors in a systemic analysis aimed at the socioeconomic development of the contemplated population.

Table 7 - Systemic Analysis of the Rural Electrification Process in China

Macro-Factor	Framing options	Systemic Analysis
Governance	2. It is contemplated, but has no/has little relevance.	1. The policy is potentially relevant for aiding a process of socioeconomic development.
Funding	4. It is a key point.	
Technology	4. It is a key point.	
Form of Implementation and Monitoring	3. It is relevant.	

4. THE PROCESS OF RURAL ELECTRIFICATION IN BRAZIL

Rural electrification as a federal government policy came to prominence only in the 1990's. Previously, small programs and pilot projects under state enterprise responsibility had been observed; however, they had no significant impact in reducing the number of electrically excluded people. At the beginning of the 21st century, according to (IICA, 2011), there were around 10 million inhabitants without electricity. This number increased during the first decade, especially when isolated regions in the North of the country were taken into account. Before, there were no accurate socio-demographic data available about these regions.

From 2003 on, Brazil has started to rely on a policy focused on the universalization of electric energy service in the country, paying considerable attention to rural electrification. In 2015, the program known as the "Light for All Program (LfA)" has reached 99% of rural and urban residences (Teixeira et al., 2015).

Also noteworthy are the large number of electrical connections made from the extension of distribution lines in the first stage of the program and the strong commitment of privatized public service concessionaires. On the other hand, a large gap is observed regarding the scope of the program for the isolated systems in the Amazon region, the last frontier of LfA. This is the main point to be considered in this work, based on macro-factors analysis in tune with the decision-making process for the program.

The beginning of the 1990's saw the emergence of the first programs aimed at the provision of electricity in rural areas as a public policy. In this first moment, the main objective was to acquire technical, economic and political know-how. It was not yet practical to universalize the supply of electric energy for the whole population, be it rural or urban.

With regards to rural electrification, from 1990 on, the following stand out:

- The State and Municipal Energy Development Program (Prodeem) started in 1994, with the main objective of promoting the energy supply to isolated communities, specifically to institutions and community units, such as schools, health posts, associations, etc. The program made use of renewable energy sources available in each locality (SHPP, biomass, solar, and wind energy). According to (Vianna, 2007), in practice it was verified the predominance of the installation of photovoltaic panels directed to water pumping and community lighting. After the beginning of the review, evaluation, and

restructuring of the program in 1998, management problems were noted, such as the ownership of solar panels installed in private areas. This showed and corroborated the power of large farmers in rural areas. In addition, another problem was evident as well as: maintenance. There were several unused photovoltaic systems and panels for complete lack of simple maintenance (Teixeira, 2010);

- The Program Light in the Countryside (PLC) started in 1999 and ran until 2002. Its main objective was of promoting the electrification of up to 4 million rural properties, mainly small and medium-sized enterprises, raising the level of service to 50% of the rural population until the end of the program. In essence, problems were observed in the governance process, with the absence of a central figure to manage, prioritize goals, and monitor the program. In addition, it was observed a capital lower than necessary for the full feasibility of the PLC (Teixeira, 2010; Viana, 2007).

4.1 The Program Light for All - LfA

Using the regulatory framework that was part of the Law 10,438/02, about the Universalization Program of electric energy service, and also of decree 223/03, which advanced the deadline for meeting the goal of universalization for the year 2008, LfA was officially created in 2003, by Law 4,873/03, amended by Law 10,762/03 and Decrees 7,250/11 and 8,387/2015 (MME, 2015a).

The main objective of the policy of universalization of electric energy service in Brazil was:

guarantee access to the public electric energy service to the portion of the population of the Brazilian rural area that does not yet have access to this public service; improve service to the beneficiary population, increase the pace of service, and mitigate the potential tariff impact, through the allocation of subsidized resources and the complement of financed resources (MME, 2015a).

From then on, the government hoped to use electric energy as a vector of socioeconomic development, contributing to poverty reduction and increasing family income. They planned to extend distribution lines where there would be economic viability and the implementation

of decentralized generation systems, through isolated networks and individual systems (Teixeira, Lopes, & Cavaliero, 2010). To do so, the selected viability criteria made it possible to prioritize service projects based on the productive use of electric energy, the potential for fostering the integrated development of localities, and projects that allowed the development of family agriculture and even family-based handicraft activities (MME, 2015a).

According to the program, investments are made by the federal government, state governments and municipal governments, in addition to public and private electric energy concessionaires, when required or allowed. The participation of the three main actors, federal government, state governments and concessionaires were defined as being 80%, 10%, and 10% respectively. Executing agents should be concessionaires and licensees of electricity and, where appropriate, rural electrification cooperatives.

In 2009, the federal government extended the program until 2010 and, based on the Law 60/2009, decided to create what it called “special projects” within the LfA. These “projects” had the clear objective of providing attractiveness to the electrification process in the isolated systems of the northern region of Brazil. In these cases, although the implementation of the program progressed, the electrification of new localities, mainly isolated communities located in the Amazon region, was less than expected, totaling more than 100 thousand households not included in 2009. For the State of Amazonas, until 2008, only 24% of the total had been completed, without considering at this time the update in the number of people to be contemplated (Di Lascio & Barreto, 2009).

The “special projects” were characterized as projects geared to regions where it was not possible to extend transmission lines and that presented low levels of demand, such as isolated communities geographically located in the legal Amazon, allowing the incentive of distributed generation (MME, 2015a).

However, since the deadline for the universalization of electric energy service still remained the year of 2010, the program is renewed once again, including a regulation that allowed a more economically attractive division of costs among the agents involved in the program, especially when related to the “special projects”, leading to energy auctions. It was also allowed to use the Fuel Consumption Account (FCA) for the reimbursement of generation costs not covered by original LfA resources (PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA - CASA CIVIL, 2011).

In all, the program completion period has been extended three times, aiming to provide new impetus for the achievement of goals in the regions with a long delay. The last extension, carried out at the end of 2014, foresees the termination of the LfA by the end of 2018. The goals

reached until 2015, the changes, and the expected goal until the end of the program are presented in Table 8.

Table 8 - Goals and Number of Families Reached by the Program Light for All - 2004 to 2015

LfA service goals			
Goal change	Goal completion year	Service goals/families	Increase in comparison with initial goal %
	2008	2,000,000	
First	2010	1,000,000	50
Second	2014	715,939	35.8
Third	2018	207,000	10.4
	TOTAL Goal LfA	3,922,939	196.1
	Families reached up to July 2015	3,222,933	
	Balance for 2018	700,006	35
	Difference goal 2018/balance 2018	493,006	24.7

The annual data on the number of people benefited and the investment contracted in the program (Figure 2) show the great reach and exponential growth in the number of served families, mainly between the beginning of the program and the year 2010. In the following years, a reduction of service is observed. They were caused by the proximity of the final universalization goal and due to the technical and geographical difficulty in meeting the new demands detected.

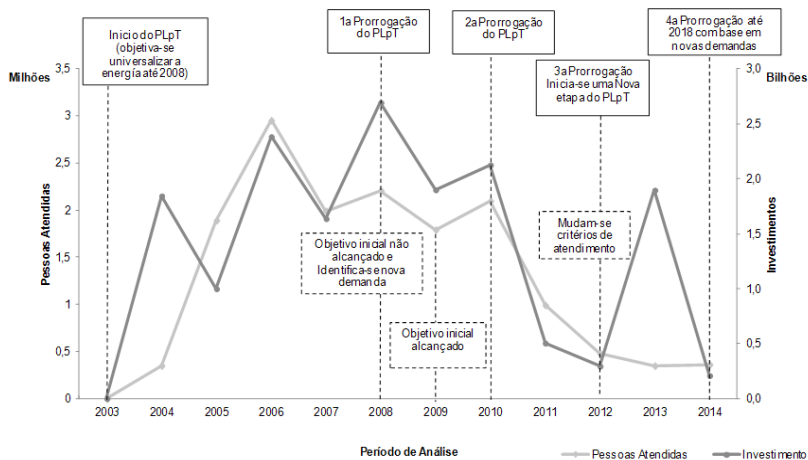


Figure 2 - Number of People Served and Investment Contracted under the LfA Program - 2004 to 2014

About tariff subsidies, no special tariff was provided for the duration of the LfA program. However, Brazilian legislation already includes and constantly revises special rates for low-income families, for rural properties and rural settlements. Moreover, considering a new regulation of 2010, it was possible to charge based on a prepaid electricity supply system, which although not directly included in the LfA legislation is directly related to it (Tavares, 2014).

The summary of the organization and structure of the program for rural electrification in Brazil is presented in Table 9:

Table 9 - Goals and Number of Families Reached by the Program Light for All - 2004 to 2015

Rural electrification policy in Brazil since 2003	
Variable	Characteristic
Main objective	Universalization of electric energy service, including rural electrification and promotion of socioeconomic development for rural areas.
Main funding agent	Central Government directly, state governments directly, municipal governments with voluntary participation, public and private concessionaires directly, and development agencies and banks indirectly.
Type of policy formulation	Top-down: formulation by central government alone.

Table 9 - Goals and Number of Families Reached by the Program Light for All - 2004 to 2015 (continuation)

Variable	Characteristic
Application type (implementation)	Top-down: implementation by public and private concessionaires, without the participation of the beneficiary population in the decision-making process and in no stage.
Main points	Indirectly subsidized rates.
	Financing and encouragement of the extension of distribution and transmission lines.
	Financing for renewable energy with indirect influence on the process.
	Amendment to contemplate distributed generation applicable to isolated systems.

4.1.1 Systemic Analysis of the process of rural electrification in Brazil

Table 10 shows the political structure of the process of rural electrification in Brazil.

Table 10 - Decision-Making Process - Brazil

Decision-making process - Brazil			
Macro-Factor	Structure used	Decision-making process	Negative aspects
Governance	The governance is public and private. In both cases, it is well defined.	The decision-making process for governance counted on the participation of private initiative and government spheres. It was structured in such a way as to provide management, implementation, and monitoring in a well-defined way. To reach levels close to the universalization of electric energy service.	The established governance neglected different realities from that observed in most of the national territory or of the interconnected system. Doing this institutionally until 2009, the governance delayed and underestimated the organization needed to stimulate rural electrification in areas far from urban centers, such as isolated systems in the northern region of the country.

Table 10 - Decision-Making Process - Brazil (continuation)

Macro-Factor	Structure used	Decision-making process	Negative aspects
Funding	The goal of 99% of urban and rural population was reached in the expansion phase of the interconnected network, that is, the process was carried out mainly through the interconnection with the existing network.	The decision-making process for the macro-factor "funding" elected the government as a great guarantor of the process, guaranteeing necessary inputs for its rapid progress. This was mainly done with the purpose that the LfA reached economically unattractive regions, which in fact occurred, as long as these regions belonged to the interconnected system.	The macro-factor "funding" needs to be reformulated to incorporate attractiveness to the isolated systems, since even including direct funding for the implementation phases and operation and maintenance costs, the advancement of the electrification process in the isolated systems was not observed.
Technology	The process was led by contributions from the government spheres, but also conditioned to the participation of private concessionaires.	For much of the Brazilian territory the technological option was the interconnection with the existing system. The decision was based on the fact that the system is already structured, in addition to providing a rapid evolution in the number of families served.	The stimulus to the use of distributed generation for isolated systems exists, but it is not good enough for it to be used. The program should be restructured again, reviewing aspects of funding and governance for isolated systems.
Form of Implementation and Monitoring	With most of the connections being the responsibility of the concessionaires, due to the extension of the interconnected system, there was no decisive participation of all the agents involved in the process, especially the absence of the beneficiary population in cases of distributed generation.	The participation of all agents in the implementation process in the case of the interconnected system is not necessary. This portion of the service representing the majority of the families reached indicates that the form of implementation and monitoring adopted, at least for the first stages, and directed to the interconnected system, was the correct one.	For the isolated systems, the form of implantation must involve all agents, incorporating criteria directed to improvements in quality of life and socio-economic development.

In Table 10 is should be noted that the decision-making process clearly precluded isolated systems in the early stages of the program. The government tried to work around the problem in the following phases, from 2010 onwards. This scenario has relegated isolated systems to the background. They still need, in 2016, new and differentiated

structures of attraction of private investment or of governance that allows a greater number of connections (Gomez and Silveira, 2010) (Teixeira et al, 2015).

4.1.2 The learning about the electrification decision-making process in Brazil

The systemic analysis of the rural electrification process in Brazil shows that the program has valued the four macro-factors approximately, similarly, presenting a slight preference for financing and technology structures. But this scenario it was reached only when the Brazilian integrated system is analyzed, without the inclusion of distributed generation, the program developed satisfactorily (Table 11).

Table 11 - Structure of Systemic Analysis for the Electrification Process in Brazil: Interconnected System

Macro-Factor	Framing options	Systemic Analysis
Governance	3. It is relevant.	1. The policy is potentially relevant for aiding a process of socioeconomic development.
Funding	4. It is a key point.	
Technology	4. It is a key point.	
Form of Implementation and Monitoring	3. It is relevant.	

In Table 11 and 12 is noted that efforts to structure and mature the macro-factors “technology” and “funding” were fundamental in achieving the program’s electric service goals. In addition, they were essential, to a large extent, for the universalization of electric energy service; however, they were not enough for the objective of promoting socioeconomic development. This will only be achieved by also strengthening the structures of “governance” and “form of implementation and monitoring”.

In the analysis, when the isolated systems were included, even after the adaptation of the program, a better adjustment towards the socioeconomic development was not obtained. This is because the proposed structures were not enough. Table 12 shows that the electrification was initiated but did not evolve satisfactorily.

Table 12 - Structure of Systemic Analysis for the Electrification Process in Brazil: Isolated Systems

Macro-Factor	Framing options	Systemic Analysis
Governance	2. It is contemplated, but has no/has little relevance.	2. The policy is not relevant for aiding a process of socio-economic development.
Funding	3. It is relevant.	
Technology	4. It is a key point.	
Form of Implementation and Monitoring	2. It is contemplated, but has no/has little relevance.	

5. STRUCTURE FOR THE CREATION OF RURAL ELECTRIFICATION PROGRAMS INTEGRATED WITH THE GOAL OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT IN DEVELOPING COUNTRIES

Based on the systemic analysis carried out for the cases of Brazil and China, there is a series of needs and problems inherent to the process of rural electrification considering four macro-factors: governance, funding, technology, and form of implementation and monitoring.

The evolution of electrification programs in Brazil and China made it possible to observe the importance of the political structure used to universalize the electric service, especially in rural areas. However, given the challenge of promoting socioeconomic development, priority should be given to the integration of electrification policies and the promotion of income generation. This should be done, to a certain extent, by providing a shorter time frame for socioeconomic development to be completed, like in certain regions of Brazil and China.

The scenarios presented in the early 2000's and even earlier, including qualitative and quantitative factors for the definition of rural electrification policies, were optimistic about the success of creating an economic development process. However, contrary to what was proposed, the electrification process indicates segregated and consecutive public policies for electric energy to emerge effectively as a vector for socioeconomic development.

That is why an electrification program should consider in its structure the four macro-factors: governance, funding, technology,

and form of implantation and monitoring. These should be aligned and hierarchized according to the characteristics of the place or region where it will be implemented.

5.1 Funding and technology structures: priority scenarios for universal service and rural electrification

“Funding” and “technology” structures are the key macro-factors to begin the process of universalization of rural electrification or to gain momentum, as evidenced in the learning process and in the successful evolution of policies and programs in Brazil and China.

The structure set up by both countries favors direct public financing, but private capital participation is not negligible. Based on that, it can be concluded that the greater the government support, either by providing solid structures for private funding or directly supporting, the greater the scope and the speed with which the process will evolve.

Regarding the “technology” macro-factor, a large range of available alternatives increases the amplitude and the speed of the program advance in terms of number of electrical connections. Given available options, including forms of funding, practical applicability is a matter of choice.

The distance between rural electrification policy and other policies, as shown in the cases studied, underlies its structure and conditions its success to the efficiency of the macro-factors “funding” and “technology”. That is, the difficulties of managing the systems as soon as they were implemented in Brazil and China have prevented or delayed the evolution of the electrification process, sometimes forcing the prioritization of the number of connections to the detriment of quality of service. This was just made to reach the goals regarding the number of new services.

In addition, it is understood that prioritizing the number of connections over quality negatively influences other expected effects, such as increasing income generation and improving quality of life. This will eventually happen, even though the management of an electrification program towards the trade-off - making new connections or promoting improvements in the quality of life - will opt for the first alternative, especially when the beginning of the program depends on this decision.

Also, based on the line of priorities mentioned before, it can be seen that in other countries, where rural electrification and even electricity supply are not a social reality, there are no political structures that would be able to lead to:

- External funding from private capital.
- Well-defined governance structures, with clear goals and objectives, since there are no previous programs and policies, and there is no previous know-how about government and concessionaire structures to manage the electrification process in rural areas, especially at local and specific levels. That is, there is no clear definition of private financing structures also at a domestic level.
- Political and social maturation to promote the participation of the beneficiary population in the process, both in terms of the supply of raw material for electric power generation and for the use of local potential for income generation.
- The definition and selection of technologies for the universalization of rural electrification and electric service. They are incomplete or limited, although available in specific projects and financing. That is, there are not enough alternatives for each situation, especially with regards to distributed generation.

In those cases, it is preferable to start the process from a qualitative increase of electrical connections, even if it just serves for a short learning process. That is, the formulation of realistic policies and programs should be preferred rather than projects with unattainable objectives. In other words, energy programs can be constructed considering three medium-term scenarios, based on the know-how developed in Brazil and China, within a period of 10 to 20 years.

Scenario 1 with realistic funding structures, even if they are mostly or exclusively public, but which provide security for the beginning and development of the process. Furthermore, the definition of technological structures for primarily economic processes, by providing adequate alternatives to the current reality, even if these technologies are not initially available in the domestic market. Considering this configuration, the probable outcome is an increase in the absolute number of connections, neglecting problems of system reliability in the medium term, as well as uncertainties regarding the governance, including the tariff structure (Figure 3).

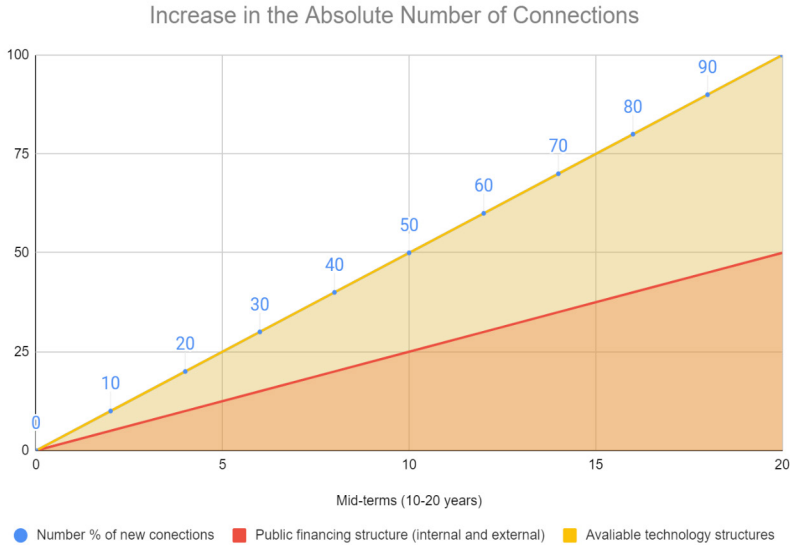


Figure 3 - Increase in the Absolute Number of Connections in the Electrification Process (Funding + Technology)

- Possible issues: system reliability and governance issues.

Unbalanced “funding” and “technology” structures may lead to regulatory uncertainties in financing, insufficient amounts of capital, and lack of commitment from government spheres. From the technological perspective, it can also result in lack of definition of incentive structures and no selection of the appropriate technologies. In this case, even the absolute increase in the number of connections may not happen, since such uncertainties result in discontinuation of investments (even public ones) and shutdowns of programs in progress.

In general, such scenarios are those currently observed in several countries that have not yet developed an internal and mature policy of universal service and rural electrification.

In Scenario 2, it is concluded that by providing few funding structures (or unreliable structures), even considering the structures of technology selection well developed, the number of new services will not be satisfactory. This is mainly because, in terms of distributed generation, the process will be stagnant if there is not strong involvement of government spheres acting as funding agencies (Figure 4).

Stagnation of the Number of Connections

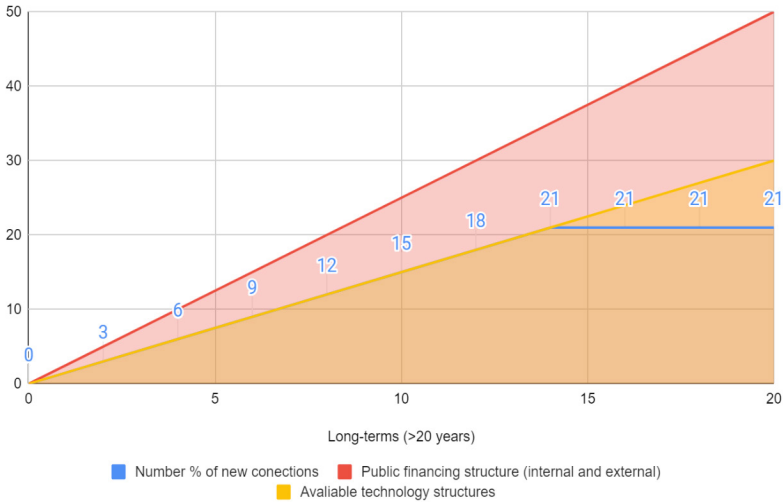


Figure 4 - Stagnation of the Absolute Number of Connections - Larger Weight for Technology

- Possible issues: Without large-scale financing structures, although with available technologies, there will be a long term for the universalization of electric energy service.

Likewise, Scenario 3 shows a stagnation because of weak and unavailable structures of technology selection. Therefore, it presents a small number of new connections even if there are consolidated (internal or external) financing structures, since the absence of suitable technologies for each situation makes it impossible to provide distributed generation in rural regions (Figure 5).

Stagnation of the Number of Connections

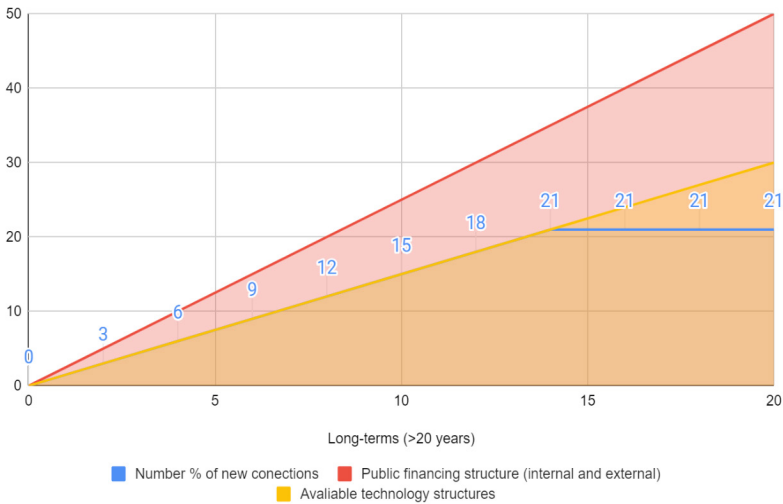


Figure 5 - Stagnation of the Number of Connections - Larger Weight for Funding

- Possible issues: Without available technologies, but with funding structures, there is an indefinite deadline for completing the process.

5.2 Governance, implementation and monitoring structures: scenarios for expanding the objectives of rural electrification

The adoption of structures that allow for the participation of the beneficiary population, government, and private enterprises, in addition to economic planning through a clear and well-defined policy directly encourages the symbiosis between the energy policy focused on rural electrification and other policies to promote socioeconomic development.

The electrification process in Brazil and China have presented cases in which the macro-factors were unbalanced, resulting in electrification, but not in socioeconomic development.

Thus, if on the one hand the use of reliable financing structures and the expansion of the range of technologies available for the electrification process lead to a large number of people served in the short and medium term, on the other hand, the use of electric energy as a vector to the beginning and development of a process of income generation at the local level was not observed. This occurred even assuming that the horizons of implantation of the electrification process and observable changes in terms of socioeconomic development are different, and that more time is needed to observe substantial changes in socioeconomic development.

The problem of the practical application of the rural electrification program occurs because providing the same level of importance to implementation and monitoring structures does not depend exclusively on the formulation of the program. Even if the program is modified and adapted to contemplate new realities, such as isolated localities (Brazil) and forms of distributed generation (China), the changes will not be enough if there is no linkage of the electric policy with other policies for income generation and local development.

This is the main reason why this macro-factor does not directly influence the progress of the electrification process. It is not directly linked to this process, because it has in its roots aspects that, if on the one hand are also goals of the process of electrification, on the other, do not depend on it to happen.

Consequently, the macro-factor “form of implementation and monitoring” should have the same weight and importance since the beginning of the process, as long as this process clearly includes interconnections with other public policies and objectives besides electrification, that is, if rural electrification is included in a larger policy for local and regional development. Otherwise, as observed in the case studies, this macro-factor can be left to a second stage. Therefore, as observed in the previous topic, this would lead to a rural electrification program with an increase in the absolute number of connections, without positive results regarding the creation of income locally.

As for the last macro-factor, “governance”, in an analogous way, its integration will indicate the sustainability of the process, as well as provide bases for the monitoring to be carried out, including structures of a PIR in its essence. In the cases of Brazil and China, it was noticed that well-defined governance structures guarantee these aspects to the rural electrification program. Specifically, in the case of Brazil, it was also noticed an increase of the number of connections in a sustainable way.

In the absence of long-term governance-related agenda, as well as a lack of clear definitions of responsibilities after the implementation of electricity generation, the process is bound to cope with structural problems. For example: lack of system reliability, which results in

constant power shutdowns. In addition, poor governance policies also lead to undefined tariffs, which cause distrust to final consumers, alienating potential investors, such as private capital. This scenario, in addition to delaying the progress of the rural electrification program, leads to a lack of definition that impairs the beginning or maturation of a process of income generation and socioeconomic development, since the structures necessary for it to start become unreliable and have no guarantees in terms of governance that will be achieved.

These governance structures should be associated with improvements in the quality of life. By considering the sustainability of the rural electrification process after the implementation of electric energy, it would be ensured that residential electricity would be sufficient for the use of refrigerators for food preservation, the use of radios and televisions for entertainment, more study hours at night, and even the use of washing machines and machines able to heat or cool the house. It is noteworthy that these elements, while indicating clear improvements in quality of life, do not necessarily indicate a socioeconomic development in a sustainable manner, such as an increase in the income levels.

Like the macro-factor “form of implementation and monitoring”, the absence of clear and defined governance structures will not make the rural electrification process unfeasible, especially when the process is finalized at the moment of the electric power supply. However, by associating the process with a higher level of efficiency, with attracting private capital, and with a process of socioeconomic development, this macro factor should have the same weight as the others. Its importance should be well-defined and carefully applied since the beginning of the rural electrification program formulation, whether linked to an energy policy or to broader local development policies.

Finally, from a systemic point of view, it is possible to conclude that the process of rural electrification can be initiated and supported by well-defined financing structures, whether public or private, and by the technological options available for each case, especially regarding the interconnection with an existing network or distributed generation. This should happen if the process is associated only with an increase in the absolute number of connections and terminated at the beginning of the electric power generation.

However, the rural electrification program designed in this way will present structural problems such as lack of definition of tariffs, lack of medium- and long-term planning, and interruptions in the supply of electricity due to low load sizing for the system, etc. This will cause low reliability of the electrification process and will alienate the private capital necessary to socioeconomic development.

Aiming at the sustainability of the program and the possibility of achieving objectives related to the improvement of quality of life and socioeconomic development, the four macro-factors must be integrated

and given equal importance: “funding”, “technology”, “governance”, and “form of implementation and monitoring”. It is expected that since the planning stage the government defines clear responsibilities, a correct load sizing, fair electric energy tariffs, and the plan to expand the networks prioritizing the reliability of the system.

Furthermore, in addition to promoting a program based on the integration of the four macro-factors, the connection of the electrification program with other development policies will also be necessary. Figure 6 summarizes the model considering the four macro-factors analyzed in this study, as well as their influence overall process.

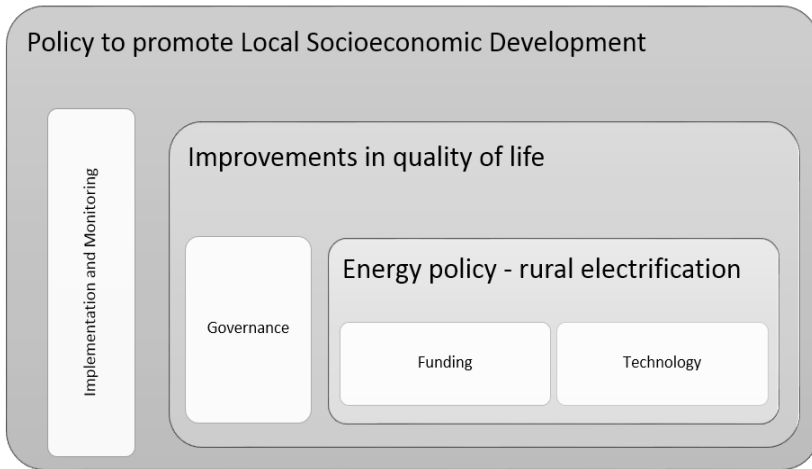


Figure 6 - Implementation Model Based on the Macro-Factors Studied

6. COMMENTS AND FINAL CONSIDERATIONS

The inclusion of a rural electrification program, of a program to provide universalization of electric energy service, and even the association of an energy policy to policies for sustainable socioeconomic development for developing countries are much desired. However, these are tasks of great complexity, since for most countries that need to start rural electrification processes (and even urban electrification), funding and governance structures are not well-developed. They only have isolated projects and specific programs, which are mostly maintained by international aid and financing structures, such as the World Bank and non-governmental organizations.

In these cases, governments consider promoting electrification processes in all possible ways, instead of structuring and implementing an ambitious policy for the promotion of socioeconomic development in rural areas. These results, initially, in the increase in the absolute number of electrical connections, making the electrification program a goal of the electric policy.

However, as noted, the lack of maturation of political organizations, and financial and technological structures lead to this path, leaving no other alternative. Of course, absolute numbers will be considered, but the quality of the service, the financial efficiency of the program, and the management and maintenance of these programs will fail and may potentially make the program unfeasible, as observed previously.

It is also worth noting that, even though rural electrification is generally related to development processes in the future, the absence of adequate structures for the rural electrification program during its creation makes this symbiosis unfeasible. This eventually leads to further delays and more inefficiencies, making the program ineffective to promote a process of income generation and economic development, serving at best for improvements in quality of life for the beneficiary population.

It is concluded that the four structures analyzed have the potential to include the process of rural electrification in a major development policy, if implemented in a balanced way in conjunction with other policies, with clear definitions of financing, technological options, tariff structures, management, and maintenance. Nevertheless, such interconnection must be organized and structured early in the formulation of the energy policy, including the rural electrification process. In addition, rural electrification should also be subordinated to a major policy with clear rules and definitions for promotion of local and/or rural socio-economic development, depending on each case.

REFERENCES

- ABDULLAH, S., & MARKANDYA, A. (2012). Rural electrification programmes in Kenya: Policy conclusions from a valuation study. *Energy for Sustainable Development*, 16(1), 103–110.
- AKLIN, M., BAYER, P., HARISH, S. P., & URPELAINEN, J. (2014). Information and energy policy preferences: a survey experiment on public opinion about electricity pricing reform in rural India. *Economics of Governance*, 15(4), 305–327.

ANDRADE, C. S., ROSA, L. P., & DA SILVA, N. F. (2011). Generation of electric energy in isolated rural communities in the Amazon Region a proposal for the autonomy and sustainability of the local populations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 493–503.

BAZILIAN, M., NAKHOODA, S., & VAN DE GRAAF, T. (2014). Energy governance and poverty. *Energy Research & Social Science*, 1, 217–225.

BAZILIAN, M., NUSSBAUMER, P., GUALBERTI, G., HAITES, E., LEVI, M., SIEGEL, J., FENHANN, J. (2011). Informing the Financing of Universal Energy Access: An Assessment of Current Financial Flows. *Electricity Journal*, 24(7), 57–82.

BHATTACHARYA, M., PARAMATI, S. R., OZTURK, I., & BHATTACHARYA, S. (2016). The effect of renewable energy consumption on economic growth: Evidence from top 38 countries. *Applied Energy*, 162.

BHATTACHARYYA, S. C. (2013). Financing energy access and off-grid electrification: A review of status, options and challenges. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 20, 462–472.

BHATTACHARYYA, S. C., OHIARE, S. (2012). The Chinese electricity access model for rural electrification: Approach, experience and lessons for others. *Energy Policy*, 49, 676–687.

BLUM, N. U., Sryantoro Wakeling, R., & Schmidt, T. S. (2013). Rural electrification through village grids—Assessing the cost competitiveness of isolated renewable energy technologies in Indonesia. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22, 482–496.

DELINA, L. L. (2011). Clean energy financing at Asian Development Bank. *Energy for Sustainable Development*, 15(2), 195–199.

DI LASCIO, M. A. ., & BARRETO, E. J. F. (2009). *Energia e Desenvolvimento Sustentável para a Amazônia Rural Brasileira: Eletrificação de Comunidades Isoladas*. Brasília.

ECHEVERRI, L. G., Monga, P., Nakicenovic, N., & Schreck, B. (2013). *Access to Modern Energy Assessment and Outlook for Developing and Emerging Regions*.

EIA, E. I. A. (2015). *China international energy data and analysis (Vol. 2015)*. Retrieved from http://www.eia.gov/beta/international/analysis_includes/countries_long/China/china.pdf

FUSO NERINI, F., DARGAVILLE, R., HOWELLS, M., & BAZILIAN, M. (2015). Estimating the cost of energy access: The case of the village of Suro Craic in Timor Leste. *Energy*, 79, 385–397.

FUSO NERINI, F., HOWELLS, M., BAZILIAN, M., & GOMEZ, M. F. (2014). Rural electrification options in the Brazilian Amazon. *Energy for Sustainable Development*, 20, 36–48.

GÓMEZ, M. F., & SILVEIRA, S. (2010). Rural electrification of the Brazilian Amazon - achievements and lessons. *Energy Policy*, 38(10), 6251–6260.

GÓMEZ, M. F., & SILVEIRA, S. (2015). The last mile in the Brazilian Amazon – A potential pathway for universal electricity access. *Energy Policy*, 82, 23–37.

GUPTA, A. (2016). Handbook of Environmental and Sustainable Finance. *Handbook of Environmental and Sustainable Finance*. Elsevier.

HIRMER, S., & CRUICKSHANK, H. (2014). The user-value of rural electrification: An analysis and adoption of existing models and theories. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 34, 145–154.

HOLTMAYER, M. L., WANG, S., & AXELBAUM, R. L. (2013). Considerations for decision-making on distributed power generation in rural areas. *Energy Policy*, 63, 708–715.

IEA, I. E. A. (2011). Energy for All: Financing access for the poor (Special early excerpt of the World Energy Outlook 2011). *World Energy Outlook 2011*. Retrieved from http://www.iea.org/media/weowebiste/energydevelopment/weo2011_energy_for_all-1.pdf

IEA, I. E. A. (2015a). *World Energy Outlook: Biomass database (2015)*.

IEA, I. E. A. (2015b). *World Energy Outlook: Electricity database (2015)*.

IICA. (2011). *Universalização do acesso e uso da energia elétrica no meio rural brasileiro: lições do Programa Luz para Todos*. (F. Tallarico, Ed.), ... Rio de Janeiro (Brasil Retrieved from <http://orton.catie.ac.cr/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=iicacr.xis&B1=Buscar&formato=2&cantidad=50&expresion=ENERGIA ELECTRICA>

LAHIMER, A. A., ALGHOUL, M. A., YOUSIF, F., RAZYKOV, T. M., AMIN, N., & SOPIAN, K. (2013). Research and development aspects on decentralized electrification options for rural household. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 24, 314–324.

LIMING, H. (2009). Financing rural renewable energy: A comparison between China and India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13(5), 1096–1103.

LIU, H., ESSER, L. J., & WHITING, K. (2013). Realising Rio principles through sustainable energy solutions: Application of small hydropower (SHP) in China and other developing countries. *International Journal of Technology Management & Sustainable Development*, 12(3), 281–300.

LUO, G., & GUO, Y. (2013). Rural electrification in China: A policy and institutional analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 23, 320–329.

MAINALI, B., & SILVEIRA, S. (2011). Financing off-grid rural electrification: Country case Nepal. *Energy*, 36(4), 2194–2201.

MAINALI, B., & SILVEIRA, S. (2013). Alternative pathways for providing access to electricity in developing countries. *Renewable Energy*, 57, 299–310.

MME, M. das M. e E. (2015a). Programa Luz para Todos: legislação. Brasília. Retrieved from <http://luzparatodos.mme.gov.br/luzparatodos/Asp/legislacao.asp>

MME, M. das M. e E. (2015b). Resultados Luz para Todos 2015. Governo Do Brasil.

PARIKH, P., CHATURVEDI, S., & GEORGE, G. (2012). Empowering change: The effects of energy provision on individual aspirations in slum communities. *Energy Policy*, 50, 477–485.

PORTAL BRASIL. (2015). Programa Luz para Todos é prorrogado até 2018. Retrieved September 18, 2015, from <http://www.brasil.gov.br/infraestrutura/2015/01/programa-luz-para-todos-e-prorrogado-ate-2018>.

POUDYAL, a., & PAATERO, J. V. (2014). Rural Energy Modeling and Planning: A Review on Tools and Methodology. *Bulletin of Science, Technology & Society*, 33(5–6), 191–197.

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA CASA CIVIL. (2011). Decreto n. 7.520. Retrieved August 30, 2015, from https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2011-2014/2011/Decreto/D7520.htm

ROJAS-ZERPA, J. C., & YUSTA, J. M. (2015). Application of multicriteria decision methods for electric supply planning in rural and remote areas. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 52, 557–571.

SACHS, J. D., SCHMIDT-TRAUB, G., & DURAND-DELACRE, D. (2016). Preliminary Sustainable Development Goal (SDG) Index and Dashboard.

SCHILLEBEECKX, S. J. D., PARIKH, P., BANSAL, R., & GEORGE, G. (2012). An integrated framework for rural electrification: Adopting a user-centric approach to business model development. *Energy Policy*, 48, 687–697.

SHYU, C. W. (2012). Rural electrification program with renewable energy sources: An analysis of China's Township Electrification Program. *Energy Policy*, 51, 842–853.

TAVARES, M. (2014). Saem as regras da Aneel para consumidor comprar energia pré-paga. Retrieved May 25, 2016, from <http://oglobo.globo.com/economia/saem-as-regras-da-aneel-para-consumidor-comprar-energia-pre-paga-12470297>

TEIXEIRA, A. F. (2010). Elementos do Desenvolvimento Endógeno e do Planejamento Integrado de Recursos para a Eletrificação de Comunidades Isoladas : estudo de caso em Pico do Amor / MT Elementos do Desenvolvimento Endógeno e do Planejamento Integrado de Recursos para a Eletrific. Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP).

TEIXEIRA, A. F., CASTAÑEDA-AYARZA, J. A., LOPES, D. G., & SAMPAIO, G. P. (2015). A Evolução e o Aprendizado da Política de Universalização de Energia Elétrica no Brasil para o Período de 2004 a 2015 (Vol. 2015).

TEIXEIRA, A. F., FRANCO, S., & LITAIFF, A. (2010). Artigo Elementos de um modelo de desenvolvimento endógeno aplicáveis ao aproveitamento de potencialidades locais para as comunidades isoladas da Região Amazônica1, (February), 62–66.

TEIXEIRA, A. F., LOPES, D. G., & CAVALIERO, C. K. N. (2010). Uma Análise Crítica do Programa Luz Para Todos para a Eletrificação de Comunidades Isoladas na Região Amazônica. *Anais Do VII Congresso Brasileiro de Planejamento Energético*.

TEIXEIRA, A. F., LOPES, D. G., & K N CAVALIERO, C. (2010). Programas de eletrificação para comunidades isoladas : uma análise a partir de casos específicos de Brasil , China , Índia e Tanzânia. In 8. Encontro de Energia no Meio Rural e Geração Distribuída (p. n/d). Campinas/ SP.

UNITED NATIONS. (2015). The Millennium Development Goals Report. United Nations. Retrieved from https://visit.un.org/millenniumgoals/2008highlevel/pdf/MDG_Report_2008_Addendum.pdf

VAN ELS, R. H., DE SOUZA VIANNA, J. N., & BRASIL, A. C. P. (2012). The Brazilian experience of rural electrification in the Amazon with decentralized generation - The need to change the paradigm from electrification to development. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(3), 1450–1461.

VIANA, F. G. (2007). Luz no Campo e Luz para Todos: duas experiências em busca da plena universalização dos serviços de energia elétrica no Brasil. *PCH Notícias & SHP News*, 34(9), 12–18. Retrieved from <http://cerpch.unifei.edu.br/wp-content/uploads/revistas/revista-34.pdf#page=12>

WINKLER, H., SIMÕES, A. F., ROVERE, E. L. da, ALAM, M., RAHMAN, A., & MWAKASONDA, S. (2011). Access and Affordability of Electricity in Developing Countries. *World Development*, 39(6), 1037–1050.

XIMEI, L., MING, Z., XU, H., LILIN, P., & JUNRONG, D. (2015). Small hydropower financing in China: External environment analyses, financing modes and problems with solutions. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 48, 813–824.

YISHENG, Z., MINYING, Y., & ZHEN, S. (2004). Rural Energy Policy in China. *Energy*, 1–20. Retrieved from http://iis-db.stanford.edu/evnts/3920/ZHENG_paper.pdf

ZERRIFFI, H. (2007). Making Small Work : Business Models for Electrifying the World. Retrieved from http://pesd.fsi.stanford.edu/sites/default/files/WP63_Zerriffi_Making_Small_Work_20070926.pdf

ZHANG, X., & KUMAR, A. (2011). Evaluating renewable energy-based rural electrification program in western China: Emerging problems and possible scenarios. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15(1), 773–779.

ZHAOHONG, B., & YANLING, L. (2015). An Overview of Rural Electrification in China: History, technology, and emerging trends. *IEEE Electrification Magazine*, 3(1), 36–47.

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)].