UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

DEMÓSTENES BARBOSA DA SILVA

PRODUTIVIDADE AMBIENTAL DAS FONTES DE ENERGIA

SÃO PAULO
2016

DEMÓSTENES BARBOSA DA SILVA

PRODUTIVIDADE AMBIENTAL DAS FONTES DE ENERGIA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Orientador: Prof. Dr. José Goldemberg

Versão Corrigida

(versão original disponível na Biblioteca do Instituto de Energia e Ambiente e na Biblioteca Digital de Teses e Dissertações da USP)

SÃO PAULO
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Silva, Demóstenes Barbosa da.

Produtividade ambiental das fontes de energia / Demóstenes Barbosa da Silva; orientador, José Goldemberg – São Paulo, 2016.
81.: il.; 30 cm

Tese (Doutorado em Ciência) – Programa de Pós-Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo

1. Produtividade ambiental. 2. Política energética. 3. Fontes alternativas de energia I. Título.

Nome: SILVA, Demóstenes Barbosa da.
Título: Produtividade ambiental das fontes de energia

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Aprovado em: 11 de julho de 2016

Banca Examinadora

Prof. Dr._José Goldemberg_____ Instituição:_____USP/IEE_____

Prof. Dr._José Sidnei Colombo Martini____ Instituição:_____USP/Politécnica_____

Prof. Dr._Dorel Soares Ramos_____ Instituição:_____USP/IEA_____

Prof. Dr._André Ricardo Mocelin_____ Instituição:_____USP/IEE_____

Prof. Dr._Luiz Pinguelli Rosa_____ Instituição:_____UFRJ/COPPE_____

Dedico esta Tese à humanidade.

Agradecimentos

Este estudo foi desenvolvido no Programa de Pós-Graduação em Energia do Instituto de Energia e Ambiente, da Universidade de São Paulo, no período de Julho de 2011 a Janeiro de 2016.

Registro aqui meu sincero apreço ao meu supervisor, Professor Doutor José Goldemberg, pelos diálogos produtivos que tivemos sobre este estudo. O seu direcionamento para minhas reflexões, seu suporte e encorajamento sempre presentes em nossos diálogos, e suas diversas observações, foram para mim preciosas ao longo do tempo que me dediquei para desenvolver este estudo.

Reconheço também o estímulo recebido do Prof. Dr. Ildo Sauer, Diretor do Instituto de Energia e Ambiente, por sua cumplicidade nos esforços para o desenvolvimento deste estudo.

Também o meu apreço ao Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA) e à Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que me forneceram dados e informações essenciais sobre a avaliação de impactos ambientais e sua correlação com as características técnicas de instalações de geração de energia.

Estendo o meu apreço aos Professores, Professoras, e colegas do Instituto de Energia e Ambiente, pelos preciosos momentos de aprendizado e estímulo.

Por último, à minha família, eu provavelmente não a agradeci o suficiente por toda a renúncia à minha presença, durante o tempo que tomei para o desenvlvimento deste estudo.

Há outras pessoas às quais não expresso meu reconhecimento de forma específica neste documento, a elas fica uma dívida de gratidão.

O desenvolvimento da ciência ocidental é baseado em duas grandes conquistas: a invenção do sistema lógico formal (em geometria euclidiana) pelos filósofos gregos, e a descoberta da possibilidade de descobrir relações causais por experiência sistemática (durante o Renascimento).

Albert Einstein (1953)

RESUMO

Existe uma relação fundamental entre políticas públicas e produtividade (Georgescu-Roetgen's, 1976). "Produtividade ambiental de uma fonte de energia" é definida pela relação existente entre a energia fornecida por determinada fonte e a extensão da atmosfera e da biosfera utilizadas na respectiva produção. É um indicador prático, formulado a partir de parâmetros comumente usados em decisões de novas fontes de geração de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional (SIN) no Brasil. Esse indicador pode auxiliar os formuladores de políticas públicas a estabelecerem requisitos mínimos e incentivos para fontes de energia que produzam menores impactos ambientais. Cálculos realizados mostram um aumento significativo da "produtividade ambiental" da hidreletricidade e da cana-de-açúcar, e relativa estabilidade no caso do petróleo. Sua aplicação a várias fontes de energia do SIN indica um aumento vertiginoso da produtividade ambiental a partir da introdução da fonte eólica na matriz energética brasileira, e espera-se um outro aumento maior ainda, com a introdução da fonte solar. A "produtividade ambiental das fontes de energia" em uma perspectiva global pode ajudar o planeta em uma virtuosa transição da matriz energética global, de sua composição atual, com preponderância de fontes energéticas convencionais fósseis, para sistemas de energia renováveis, se os formuladores de políticas puderem alinhar políticas energéticas a requisitos mínimos de "produtividade ambiental". Prioridades e transições adequadas devem ser incentivadas, de modo a permitir que os países possam substituir energias geradas, a partir de combustíveis fósseis, por fontes de energia renováveis (Wang, 2011). É importante que se auxilie decisores e usuários de energia, a entenderem o senso geral de "pegadas ecológicas" e limites do planeta na regeneração de ecossistemas. A fim de reduzir a pressão sobre a atmosfera e a biosfera é também essencial que os preços públicos de energia reflitam os reais custos incorridos. A razão pela qual a "produtividade ambiental das fontes de energia" pode ser utilizada de forma a reduzir pressões sobre a atmosfera e sobre a biosfera é a comparabilidade entre fontes, que se pode estabelecer a partir da metodologia de seu cálculo, aplicada a um conjunto de fontes, ou de alternativas de fontes. Os processos decisórios de implantação, ou mesmo de descomissionamento, de fontes de energia em geral se fundamentam em ordenamentos sequenciais de fontes de energia no tempo, ou em alternativas de fontes capazes de atenderem a necessidades de oferta de energia, em função de

seus custos, da necessidade do sistema de potência ao qual se conectam, e de avaliações sobre a qualidade e a magnitude de seus impactos ambientais. Entretanto, as avaliações de impactos ambientais consistem em estudos cujos termos de referência e resultados explicam impactos locais, e embasam decisões de licenciamento ambiental individualizadas, não diretamente comparáveis entre si ou com requisitos gerais comuns. Finalmente, considera-se que não há impactos negativos associados às políticas que incentivam a utilização de energias renováveis para os usuários de energia, e isso torna legítima a criação de um ambiente estimulante para agentes do mercado de energia em uma busca continua por maior produtividade ambiental na utilização de fontes de energia.

Palavras-chave*: Produtividade Ambiental, Política Energética, Energia Renovável, Transição Tecnológica de Sistemas de Energia*

ABSTRACT

There exist a fundamental relationship between public policies and productivity (Georgescu-Roetgen's, 1976). "Environmental productivity of an energy source" is defined as the ratio between the energy generated by that given source, and, the extent of atmosphere and biosphere that is used for that production. It is a practical indicator, formulated with basis on parameters commonly used in decision processes of new plants to the National Interconnected System (SIN) in Brazil. This indicator can help policy makers to establish minimum requirements and incentives for energy sources that produce less environmental impact. Calculations show significant increases of "environmental productivity" of hydroelectricity and sugar cane, and relatively stable from petroleum. Applied to a number of specific energy sources, that make up the portfolio of power plants listed in the official file of plants that feed the National Interconnected System (SIN) in Brazil, indicate a steep increase in environmental productivity of energy sources from the introduction of wind energy source in the energy mix, and it is expected another major increase with the introduction of solar source. "Environmental productivity of energy sources" in a global perspective can help a virtuous transition, from conventional to renewable energy systems, if policy makers can align energy policies based on thresholds of "environmental productivity". Priority and proper transition should be encouraged so as to enable countries replace the fossil fuels and the renewable sources of energy (Wang, 2011). It is important to help decision makers to understand the overall sense of environmental footprints and limits of the planet to regenerate ecosystems. In order to reduce unnecessary pressures on the atmosphere and the biosphere it is also essential that public energy prices reflect actual costs incurred. The reason why the "environmental productivity of energy sources" can be used to reduce pressure on the atmosphere and the biosphere is comparability between sources, which can be established from the method of its calculation, applied to a set of sources, or alternative sources. The decision-making processes of implementation, or decommissioning of energy sources in general are based on energy sources sequential orderings in time, or alternative sources able to meet the power supply needs, due to their cost, the need of the power system to which are connected, and reviews of the quality and magnitude of environmental impact and underlie environmental licensing

individual decisions, not directly comparable with each other or with common general requirements. Finally, it has been established that there are no particular enactments or policies that are put in place that help in energy utilization that can cause negative impacts to these organizations and this could help create a conductive environment for energy market players fin search for higher “environmental productivity” of energy sources.

Keywords: *Environmental Productivity, Energy Policy, Renewable Energy, Technological Transition of Energy Systems*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxo de energia e utilização final……35

Figura 2. Mapa de áreas prioritárias segundo sua importância para a biodiversidade……..…47

Figura 3. Mapa de fontes de energia e áreas prioritárias para conservação da biodiversidade, da região norte do Brasil…….....….…47

Figura 4. Mapa de fontes de energia e áreas prioritárias para conservação da biodiversidade da região nordeste do Brasil…….…....48

Figura 5. Mapa de fontes de energia e áreas prioritárias para conservação da biodiversidade da região sudeste e sul do Brasil……..48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Gases que agravam impactos ambientais sobre a atmosfera……....31

Tabela 2. Classificação das áreas prioritárias para conservação da biodiversidade……...46

Tabela 3. Fatores de emissões médios de plantas termelétricas no SIN……..51

Tabela 4. Fatores de emissões estimados de reservatórios de plantas hidrelétricas……51

Tabela 5. Produtividade ambiental de fontes do SIN representativas por período…….53

Tabela 6 - Energia Primária…….....…57

Tabela 7 - Rendimentos Energéticos…….…....57

Tabela 8 - Energia gerada…….....……..…….…….57

Tabela 9 - Áreas utilizadas pelos agregados das fontes agregadas…….…….…...…58

Tabela 10 - Produtividade ambiental por fonte de energia agregada na matriz (tep/ha).....58

Tabela 11. Preços de energia elétrica negociados em leilões no Brasil (R$/MWh)…...…63

LISTA DE SIGLAS

MME	Ministério de Minas e Energia
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
IBAMA	Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e Recursos Naturais
APP	Áreas de Preservação Permanente
SIN	Sistema Elétrico Interligado Nacional
COP	Conferência das Partes, da Converção Global de Mudanças Climáticas
GEE	Gases de Efeito Estufa
UV	Irradiação Ultra Violeta
VPL	Valor Presente Líquido
PV	Fotovoltaica
CFC	Compostos de Cloro – Fluor – Carbono
IEE	Instituto de Energia e Ambiente
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

CO_2	Dióxido de Carbono
NOx	Óxidos de Mono-Nitrogênio
SO_2	Dióxido de Enxofre
CH_4	Metano
kWh	Kilowatt-hora
MW	Megawatt
tC	Tonelada de Carbono
TJ	Terajoule
Kg	Kilograma
Ha	Hectare
Km^2	Kilometro quadrado

SUMÁRIO

1. Introdução 18
1.1 Antecedentes do estudo 18
1.2 Objetivo da Tese 19
1.3 Questões propostas 19
1.4 Escopo e delimitações 20
1.5 Estrutura da tese 21
2. Revisão da Literatura 23
2.1 Nexo causal energia-impactos ambientais, "pegada ecológica" e política energética 23
2.2 A eficiência no uso de recursos naturais 25
2.3 A eficiência energética, coadjuvante da produtividade ambiental em uma matriz energética 26
2.4 Os impactos ambientais na produção e utilização de energia 28
2.5 Fontes primárias de energia e o setor de energia elétrica no Brasil 34
2.6 Contribuição das fontes renováveis de energia 37
3. Método 38
3.1. Conceito de produtividade ambiental de fontes de energia 38
3.2. Equações para aplicação do conceito de produtividade ambiental de fontes de energia 40
3.3. Produtividade ambiental e pegada ecológica 41
4. Aplicação do conceito de produtividade ambiental às fontes do Sistema de Potência Interligado Nacional (SIN) e agregados da matriz energética brasileira 45
5. Discussão à luz do conceito e resultados dos cálculos 60
6. Conclusão 67
7. Recomendações 68
8. Referências 70
9. Anexos 75
9.1. Anexo I – Análise sobre a eficiência energética e programas de eficiência 75
9.2. Anexo II - Avaliação econômica da implementação de eficiência energética 78
9.3 Anexo III – Redução de custo da tecnologia fotovoltaica 80

1. Introdução

1.1 Antecedentes do estudo

O setor de energia é estruturalmente complexo: capital-intensivo, os processos de tomada de decisão de investimentos, implantação e operação de instalações de geração de energia exigem planejamento com anos de antecedência para atender às demandas previstas; é um setor historicamente sujeito a fortes interesses políticos e econômicos, notadamente nos países em desenvolvimento, além de apresentar crescente vulnerabilidade a circunstâncias imprevisíveis e às vezes incontroláveis de alguns fatores, como condições climáticas e mudanças políticas, e crescimento economico e social (Khayyat, 2015).

Essa complexidade e essas vulnerabilidades têm motivado intervenções de vários segmentos da sociedade; a academia, onde numerosas contribuições advogam por aprimoramentos tecnológicos, organizacionais, regulatórios e de políticas públicas, além da diversificação da utilização de fontes de energia disponíveis, ainda não suficientemente utilizadas, notadamente a biomassa e a irradiação solar nos países em desenvolvimento; a indústria energética que através de várias associações de classe, desempenha funções de liderança em diagnósticos, críticas, reclamações sobre a política energética e sobre os regulamentos; os meios de comunicação que têm se especializado em realizar análises criticas sobre os fatos do setor de energia e as implicações das políticas publicas sobre os mesmos, enquanto relatam fatos do setor de energia para a sociedade; parlamentos onde projetos de lei que promovem mudanças no quadro jurídico e regulatório do setor energético são discutidos; e os governos, que enfrentam grandes desafios para assegurar o suprimento energético, atuando sobre os mercados por meio de instrumentos de incentivo e de limitação, que deveriam idealmente ser antecipados em políticas energéticas e estabelecidos em lei (Goldemberg, 2012).

O debate de fato é mais abrangente, é um debate sobre os limites do planeta além dos quais a continuidade da utilização de alguns dos recursos naturais, conforme se tem utilizado atualmente, coloca em risco a capacidade de regeneração do planeta e a sustentabilidade do atual modelo de desenvolvimento, tem motivado o engajamento de diversos pesquisadores e organizações da sociedade civil, e se expande com adesões de cidadãos, empresas, e embora ainda menos evidente, também de governos. A medida da velocidade com que a humanidade

usa os recursos naturais disponíveis, em determinado período de tempo, resulta na indicação de quantos planetas têm sido necessários a cada ano para atender às necessidades humanas. O cálculo dessa medida efetuado com base em dados de fluxo de recursos naturais sendo utilizados em 150 países de ambos os hemisférios terrestres, ocidental e oriental, resultou em um indicativo de que a pegada ecológica da humanidade já ultrapassou em aproximadamente 44% a capacidade de regeneração da Terra (Wackernagel and Rees, 1996).

Mas, buscando entender melhor a questão da utilização ótima dos recursos naturais, surgem questões sobre como esses recursos são utilizados, e, de que forma, com que tecnologias poder-se-ia obter os mesmos quantitativos de bens e serviços demandados, e, ao mesmo tempo, empregar-se menos recursos naturais. Em outras palavras, como assegurar a maior produtividade na utilização desses recursos naturais. As respostas a essas questões ainda não estão formalmente propostas. Elas provavelmente requererão métricas específicas que permitam apropriar mecanismos de aumento de produtividade na utilização de recursos naturais nos processos decisórios.

1.2 Objetivo da Tese

O objetivo da Tese ora proposta é esclarecer como se pode utilizar o conceito de "produtividade ambiental das fontes de energia", para reduzir pressões ambientais desnecessárias sobre a biosfera e a atmosfera.

1.3 Questões propostas

A fim de alcançar o objetivo acima proposto, as seguintes questões foram consideradas, tomando por base de análise o caso do Brasil:

1. Como se configura a matriz energética atual e que tendências se pode vislumbrar em sua evolução, em termos de pressões ambientais decorrentes da geração de energia?

2. Consideradas as fontes e tecnologias de produção de energia atualmente disponíveis, como se pode vislumbrar a evolução das pressões ambientais decorrentes da utilização para o atendimento da demanda por energia no país?
3. Como se verifica a produtividade ambiental das fontes de energia no Brasil, em uma perspectiva individual e da matriz energética?
4. Como a política energética pode incorporar o conceito de produtividade ambiental de fontes de energia de forma a reduzir as pressões ambientais decorrentes da geração de energia elétrica?

1.4 Escopo e delimitações

O estabelecimento do conceito de "produtividade ambiental das fontes de energia", a exemplificação de seu cálculo e recomendações para sua utilização como elemento de uma política energética, constituem o escopo fundamental desta Tese.

A definição do conceito de produtividade ambiental parte dos fundamentos das teorias da produção descritas pelos pensadores da economia clássica e resulta em formulação matemática para o emprego de variáveis conhecidas de projetos de geração de energia, e de agregados de fontes de energia de uma matriz energética.

Para exemplificar a utilização do conceito de produtividade ambiental das fontes de energia foram utilizados dados de fontes de energia mantidos em arquivo pela Agencia Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), relativos às diversas instalações de geração de energia, concedidas ou autorizadas pelo poder concedente e licenciadas pela autoridade ambiental no Brasil, e também dados agregados de produção de energia a partir das fontes hidrelétrica, cana-de-açúcar e petróleo, obtidos em publicações oficiais do Ministério de Minas e Energia, com os quais foi ensaiado o cálculo da "produtividade ambiental" de agregados da matriz energética brasileira. Esse ensaio foi feito para ilustrar e avaliar os resultados da aplicação do conceito de "produtividade ambiental das fontes de energia".

A partir do conceito de "produtividade ambiental das fontes de energia" desenvolvem-se análises sobre como aumentar a produtividade ambiental, e evidencia-se a maior produção de energia a partir de fontes de baixo impacto ambiental, como as fontes renováveis, e a possível

substituição de fontes energéticas convencionais por fontes renováveis de baixo impacto ambiental, como meio fundamental para se aumentar a "produtividade ambiental das fontes de energia".

Com essa perspectiva fundamental, desenvolve-se a discussão sobre as fontes renováveis de energia que podem ajudar a aumentar a produtividade ambiental da matriz energética.

Por outro lado, aumentar-se a eficiência na utilização de energia tem provado ser uma forma confiável de promover economia de energia, e, pode-se afirmar, é também coadjuvante para promover-se maior "produtividade ambiental" da matriz energética, na medida em que, para determinado nível de necessidades dos usuários finais, a demanda por energia será menor e por conseqüência a necessidade de utilização de recursos naturais também será menor.

Por essa outra perspectiva do papel coadjuvante da eficiência energética, considerando a relação direta de causa e efeito do consumo de energia por usuários finais, foram também desenvolvidas reflexões sobre o consumo de energia de algumas classes de usuários finais de energia gerada e comercializada no Brasil, e também sobre como a energia é gerada (Goldemberg, 1995).

Assim, o conceito e a exemplificação de sua aplicação, o alinhamento da métrica com elementos de uma política energética, tais como incentivos regulatórios e fiscais para a expansão da oferta de energia a partir de fontes renováveis, e para o aumento da eficiência no consumo de energia, são desenvolvidos nesta Tese sem ultrapassar os limites da discussão sobre como utilizar o conceito de "produtividade ambiental das fontes de energia" na política energética para reduzir pressões ambientais desnecessárias sobre a biosfera e a atmosfera.

1.5 Estrutura da tese

A Tese ora apresentada é composta por seis partes, organizadas em seções, de tal modo que a discussão e análises apresentadas em cada uma formam conceitualmente um trecho ou aspecto bem caracterizado do raciocínio. A primeira seção é a introdução, que apresenta os antecedentes do tema em estudo, o objetivo da tese, o raciocínio que embasa o estudo a explicação sobre a importância do mesmo, e por último o escopo e a estrutura da Tese.

A segunda seção é a revisão da literatura sobre os temas discutidos na Tese e sua importância para o estudo. São comentados desenvolvimentos realizados em trabalhos anteriores que têm significado para o presente estudo.

Na terceira seção é exposto o conceito e o método de cálculo da "produtividade ambiental das fontes de energia". É apresentada uma discussão conceitual sobre "pegada ecológica", e são apresentados comentários sobre a aplicabilidade do conceito de "produtividade ambiental das fontes de energia" como forma prática de se orientar esforços e decisões para reduzir a "pegada ecológica" na utilização de energia. Algumas conclusões sobre como o conceito de produtividade poderia ser associado a incentivos regulatórios para a eficiência energética são obtidas a partir de uma análise do segmento de energia industrial, que é o de maior porte dentre as classes de usuários de energia. Essa análise, embora interessante para auxiliar no entendimento sobre o efeito da aplicação de conceitos como o de eficiência energética e de produtividade ambiental, não é essencial e foi incluida no Anexo I.

Na quarta seção, os resultados dos cálculos de produtividade ambiental das fontes de energia são examinados e organizados em categorização científica.

Na quinta seção é apresentada uma discussão à luz dos resultados obtidos com a aplicação do conceito de "produtividade ambiental de fontes de energia às plantas de geração que compoem o SIN no Brasil.

A sexta seção chama a atenção para algumas propostas que podem ser úteis a formuladores da política energética e a todos que se interessarem pela exploração do conceito de "produtividade ambiental de fontes de energia" ou utilização do mesmo em aplicações específicas.

Na sétima seção são apresentadas recomendações sobre a utilização do conceito de "produtividade ambiental de fontes de energia" como coadjuvante na adoção de políticas energéticas orientadas para a transição de matrizes energéticas, para composições de menores impactos ambientais.

Na última seção são apresentadas as referências bibliográficas e respectivos autores.

2. Revisão da Literatura

As literaturas selecionadas refletem os trabalhos recentes relevantes para a pesquisa desenvolvida. Embora o tema específico da produtividade ambiental de fontes de energia não tenha sido objeto de farta publicação, a literatura consultada oferece uma visão clara do âmbito do estudo, bem como inspira uma compreensão aprofundada do campo de estudo como ilustrado nas sub-seções a seguir.

2.1 Nexo causal energia-impactos ambientais, "pegada ecológica" e política energética

Políticas de energia e outras políticas podem ter sua implementação auxiliada por ferramentas analíticas e métricas para descrever e proporcionar parâmetros de tomada de decisão com base em interações complexas entre os sistemas ambientais, de energia, água e outros sistemas sociais (Galli et al. 2012; McGlade et al. 2012; Pfister, Koehler, and Hellweg 2009; Boulay, Hoekstra, and Vionnet 2013). O nexo causal entre produção e consumo de energia, aquecimento da superfície da Terra, e, perda de biodiversidade, tem chamado a atenção para a interdependência das políticas de energia, de meio ambiente, e, de desenvolvimento social de classes sócio-econômicas de baixa renda.

Embora seja evidente e crescente o reconhecimento de que há crises globais que requerem políticas públicas articuladas, como de energia e água (Srinivasan et al. 2012; UNDP 2006) e as mudanças climáticas ameacem a viabilidade dessas políticas (Gleick 2010; Vörösmarty et al. 2010; Oki and Kanae 2006), as políticas públicas e seus formuladores têm falhado na consideração desse nexo causal e suas implicações. Questões têm sido levantadas em diversos países sobre como as políticas energéticas poderão mitigar as mudanças climáticas e simultaneamente orientar a adaptação dos sistemas de geração de energia às mudanças climáticas, particularmente com respeito à incerteza hidrológica (Fulton andd Cooley 2015).

Algumas abordagens métricas dos limites que os ecossistemas podem suportar têm sido utilizadas para motivar formuladores de políticas públicas e governantes a adotarem medidas mais rigorosas e assertivas para limitar os impactos de atividades antropogênicas sobre esses sistemas. Essas abordagens têm sido reconhecidas como expressões da "pegada ecológica" de

determinada atividade antropogênica ou conjunto das mesmas. A expressão "pegada ecológica" foi introduzida no início dos anos 90 por Mathis Wackernagel e William Rees. Foi de fato uma das primeiras tentativas de medir a capacidade do planeta de suportar o conjunto de atividades antropogênicas. Os autores adotaram o conceito de quantos planetas seriam necessários para suportar a atividade humana com os recursos que eram requeridos da natureza em determinado ano. Em 2008, fizeram um cálculo estimativo da "pegada ecológica" da humanidade a partir de dados obtidos junto a 150 nações referentes ao uso de recursos naturais desde 1980. Concluíram que a pegada ecológica da humanidade tem excedido a capacidade de regeneração do planeta, e, em 2008 a capacidade dos ecossistemas terrestres foi excedida em aproximadamente 44 por cento.

As análises econômico-financeiras que fundamentam decisões de investimento ainda hoje são baseadas em uma visão de interações lineares de causa e efeito nos diversos sistemas do meio físico. Essa visão, de que a ação antropogênica sobre a matéria resulta em efeitos ordenados, conhecidos e previsíveis, está presente tanto nos processos decisórios de implantação de novas fontes geradoras de energia, que se caracterizam como decisões de ordem microeconomica, como também nas políticas energéticas cujos efeitos são de ordem macroeconômica. O efeito prático dessa visão nos processos decisórios de projetos de investimento é que em geral as projeções de valores de custos e receitas econômicas ao longo do tempo, e fluxos de caixa descontados, privilegiam a recuperação de valores a curto prazo, sem considerar valores de custos e benefícios associados a ativos ambientais, que em geral se apropriam a longo prazo. Por outro lado, encontram-se na literatura proposições de que o pensamento econômico atual deveria se basear nas Leis da Termodinâmica, com devida consideração da Biodiversidade e dos limites dos respectivos sistemas biológicos (Wijeratne A.T., 2015). Segundo essas proposições, as atividades antropogênicas tendem invariavelmente a aumentar a entropia dos sistemas sobre os quais atuam (Styer D. F., 2000), e portanto, o equilibio econômico desses sistemas, ou de mercados a eles associados, é um fenômeno aparente, na medida em que seu contínuo crescimento resultará em desequilíbrios não previstos, decorrentes da incapacidade de absorção dos efeitos da entropia crescente.

Essas proposições fundamentam uma nova visão da nautreza da economia, que tem sido caracterizada como uma natureza bio-física da economia.

Há uma questão, cuja resposta parece ainda não estar evidente e suficientemente acessível na bibliografia para parte significativa da sociedade, notadamente para formuladores de políticas energéticas e decisores de projetos de investimento em fontes de energia, que é a questão sobre como as expressões da "pegada ecológica" podem ser consideradas em decisões de

governança e de formulação de políticas públicas, e, particularmente, em decisões de instalação de novas fontes de energia. Esse foi considerado um ponto de partida para uma possível contribuição ao debate atual, com os resultados da presente Tese.

2.2 A eficiência no uso de recursos naturais

Recursos em todo o mundo são considerados mensuráveis e quantificáveis. Esta inferência sobre recursos em todo o mundo é sempre associada a um determinado período de tempo (Williams, McKane, Perry, Aixian & Tienan, 2005). É, por conseguinte, imprescindível garantir a redução de desperdícios na utilização de recursos naturais, de forma a preservar o planeta da escassez de recursos. A razão para essa idéia é bastante consistente com a lógica da utilização de recursos. A utilização eficiente dos recursos, por exemplo, de minerais, de energia e de água, de matérias primas e assim por diante requer sustentabilidade (Goldemberg, 1995).

A eficiência na utilização de recursos pode ser caracterizada como o uso dos recursos naturais na melhor forma, como comumente seria prudente, minimizando os efeitos de sua utilização na natureza (Smil, 2008). A eficiência na utilização dos recursos não é apenas uma preocupação natural; é também uma atividade que gera valor, aumentando a produtividade e reduzindo custos para os usuários, por exemplo, custo de materia prima, custo de energia e de operação (Williams, McKane, Perry, Aixian & Tienan, 2005). Da mesma forma, sob o ponto de vista de negócios, a produtividade contribui para a segurança do suprimento de recursos cuidando para que a demanda dos clientes seja viável de ser atendida no exercício do negócio (Borg, 2008). Garantindo assim a produtividade na utilização dos recursos, assegura-se benefícios também para a economia, aumentando ganhos para os negócios e reduzindo despesas para os usuários finais. Ainda, a capacidade de utilização de recursos de forma mais produtiva, pode aumentar a rentabilidade sem impactos ambientais adicionais, e sob o ponto de vista ecológico, a maior eficiência na utilização de recursos reduz emissões de gases que provocam a intensificação do efeito estufa, reduz a utilização de recursos naturais como água e os meios físicos da biosfera e da atmosfera, garantindo melhor utilização de materias primas (Khayyat, n.d).

A eficiência na utilização de recursos é, em termos de valor para a produção, equivalente à aquisição de matérias primas. Quanto mais eficiente for a utilização de recursos, menor será a

geração de resíduos. O reuso de materiais e a eliminação de procedimentos duplicados resulta no aumento da eficácia na utilização de recursos. (Goldemberg, 1995).

No mundo inteiro a energia, seja renovável ou não, constitui-se em recurso e desta forma, o fato de assegurar-se a eficiência no uso da energia já é meio caminho em direção do aumento da produtividade ambiental, nos termos do enfoque adotado no presente trabalho. A eficiência energética é uma das práticas que pode assegurar recursos em diversas linhas de produção, e é extremamente efetiva quando colocada como prática em políticas de sustentabilidade (Borg, 2008).

2.3 A eficiência energética, coadjuvante da produtividade ambiental em uma matriz energética

A eficiência energética pode ser caracterizada como a utilização de uma menor quantidade de energia para fornecer a mesma quantidade de um produto. Esta definição pode ser conectada à proporção de energia no suprimento de energia em um processo qualquer. De uma forma prática, a menor quantidade de energia que seria suficiente para a produção de um determinado bem em um processo (Simón, 2012).

Com base na mesma racionalidade, pode-se afirmar que uma maior eficiência na utilização de energia, resultará em maior produtividade ambiental de uma matriz energética, pois, menores quantidades de biosfera e atmosfera estarão sendo utilizadas para uma mesma utilidade da energia.

O segmento de usuários industriais é, dentre todas as classes de consumo, o que representa a maior parcela do consumo total de energia. É nesse segmento que medidas de racionalidade e eficiência na utilização de energia apresenta resultados mais expressivos, sem desconsiderar a importância e potencial de contribuição que os demais segmentos representam para a melhoria da produtividade global da economia.

Considerando as principais motivações para a prática de eficiência energética em empresas, notadamente industriais, evidenciam-se três principais conexões com a produtividade em geral, envolvendo os sentidos econômico e ambiental:

- O aumento dos custos de energia,

- Novos regulamentos ambientais que induzam a redução de emissões de gases que intensificam o efeito estufa (principalmente CO_2), por exemplo, a convenção de Quioto de 1997, o Acordo de Copenhagen de 2009, e, os programas que se espera sejam desenvolvidos a partir das decisões da Conferência das Partes da Convenção Global do Clima em Paris, em 2015, e
- Efeitos subseqüentes de usuários finais alterando suas decisões de consumo para opções de maior sustentabilidade e empresas buscando aproximar seus produtos e sua imagem no contexto de maior sustentabilidade.

Em qualquer caso, entre essas três principais motivações, em um estudo relacionado, o aumento dos custos de energia é o principal fator motivador. Atribui-se isto ao fato de que as guerras mundiais e também as guerras locais que ainda ocorrem no planeta provocaram e têm provocado aumentos esperados de custos de energia e diferentes variáveis hoje em dia têm contribuido para a persistência desse aumento. Isto chamou a atenção de inúmeros especialistas em energia para a racionalidade de medidas que podem garantir a utilização sutentável de energia e sua eficiência. Isto chama também a atenção para a questão do incremento de custos de energia em empresas de pequena escala no Brasil. É amplamente reconhecido no Brasil que parte importante dos ganhos de valor por aumento de produtividade passam por maior eficiência energética. Diversos outros fatores de pressão sobre as pequenas empresas, alguns de maior importância no curto prazo se sobrepõem a questões de maior eficiência no uso de recursos ambientais (Pearce, 1991).

Os benefícios associados à promoção da produtividade da geração e do uso de energia, seja sob o ponto de vista do consumo de energia, como também sob o ponto de vista de sua produção, o qual envolve tanto a produtividade econômica quanto a ambiental, são, sem dúvida, de alto valor para a sociedade, materializados em dois resultados. O principal consiste em melhor desempenho financeiro, com menores custos e maiores retornos; o segundo consiste em sustentabilidade ambiental. Melhor desempenho financeiro, com menor custo e maior retorno dos investimentos, é particularmente de grande relevância para pequenas empresas, notadamente no Brasil. O foco nas vantagens financeiras da maior produtividade contribui decisivamente para um desenvolvimento prático e mais sustentável (Simón, 2012).

(Cappers e Goldman, 2010) no entanto, vêm essa mudança de contexto com políticas que promovam maior produtividade, e também incentivos à autonomia energética, como vantagem adicional. A autonomia energética deve ser considerada como um elemento imperativo pelos usuários de energia que dependem de grandes quantidades de energia.

Nada obstante, algumas dificuldades se interpõem como impedimentos para a sua execução. (Rohdin e Thollander, 2005) esclarecem esses obstáculos com a hipótese de que há uma certa resistência às inovações. Destacam-se essas resistências às inovações a partir de argumentos em geral utilizados no sentido de que nem todas as inovações foram suficientemente testadas, e as áreas financeiras das empresas consideram isto em seu posicionamento, bem como a escassez de dados que justifiquem a efetividade econômica das inovações; como consequência várias oportunidades de gerar valor são perdidas; esse comportamento resulta em baixo interesse das administrações por projetos de eficiência e produtividade energética. Entretanto, para ajudar na superação dessas dificuldades existem diversas possibilidades de projetos e programas de eficiência energética (Cost et al, 2007), tais que podem ajudar tanto a usuários finais de energia (compradores de energia) quanto os fornecedores de energia para que consigam avançar na eficiência e produtividade econômica e ambiental.

2.4 Os impactos ambientais na produção e utilização de energia

Os impactos ambientais na produção e utilização de energia são decorrentes de atividades econômicas de produção de energia e suas utilizações (Ec.europa.eu, n.d). As ciências da saúde e as ciências ambientais estabelecem importantes introspecções sobre conexões da produção de energia e de sua utilização, com respectivos impactos ambientais. Estudos mostram que habitats são afetados, a exploração além dos limites de regeneração natural, de recursos renováveis, emissões oriundas da produção e utilização de energia, mudanças climáticas, estão entre as mais cruciais questões ambientais. Estudos têm detalhado e avaliado a perda de biodiversidade e problemas de saúde. Pressões ambientais desnecessárias são relacionadas à extração e transformação de materiais, e também à produção de energia e suas fontes. Alguns estudiosos têm dado muita atenção às causas dessas pressões que são exercidas sobre o meio ambiente e resultam em sua depleção. Outros estudos têm reconhecido repetidas vezes que o uso de combustíveis fosseis é o maior problema do setor de energia.

Essa escola de pensamento dá uma visão sobre o problema da produção e utilização de energia, a descrição do mesmo e sua análise. No entanto, ela não oferece os recursos necessários para a implementação de uma solução, para interromper o crescimento dessas questões e também não dá muita atenção para a magnitude da ajuda que pode dar. Ela dá uma

visão clara da lacuna de conhecimento para que futuros estudos possam ir a fundo nesse tema por estudiosos, pesquisadores e comunidades científicas.

As questões ambientais em perspectiva global são como que efeitos subseqüentes associados a alguns components que representam perigos reconhecidos. E as maiores ou menores intensidades das atividades humanas tornam-se a principal consideração desse perigo. Este é um resultado direto da expansão da população mundial, o consumo de energia, nível de atividade física e assim por diante (Dincer, 1999). Mais e mais frequentemente especialistas têm se concentrado sobre o efeito natural das emissões de SO_2, NO_x CO_2 e outros gases. Atualmente, a utilização de energia tem se tornado um dos elementos fundamentais que não é desconsiderado no que diz respeito à questão do avanço tecnológico que por sua vez tem sido motivado por percepções básicas tais como "melhorias que atendam às necessidades da sociedade presente, sem comprometer a capacidade de atendimento às necessidades das sociedades futuras". O fornecimento de energia é um dos elementos cuja prática atual pode contribuir enormemente para a sustentabilidade do futuro, e as fontes de energias renováveis são excepcionalmente encorajadoras como partes da solução (Dincer e Rosen, 1998).

Esse senso é muito importante para usuários em geral e para as empresas em especial, devido à sua contribuição para o consumo total de energia, na medida em que dissemina o conhecimento sobre a utilização de fontes renováveis de energia, como é o caso da energia eólica, solar e de outras fontes renováveis de energia, cuja utilização se torna viável a partir de inovações tecnologicas. Essas fontes são excepcionalmente encorajadoras para se acreditar que um futuro sustentável na produção de energia será viável, como conseqüência da simples utilização de arrranjos de desenvolvimento e fabricação de equipamentos para aproveitamento de fontes de energia renovável (Pearce, 1991).

A expansão populacional e o consequente crescimento de atividades resultará no aumento da produção e utilização de energia; e porque temos a matriz energética mundial contingenciada por fontes de energia que provocam grande parte dos impactos ambientais sobre a atmosfera e sobre a biosfera, isso tem provocado intensas discussões sobre os efeitos ecológicos relacionados ao consumo de energia, por exemplo, precipitação de corrosivos, a depleção do ozônio da estratosfera, mudanças climáticas, etc.

Chuva ácida

Resultado da emissão e mistura de materiais húmidos e secos do ambiente que têm abundantes quantidades de óxidos nítricos (NO_x) e anidrido sulfúrico (SO_2). É também gerada a partir da queima de combustíveis fósseis, como por exemplo em fundições de metais

não ferrosos, veículos de transporte e assim por diante. Processos relacionados à produção e uso de energia são igualmente notáveis fontes de chuva ácida, e nesse aspecto, países nos quais a geração de energia a partir de combustíveis fosseis estão no topo de sua matriz energética representam verdadeiros dilúvios de chuva ácida. (Elbehri, Segerstedt & Liu, n.d). Avanços tecnologicos têm sido alcançados na produção de combustíveis, enbora fósseis, mas com composições menores de elementos poluentes, como é o caso do diesel S10 no Brasil, cuja composição tem reduzida participação de enxofre, e também nos motores que utilizam combustíveis fósseis, com a introdução de equipamentos que retêm nos gases de escape, parte das emissões de poluentes.

Mas, esses avanços tecnologicos não são suficientes para reduzir o grave problema que representa a utilização de veículos movidos a combustíveis fosseis.

Depleção de ozonio estratosférico

O ozônio presente na estratosfera assume um papel notável pela retenção de irradiação ultra violeta (UV) e irradiação infravermelha. O esgotamento da camada de ozonio da estratosfera, que se sabe está relacionada às emissões de cloro fluor carbonetos (CFC) e de óxidos nítricos (NO_x), é uma notável questão ecológica (Heijman, 1990).

Como consequência da depleção da camada de ozonio, as irradiações ultra violeta (UV) e infra-vermelha provocam doenças de pele e da visão.

Processos de produção e utilização de energia são uma pequena parte associada ao problema da depleção do ozonio estratosférico; de fato as emissões de CFC que são utilizados nos refrigeradores e no condicionamento de ar são o vilão; mas, somam-se ao contexto desses impactos ambientais, na medida em que emitem óxidos nítricos.

Mudanças climáticas

As mudanças climáticas são efeitos subseqüentes aos múltiplos e pequenos impactos que ocorrem na interface entre o vapor d'água e nevoa na atmosfera, ocasionando o aumento da temperatura do planeta (Dinda, n.d). Além do CO_2 cujo aumento de concentração na atmosfera responde por cerca de metade do problema das mudanças climáticas, há outros gases, por exemplo CH_4, CFC, N_2O, e SO_2 que contribuem para o agravamento dos impactos sobre a atmosfera (McCarthy, 2001).

Estes gases são ordinariamente emitidos como consequência das atividades antropogênicas atuais, sendo que algumas dessas atividades são relacionadas à produção e uso de energia.

Essas atividades podem ser alteradas pela mudança da forma com a qual a energia é produzida e utilizada, como por exemplo adotando-se práticas de produção e utilização mais eficientes de energia, e, utilizando-se fontes renováveis de energia, que não emitem referidos gases.

A Tabela 1 ilustra o conjunto desses gases, efeitos relacionados, e a intensidade relativa do impacto ambiental de cada poluente.

Tabela 1. Poluentes gasos, impactos ambientais sobre a atmosfera e intensidades relativas

Poluente	Efeito Estufa	Depleção do ozonio estratosférico	Chuva ácida	Fumaça
Dióxido de carbono CO_2	Impacto intenso	Impacto mediano		
Metano CH_4	Impacto intenso	Impacto mediano		
Óxido nítrico NO e Dióxido de nitrogênio NO_2		Impacto mediano	Impacto intenso	Impacto intenso
Dióxido de enxofre SO_2	Impacto reduzido	Impacto intenso		
Clorofluorocarbonetos CFC	Impacto intenso	Impacto intenso		

Fonte: McCarthy, 2001

Plantas a carvão

O carvão ainda é a fonte de energia individualmente responsável pela maior parte da energia elétrica gerada no mundo, correspondendo a cerca de 40% da energia elétrica total gerada no mundo em 2015 (Agência Internacional de Energia, 2015). Vários desenvolvimentos tecnológicos têm sido feitos na direção da redução dos impactos ambientais dessas plantas. Embora os impactos negativos dessas plantas não possam ser eliminados, poderiam ser reduzidos, com a introdução de tecnologias de gaseificação, leito fluidizado pressurizado, e, lavadores de dióxido de carbono (Ekins, Pollitt, Summerton & Chewpreecha, 2012).

Painéis fotovoltaicos (PV)

Painéis fotovoltaicos (PV) têm muito reduzidos riscos de impactos ambientais e podem ser bastante utilizados em áreas tropicais onde á abundância de exposição à irradiação solar, com

produtividades que têm se tornado progressivamente competitivas comparadas a outras fontes. O problema que está relacionado com o alto custo dessa tecnologia pode ser minimizado se a escala da utilização da mesma for ampliada suficientemente, o que pode ser possível capacitando usuários finais para utilizarem áreas disponíveis nas coberturas de suas instalações com a instalação de painéis fotovoltaicos.

Usinas hidrelétricas

Usinas hidrelétricas têm significativo impacto sobre a biodiversidade, como demonstrado em diversos estudos, na medida em que alteram drasticamente o uso do solo em áreas de grande importância para a preservação da biodiversidade terrestre a aquática. E embora de difícil mensuração, as emissões de gases que intensificam o efeito estufa, oriundos dos reservatórios das usinas hidrelétricas, são reconhecidas como fatores que contribuem para o agravamento das mudanças climáticas, especialmente no Brasil. Estudos recentes têm mostrado que no passado não existiam normas suficientes para o seguro planejamento e projeto de usinas hidrelétricas. Uma questão que está presente na crescente polêmica que se verifica quando se torna público um projeto de usina hidrelétrica de grande porte é a magnitude dos impactos e a determinação do número correto de pessoas que devem receber compensações pelos danos causados pela implantação dessas usinas hidrelétricas. Mesmo com essas incertezas, a hidreletricidade representa uma alternativa efetiva para a redução de impactos ambientais na geração de eletricidade, particularmente em países em desenvolvimento, e com limitações ao porte das usinas.

Energia de biomassa de plantas (bagaço e palha de cana-de-açúcar no Brasil)

O Brasil é o principal produtor de cana-de-açúcar atualmente no mundo. Este é um marco do desenvolvimento industrial do país em cujas áreas tropicais se verifica a maior produtividade do planeta na produção de etanol. Apesar deste progresso, o Brasil ainda enfrenta alguns desafios no que se refere ao arranjo setorial para o aproveitamento do bagaço e da palha de cana-de-açúcar para a produção de energia. Uma sinergia em larga escala entre plantas a biomassa e plantas hidrelétricas indica ser bastante promissora, se for possível incluí-las em seu conjunto no mecanismo de realocação de energia, que assegura a otimização do parque gerador hidrelétrico interligado. O benefício dessa sinergia é materializado em maior garantia física do parque gerador interligado. Estudos mostram que hoje quase metade do consumo de energia primária no Brasil resulta de plantas a biomassa do bagaço e da palha de cana-de-açúcar (Fiala & Bacenetti, 2012). Há impactos ambientais resultantes da produção e utilização

de energia a partir da biomassa (Fiala & Bacenetti, 2012), mas, são muito menores do que os impactos provocados pela utilização de combustíveis fósseis.

Verificam-se discussões em diversos foros internacionais sobre a continuidade da expansão da produção de biocombustíveis no Brasil, levando à perda das florestas e de biodiversidade e de ecossistemas (Yan, n.d.).

Energia eólica

Energia eólica é um recurso de energia renovável em crescente escala. Em todo o mundo, a participação da geração eólica na matriz elétrica mundial já atingiu 2,7%, em 2013. Os Estados Unidos apresentam a maior proporção, de 27%, seguidos pela China, com 21%. O Brasil é o 15º país em geração de energia eólica, correspondendo a apenas 1% da geração eólica mundial.

O número de usinas de geração de energia eólica no Brasil quadruplicou nos últimos cinco anos, passando de 70 parques em 2011 para 316 em 2015. O montante representa uma expansão de 6.208 megawatts (MW) de capacidade instalada, que ao final de 2015, totalizou 7.633 MW, tendo crescido em media 109% ao ano desde 2011. (MME, 2016). A região Nordeste do Brasil responde por cerca de 60% de toda e energia eólica gerada no País, e a região Sul responde por 21% desse total. Estima-se que a geração eólica continuará crescendo no Brasil, pois, já foram contratados mais de 12 GW nos leilões de energia promovidos pelo governo federal, e a continuar essa expansão poderá representar cerca de 10% de toda a energia elétrica gerada no País em 2018.

Energia maremotriz

A energia das marés ainda não representa participação significativa na matriz energética do planeta. Seu aproveitamento se dá basicamente em duas formas: (i) o aproveitamento da energia potencial pela diferença de altura entre as marés alta e baixa; e, (ii) o aproveitamento da energia cinética das ondas. Na França, em 1967, foi construída a primeira usina elétrica maremotriz, ligada à rede nacional de transmissão. A usina, com capacidade instalada de 240 MW, aproveita a energia potencial das marés, por meio de uma barragem de 750 metros de comprimento, equipada com 24 turbinas, construída na foz do rio Rance, na região Noroeste da França.

No Brasil, temos grande amplitude das marés em São Luís - Baía de São Marcos, no Maranhão - com 6,8 metros e em Tutóia com 5,6 metros, também nos estuários do Rio Bacanga (São Luís -MA- marés de até 7 metros) e a Ilha de Maracá (AP - marés de até 11

metros). Entretanto, a topografia do litoral nesses locais requereria a construção de obras de grande impacto ambiental e custos elevados, tornando inviável o aproveitamento da energia maremotriz com as tecnologias atualmente disponíveis.

2.5 Fontes primárias de energia e o setor de energia elétrica no Brasil

O debate mais amplo sobre a energia no Brasil tem se concentrado na oferta de eletricidade, etanol e petróleo. Mas a matriz energética brasileira é composta por diferentes fontes de energia, com diferentes impactos ambientais, e um debate mais amplo sobre os reais benefícios, produtividade e impactos ambientais associados a cada fonte de energia e ao seu conjunto, poderia contribuir significativamente para uma maior consciencia e melhores decisões sobre a expansão da oferta de energia e a matriz energética brasileira. Cerca de 39,4% da energia produzida no Brasil se origina de fontes renováveis e da parte complementar de 60,6% a maior parcela vem do petroleo e seus derivados, correspondendo a também 39,4%. Ou seja, toda a energia renovável consumida no Brasil é equivalente a todo o volume de petróleo também consumido. Há perdas significativas na transformação de energia a partir das diversas formas para os usos finais, essas perdas chegam a cerca de 10% de toda a energia produzina no Brasil. Este contexto justifica a implementação de vigorosa política energética com foco na expansão da utilização de fontes renováveis e na promoção da eficiência no lado do consumo. A Figura 1 ilustra o fluxo oriundo das fontes de energia e sua utilização final.

Fluxo Energético

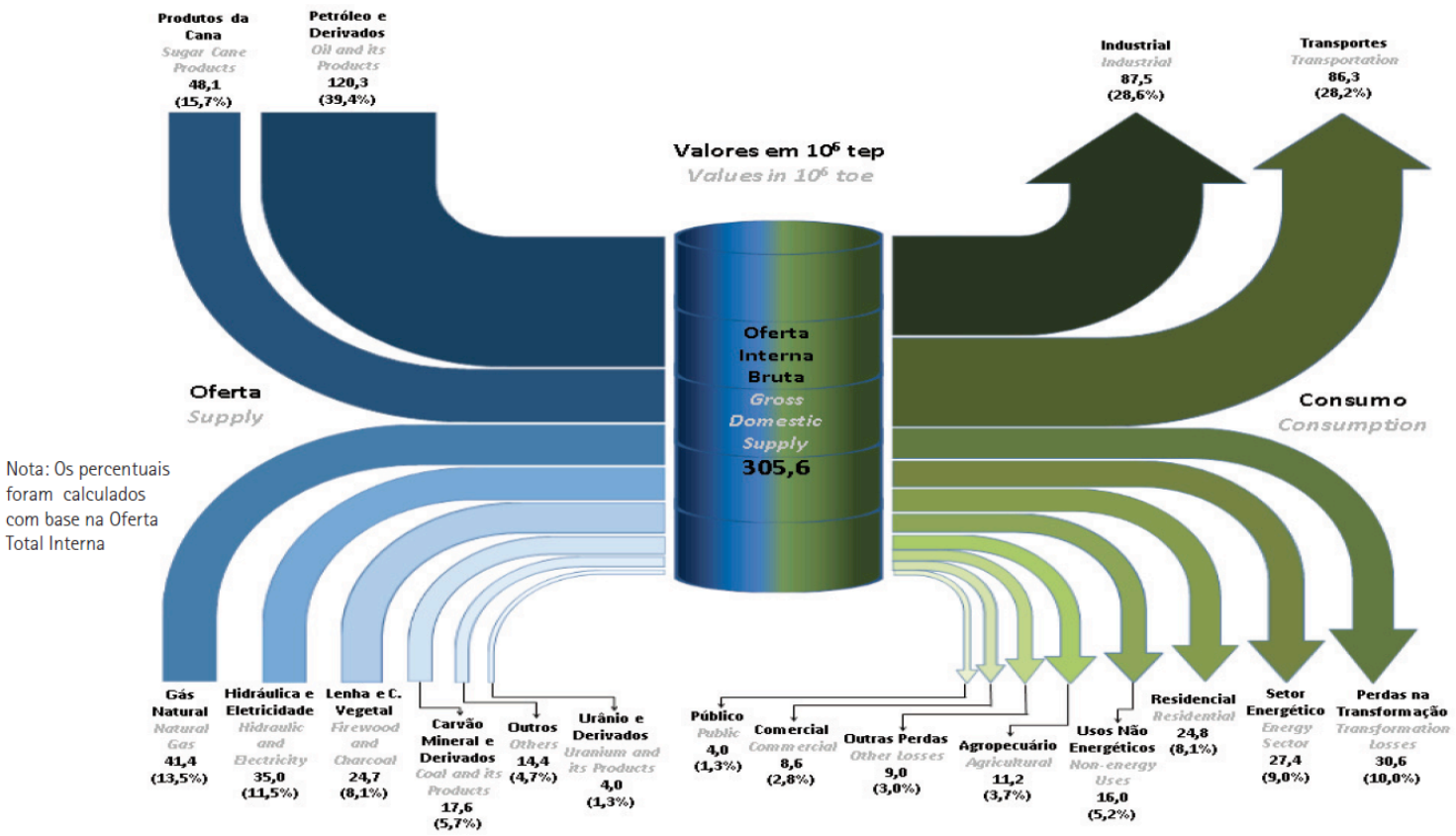


Figura 1. Fluxo de utilização da energia na matriz energética brasileira

Cerca de 65,2% de toda a energia elétrica consumida no Brasil é gerada por usinas hidrelétricas, 13,0% é oriunda do gás natural, e somente 7,4% é oriunda de biomassa. Considerado o volume de bagaço de cana-de-açúcar e palha gerados anualmente, que representa um enorme potencial para expansão da geração de eletricidade a partir dessa fonte renovável, justifica-se também que a política energética no Brasil incorpore fortes incentivos ao desenvolvimento de plantas termelétricas que utilizem esses resíduos da indústria sucro alcooleira, e que a otimização da utilização das duas fontes primárias, a hidráulica e os resíduos de biomassa, possa se dar com base em mecanismo de realocação de energia, que compense as sazonalidades das duas fontes.

O consumo *per capita* de energia elétrica no Brasil é atualmente da ordem de 2.630 kWh/hab/ano, e tem crescido em cerca de 2,5% (Anuário estatístico de energia elétrica, EPE, 2015). Historicamente, mesmo durante períodos de recessão economica, como o que o país atravessa atualmente, esse consumo *per capita* apresentou crescimento. Este é mais um fator que justifica o alinhamento de políticas de promoção da eficiência no consumo de energia, e, de incentivos à ampliação da utilização das fontes renováveis de energia existentes em abundância no país, notadamente, biomassa, solar e eólica, considerando os compromissos firmados pelo Governo Federal junto à Convenção Quadro de Mudanças Climáticas, no sentido da limitação de emissões de Gases de Efeito Estufa no Brasil.

Esse contexto do setor de energia no Brasil, observado à luz do contexto internacional de discussões sobre a questão energética, sugere que novos projetos de geração e promoção da eficiencia energética desenvolvidos por iniciativas de autoprodutores, produtores independentes, enfim, pela iniciativa privada, podem representar grande contribuição ao desafio da transição da matriz energética para um contexto de maior sustentabildade ambiental e economica (Taylor et al., 2008).

A consideração dos problemas relacionados ao consumo de energia e projeções como de eficiência energética, diversificação de fontes de energia com a expansão de fontes de energia renovável, permitindo maior participação no processo decisório da expansão da geração por parte da iniciativa privada e dos próprios usuários finais, a introdução de inovações, e em visões que se têm projetado para o futuro próximo (Abeeku , 2007), resultará em maior eficiência operacional e sustentabilidade, sobretudo das empresas no Brasil.

2.6 Contribuição das fontes renováveis de energia

A utilização das fontes renováveis de energia no Brasil tem crescido de forma consistente. Isto pode ser constatado nas últimas edições do Balanço Energético Nacional, embora em intensidade menor do que a possível. Estudos sobre a evolução da matriz energética brasileira (Mill et al, 2010) chamaram a atenção para o sucesso àquela época dos programas implementados em meados da década de 80 no Brasil, o Programa Nacional do Álcool e os Programas de Eficiência no consumo de energia elétrica e de combustíveis fósseis.

O foco daquelas políticas, naquela época, resultou em base consistente, que poderá ampliar, caso nova versão da política energética seja implementada, os benefícios da ampliação da utilização de fontes renováveis de energia, além das metas que têm sido propostas atualmente pelo Governo Brasileiro de ampliar em 15% a utilização de fontes renováveis de energia no período 2006 – 2020. Essa meta poderia ser estendida a 30% até 2020 (Mill et al, 2010).

Com um ponto de vista de estratégia (Kankam e Shelter, 2009) propõem que a construção de um futuro energético mais adequado para o desenvolvimento do Brasil requer uma combinação de políticas que promovam a utilização vigorosa da utilização de fontes de energia renováveis. Tendo em mente a meta de avançar com a utilização de energia renovável, o Brasil necessita de motivadores que ajudem aos tomadores de decisões de investimento em inovações na área de energia, a ultrapassarem os obstáculos da introdução de inovações (Pearce, 1991). É necessário reduzir-se a tributação sobre a importação e a tributação doméstica sobre equipamentos para o aproveitamento de fontes renováveis de energia. Esta abordagem de desenvolvimento está em linha com a recomendação de (Kankam e Aid, 2009) sobre a necessidade de uma combinação de instrumentos de política energética para fontes renováveis de energia para efetivamente promover o desenvolvimento.

As vantagens relacionadas à utilização de fontes renováveis de energia não podem ser minimizadas. Diversas vantagens das fontes renováveis de energia consideram a criação de postos de trabalho e a garantia de que uma nação seja menos vulnerável em seu suprimento de energia (Goldemberg, 1994). Isto pode ser facilmente compreendido à luz do fato de que o capital investido em fontes renováveis de energia é normalmente gasto em materiais e com pessoas que constroem, operam e mantêm as respectivas instalações, ao invés da realização de despesas com a compra de energia.

3. Método

3.1. Conceito de produtividade ambiental de fontes de energia

As teorias de produção descritas pelos pensadores da economia clássica, incluindo Adam Smith e Marx, consideraram a força de trabalho como o principal fator para a geração de valor econômico. Quando foram desenvolvidas, aquelas teorias não consideraram formalmente os recursos ambientais como fatores de produção, entretanto, estes representam limitantes reais do crescimento econômico, limitação essa que varia em função das tecnologias e das políticas energéticas adotadas.

Os fluxos comerciais de energia e os recursos ambientais empregados em sua produção são fatores reais de produção econômica, e, ambos limitam o crescimento econômico, assim como a disponibilidade e tempestivo emprego de capital no investimento em infra-estruturas também limita o crescimento econômico.

A "produtividade ambiental" de fontes de energia constitui-se em elemento que define uma métrica para se avaliar fontes e matrizes energéticas quanto à sua eficiência ambiental, entendida essa eficiência pela razão entre o fluxo de energia ofertado ao consumo e a quantidade, ou extensão, da biosfera e da atmosfera necessárias para a oferta de energia correspondente.

Medidas da demanda imposta pelo homem sobre ecossistemas têm sido feitas, em geral tomando-se medidas de áreas necessárias para as instalações de produção de energia como expressão do tamanho da "pegada ecológica" deixada pelo homem na satisfação de suas necessidades, entretanto, há também críticas sobre o cálculo feito tomando-se somente a área como variável explicativa do impacto. A consideração do fluxo de energia de cada fonte energética que compõe a matriz de energia, e todas as extensões físicas da biosfera e da atmosfera necessárias à produção comercial do respectivo fluxo de energia, constitui-se em contribuição mais consistente, tanto para a discussão acadêmica quanto para a governança da política energética.

A abordagem do estudo desenvolvido considera a "produtividade ambiental" como a razão entre a Energia fornecida por determinada fonte de energia ou matriz energética e o somatório das Áreas impactadas pela respectiva produção de energia, compreendendo: (i) a Área

utilizada pelas respectivas instalações de produção de energia, qualificadas segundo sua importância e prioridades estabelecidas para a conservacão da biodiversidade na respectiva região, e, (ii) a Área equivalente requerida para a formação e manutenção de estoques de carbono que correspondam ao volume de emissões de gases de efeito estufa resultantes da produção de energia com a respectiva fonte. Esses "estoques de carbono" poderiam ser naturais embora passíveis da intervenção humana para sua formação e expansão, como as florestas nativas, cuja expansão e regeneração poderiam representar estoques adicionais compensadores de emissões, ou, poderiam ser artificiais, empregando tecnologias de captura e armazenagem de CO_2 dedicadas, junto a fontes emissoras como usinas termelétricas, em cujos arranjos o carbono capturado e armazenado em reservatórios subterraneos, ou misturado à água do mar, empregando tecnologias ainda em desenvolvimento comercial, tais como: (i) a tecnologia Pós-combustão, na qual o CO_2 é separado dos gases emitidos através da injeção dos mesmos em uma coluna líquida contendo solventes como a Amonia, resultando na separação do CO_2 que pode ser armazenado em reservatórios subterraneos, ou misturado à água do mar; (ii) a tecnologia Oxyfuel, na qual a mistura ar-combustível é enriquecida com oxigênio puro, resultando em emissões de maior conteúdo de CO_2 e vapor d'água, por sua vez possibilitando o bombeamento do CO_2 para um reservatório; e, (ii) a tecnologia Pré-combustão, aplicável principalmente em usinas termelétricas a carvão, na qual é empregada a gaseificação do carvão, produzindo um gás sintético rico em monóxido de carbono e hidrogênio, por sua vez destinados o primeiro a reação com água, formando CO2 que então é capturado e armazenado, e mais hidrogênio, e o segundo queimado em turbinas a gás para a produção de eletricidade. Adotamos no estudo desenvolvido os reservatórios naturais das florestas nativas, como referência para os cálculos de produtividade ambiental de fontes de energia.

Produtividade ambiental de uma fonte de energia é um indicador do esforço ambiental requerido da biosfera e da atmosfera, para gerar energia por meio da respectiva fonte. A "produtividade ambiental" de uma determinada fonte de energia *i* é expressa pela razão entre a quantidade de energia gerada pela fonte em determinado intervalo de tempo, e a extensão das áreas impactadas na biosfera e na atmosfera, esta última expressa em extensão equivalente de área na biosfera, conforme ilustra a Equação (1).

$$P_i = \frac{EU_i}{B_i + A_i} \qquad (1)$$

Onde: P_i = Produtividade ambiental da fonte i

EU_i = Energia gerada pela fonte i

B_i = Área da biosfera impactada pela instalação da fonte i

A_i = Área equivalente de cobertura vegetal nativa necessária para compensar, em estoque, o carbono emitido sob a forma de Gases de Efeito Estufa pela fonte i, em determinado período de tempo, necessário à geração EU_i de energia

Em uma matriz energética formada por n plantas geradoras, a produtividade ambiental da mesma pode ser calculada pela expressão (2).

$$P = \frac{\sum_{i=1}^{n} EU_i}{\sum_{i=1}^{n} (B_i + A_i)} \qquad (2)$$

3.2. Equações para aplicação do conceito de produtividade ambiental de fontes de energia

A equação (1), pode ser decomposta em dois fatores, quais sejam, o fator de capacidade médio da instalação da fonte de energia i, e, o esforço ambiental demandado para a instalação da mesma.

A equação (3) ilustra essa decomposição de fatores.

$$P_i(t) = \frac{EU_i(t)}{CI_i} \times \frac{CI_i}{B_i + A_i} \qquad (3)$$

Onde:

CI_i = Capacidade Instalada da fonte de energia *i*

Os demais fatores da equação (3) foram definidos na equação (1).

Considerando intervalos de tempo de 1 ano para os dados de energia, EU_i / CI_i é de fato o fator de capacidade da fonte de energia em base anual. A equação (4) é a forma adotada no cálculo.

$$P_i = FC_i \times \frac{CI_i}{B_i + A_i^T} \qquad (4)$$

Onde:

$P_i =$ Produtividade ambiental da fonte de energia *i*

$FC_i =$ Fator de capacidade em base anual da fonte de energia *i*

$B_i =$ Área da biosfera impactada com a instalação da fonte *i*

$A_i^T =$ Área equivalente da biosfera necessária para remover da atmosfera e manter em estoque volume equivalente de carbono, emitido sob a forma de gases de efeito estufa na operação da planta.

Portanto, a produtividade ambiental da fonte de energia *i* é igual ao produto do fator de capacidade médio da mesma, pela razão entre a sua capacidade instalada e a extensão das áreas impactadas, da biosfera e da área equivalente da atmosfera, durante o determinado período de tempo *T*.

3.3. Produtividade ambiental e pegada ecológica

A adoção de uma maior "produtividade ambiental" é equivalente à adoção de uma menor "pegada ecológica", mas os métodos para se determinar uma e outra são distintos. A determinação da "produtividade ambiental" de fontes de energia utiliza parâmetros de projeto das plantas geradoras de energia, sendo mais diretamente associada a informações comumente utilizadas por decisores de projetos de investimento em novas plantas de geração de energia elétrica e formuladores de políticas energéticas; enquanto que a determinação da "pegada

ecológica" de plantas geradoras de energia ou de matrizes energéticas requer sua contextualização relativa à capacidade de regeneração do planeta, utilizando parâmetros externos aos processos decisórios de plantas de geração de energia, requerendo a incorporação formal desses parâmetros externos nos respectivos processos decisórios. A "produtividade ambiental" de fontes de energia pode ser incorporada nos processos decisórios de implantação de novas fontes de energia, como um limitador para a aprovação de projetos, e respectivos atos de autorização pela autoridade responsável pela autorização ou concessão da nova planta, como um piso, ou valor mínimo de "produtividade ambiental", a ser observado nos processos de aprovação de projetos, e respectivos atos de concessão ou autorização.

"Produtividade ambiental", de qualquer fonte cuja produção é sustentada a partir de recursos naturais, considera quantidades absolutas de extensões da biosfera e da atmosfera para sustentar a produção; enquanto a "pegada ecológica" considera capacidades relativas da biosfera associadas à produção, comparadas com a capacidade global do planeta para sustentar a referida produção.

A "pegada ecológica" significa a razão entre a quantidade demandada de um produto associada à biocapacidade do planeta requerida para sustentar a referida produção, e a biocapacidade disponível (Borucke et al, 2013).

Em forma elementar, a "pegada ecológica" é expressa pela equação (5).

$$EF = \frac{D}{Y} \tag{5}$$

onde: EF corresponde à "pegada ecológica"

D é a demanda anual de um produto

Y é a produção anual global do mesmo produto

A "pegada ecológica" tal como conceitualizada não considera recursos não renováveis em seu cálculo, na medida em que somente considera recursos renováveis na biosfera.

A "pegada ecológica" assume que a ocupação humana e a infraestrutura frequentemente ocupam areas agricultáveis e férteis. Considera que a instalação da infraestrutura implica em renúncia à produção agrícola. Assim, áreas ocupadas por infraestruturas de plantas de geração de energia reduzem a capacidade de regeneração do território no qual se inserem, ao mesmo

fator de produtividade de areas agricultáveis.

O cálculo da "pegada ecológica" dessas infraestruturas, particularmente para usinas hidrelétricas é feito com a equação (5) (Wackernagel et al, 2005).

$$\text{Footprint}_{\text{built-up}}\,(\text{gha}) = \text{Area}_{\text{built-up}}\,(\text{ha}) * \text{Equivalence Factor}_{\text{built-up}}\,(\text{gha/ha}) * \text{Yield Factor}_{\text{cropland}} \quad (5)$$

Onde:

$\text{Footprint}_{\text{built-up}}$ (gha) =	Pegada ecológica em hectares globais
$\text{Area}_{\text{built-up}}$ (ha) =	Área ocupada pela planta de geração de energia em hectares
Equivalence $\text{Factor}_{\text{built-up}}$ (gha/ha) =	Fator de equivalência em hectares globais por hectare
Yield $\text{Factor}_{\text{cropland}}$ =	Fator de produtividade da area

As áreas utilizadas na formação dos reservatórios hidráulicos de usinas hidrelétricas podem ter grande variação em sua produtividade, e em geral não são bem documentadas. Devido a essa lacuna de informação os citados autores adotaram um fator de equivalencia médio global igual a 1,0 e um fator de produtividade também igual a 1,0. E considerando que o consumo de energia elétrica é registrado e melhor documentado que o uso do solo nas áreas dos reservatórios antes da construção das usinas hidrelétricas, utilizam um fator constante para converter o uso de energia em área, pela equação (6):

$$\text{Footprint}_{\text{hydro area}}\,(\text{gha}) = \text{Energy (GJ)} / \text{constant (GJ/ha)} * \text{Equivalence Factor}_{\text{hydro area}}\,(\text{gha/ha}) \quad (6)$$

Onde:

$\text{Footprint}_{\text{hydro area}}$ (gha) =	Pegada ecológica
Energy (GJ) =	Energia gerada em Gigajoules por hectare
constant (GJ/ha) =	Constante de conversão do uso de energia em área
Equivalence $\text{Factor}_{\text{hydro area}}$ (gha/ha) =	Fator de equivalência

O fator constante de conversão do uso de energia em área foi tomado como uma média das vinte maiores usinas hidrelétricas em uma base global (WWF, 2000). E empiricamente a "pegada ecológica" foi reduzida em dez vezes para os casos de usinas hidrelétricas instaladas

em areas montanhosas, como na Suiça e na Noruega, para compensar o fato de que usinas hidrelétricas nessas áreas necessitam de menores areas para seus reservatórios, e o fato de que em geral áreas montanhosas não são agricultáveis como as áreas de vales de rios.

Considerada esta exemplificação da expressão do cálculo da "pegada ecológica" para infraestruturas, que pode ser estendida de modo geral para as plantas de geração de energia de dos diversos tipos de fontes, com exceção da fonte nuclear, devido à natureza diversa e significativamente distinta dos impactos e riscos ambientais associados à mesma; e comparando com o conceito e equações de cálculo da "produtividade ambiental" de fontes de energia, entendemos serem ambos conceitos de métricas que podem ser utilizados em esforços no sentido da reversão da tendência de progressão dos impactos ambientais associados à geração de energia elétrica.

A "produtividade ambiental" das fontes de energia pode, entretanto, ser útil para auxiliar nesses esforços, a partir de referências circunscritas aos processos decisórios de instalação de novas plantas geradoras de energia. E pode também auxliar em tomadas de decisões pontuais de descomissionamento de plantas de geração de energia que deveriam ser eliminadas, devido aos seus muito elevados impactos ambientais, evidenciados por sua muito baixa "produtividade ambiental", como é o caso de algumas plantas a carvão e de algumas plantas que consomem combustíveis fosseis líquidos.

4. Aplicação do conceito de produtividade ambiental às fontes do Sistema de Potência Interligado Nacional (SIN) e agregados da matriz energética brasileira

O cálculo da produtividade ambiental das fontes de energia pode então ser efetuado a partir do fator de capacidade da fonte, de sua capacidade instalada, e, da área total impactada com sua instalação e operação, área essa que compreende à área da biosfera impactada com a instalação da fonte, e, a área equivalente de cobertura vegetal nativa (da biosfera) correspondente ao estoque de carbono que deve ser acrescentado a cada ano, para compensar os impactos sobre a atmosfera, decorrentes das emissões de gases que provocam a intensificação do efeito estufa, resultantes da operação da fonte de energia.

As áreas utilizadas na instalação das plantas geradoras das fontes de energia, como também as capacidades instaladas, constituem-se em informações em geral utilizadas nos processos de autorização e licenciamento ambiental.

Apresenta-se nesta sessão a aplicação do conceito de "produtividade ambiental de fontes de energia" e sua aplicação ao caso das usinas de geração de energia elétrica do SIN, e, dos agregados das principais fontes de energia utilizadas no Brasil, quais sejam, a energia da cana-de-açúcar, a hidroeletricidade e o petróleo.

4.1. Produtividade ambiental das fontes de energia do SIN

A compatibilidade entre as informações de áreas, capacidades instaladas e energia é um desafio para o cálculo consistente da "produtividade ambiental", na medida em que registros mais precisos das áreas afetadas em geral são obtidos de estudos de impactos ambientais associados à licença ambiental da respectiva instalação. Os estudos ambientais apresentam critérios que podem variar em alguns aspectos, de um para outro estudo, embora todos sejam fundamentados nos mesmos preceitos da legislação; este foi o maior desafio enfrentado para se obter uma base de dados confiável e comparável para as usinas do Sistema Elétrico Interligado Nacional (SIN) e para os agregados da matriz energética, nos ensaios de cálculos desenvolvidos.

O Ministério do Meio Ambiente, em cumprimento do compromisso firmado pelo Brasil na Convenção sobre Diversidade Biológica, assinada em 1992, promoveu ampla avaliação dos ecosistemas no território brasileiro, estabelecendo áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade, resultando em classificação que permite diferenciar a importância e equivalência entre áreas classificadas. Essas áreas prioritárias para conservação da biodiversidade foram originalmente mapeadas e georreferenciadas, a partir do disposto na Portaria MMA N° 126, de 27 de maio de 2004, e revisadas periodicamente nos termos daquela Portaria, tendo sido realizada uma primeira revisão a partir do disposto na Portaria MMA N° 09, de 23 de janeiro de 2007.

O mapeamento resultou na classificação de áreas de importância biológica representadas em mapas publicados pelo MMA, com importâncias relativas graduadas por fator multiplicador, com a notação apresentada na Tabela 2. A graduação relativa de importância alta é apresentada em tres cores distintas, para distinção entre biomas e microbacias hidrográficas que, embora apresentem mesma graduação relativa, têm características distintas entre si.

Tabela 2. Classificação das áreas prioritárias para conservação da biodiversidade

Cor associada à prioridade	Importância	Graduação relativa
Vermelha	Extremamente alta	10.000 x Área afetada
Laranja	Muito alta	8.000 x Área afetada
Amarela	Alta	5.000 x Área afetada
Cinza	Alta	5.000 x Área afetada
Roxo	Alta	5.000 x Área afetada
Azul	Insuficientemente conhecida	1.000 x Área afetada

Fonte: Ministério do Meio Ambiente, 2004

As fontes de energia do SIN foram representadas em um mapa do Brasil segundo sua localização geográfica, a superposição deste mapa com o mapa de áreas prioritárias resultou no mapa de localização de fontes de energia segundo a importância de sua localização para a preservação da biodiversidade. A superposição de mapas foi feita utilizando arquivos de imagens georreferenciadas, e, utilizando o aplicativo Google Earth, os mapas resultantes estão apresentados nas Figura 2, 3, 4 e 5.

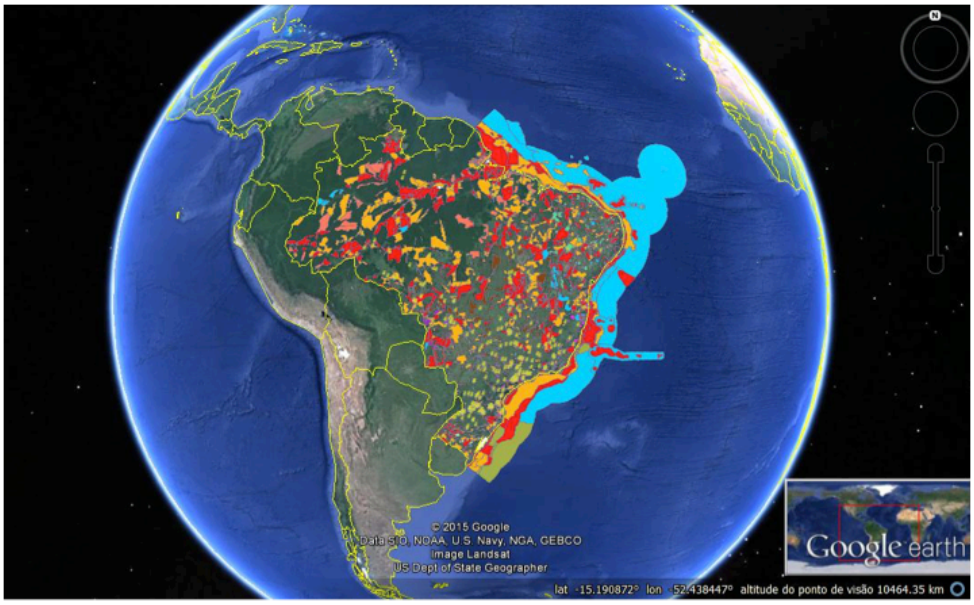


Figura 2. Mapa de áreas prioritárias segundo sua importância para a biodiversidade

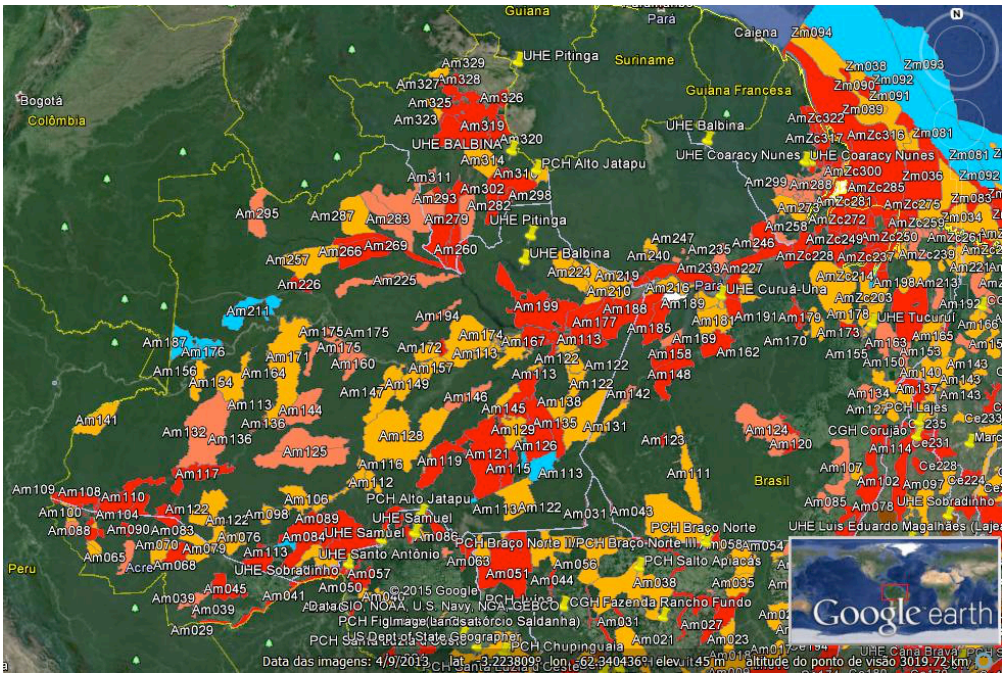


Figura 3. Mapa de fontes de energia e áreas prioritárias para conservação da biodiversidade, da região norte do Brasil

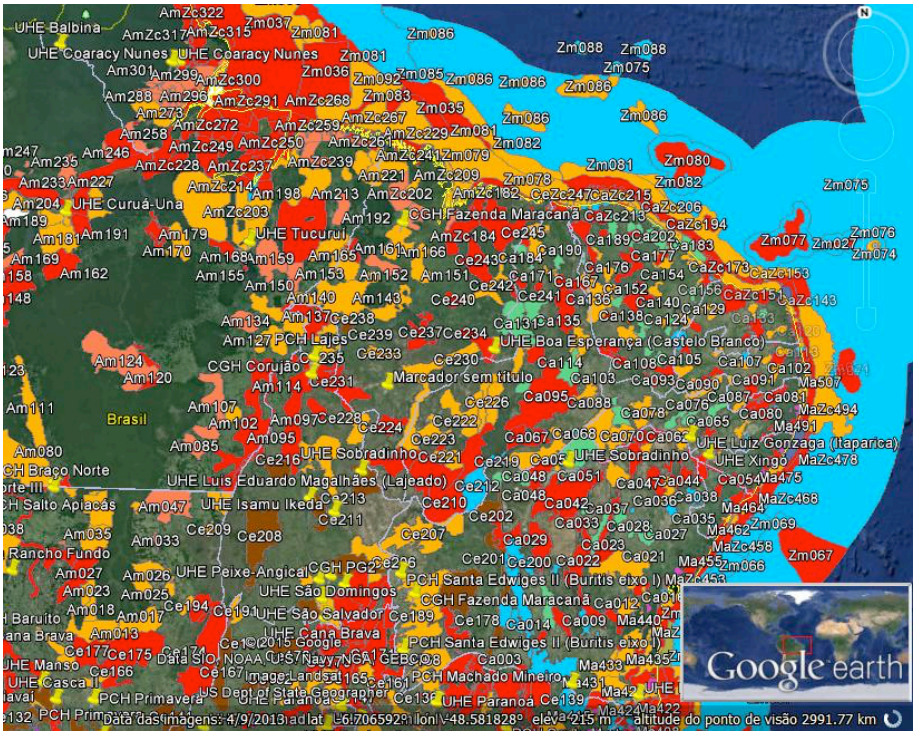


Figura 4. Mapa de fontes de energia e áreas prioritárias para conservação da biodiversidade da região nordeste do Brasil

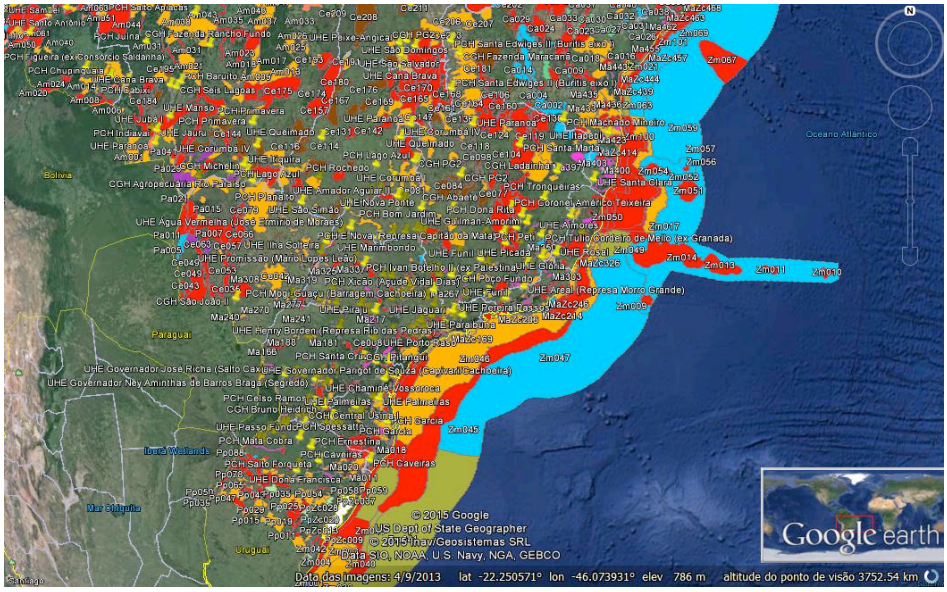


Figura 5. Mapa de fontes de energia e áreas prioritárias para conservação da biodiversidade da região sudeste e sul do Brasil

Com base nas localizações das fontes de geração de energia elétrica e sua superposição no mapa de áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade, foi ajustada a área considerada no cálculo da produtividade ambiental, utilizando-se fatores multiplicativos iguais aos apresentados na Tabela 2. Há que se resslvar que essa consideração é valida para o período de tempo compreendido no ciclo de vida de cada planta, e portanto o cálculo da produtividade ambiental das fontes de energia igualmente deve se referir ao período compreendido pelo respectivo ciclo de vida.

As áreas utilizadas na instalação de usinas hidrelétricas foram obtidas a partir do banco de dados de instalações de geração mantidos pela (ANEEL, 2015).

Para usinas termelétricas, cujas áreas de instalação não constam de forma completa no referido banco de dados, e, considerando não estarem disponíveis em fontes seguras as respectivas informações, foi utilizado o fator representativo de 4,54 x 10^{-2} ha/MW, correspondente à média de valores específicos encontrados na literatura técnica de usinas termelétricas.

Os impactos ambientais de parques eólicos em geral são localizados, com interferências mais importantes relacionadas à avifauna, ruídos e interferências eletromagnéticas. O esforço da biosfera e da atmosfera impactadas é considerado proporcional à extensão da área utilizada para instalação do parque eólico. Essa área depende do local, particularmente da topografia da área, obstáculos e particularidades do relevo; e em geral é considerada equivalente a 4 a 8 vezes o diâmetro do rotor para cada aerogerador. No Brasil, tem-se adotado o parâmetro de 6 MW/km^2 (CEPEL, SÁ e DUTRA, 2011), que equivale a 1,67x10^{-2} ha/kW.

No caso das plantas solares, os impactos ambientais também são localizados, com interferências mais importantes relacionadas à cobertura vegetal perdida na área da instalação. O esforço da biosfera é então considerado como sendo proporcional à extensão da área utilizada para a instalação da planta solar. As diferentes tecnologias de plantas solares, incluindo as termosolares e as fotovoltaicas, requerem diferentes áreas por unidade de capacidade instalada. Particularmente as tecnologias fotovoltaicas têm apresentado progressivo aumento da densidade de potência, por unidade de área de instalação. Estima-se o parâmetro de 0,65 ha/MW, equivalente a 6,5x10^{-4} ha/kW como representativo para plantas solares em seu estágio de tecnologia atual, a partir de projetos, ainda por serem implantados no Brasil.

As áreas correspondentes a estoques de carbono, equivalentes às emissões de gases de efeito estufa na operação das fontes de energia ao logo do período de concessão ou autorização considerado (30 anos), foram calculadas tomando-se por base valores característicos de

estoques de carbono verificados em florestas tropicais na região sudeste do Brasil, que representam um mix de espécies arbóreas de florestas da mata atlântica e do cerrado. Um fator médio de 373,31 tCO_2eq/ha foi comprovado em projeto de restauração florestal desenvolvido no Estado de São Paulo em 2007, para restauração florestal de Áreas de Preservação Permanente (APP) no entorno das usinas hidrelétricas instaladas no rio Tietê e no entorno da usina hidrelétrica Água Vermelha, instalada no rio Grande (AES Tietê, 2007). Esse fator representa a quantidade de Carbono removida da atmosfera e estocada nos troncos, raízes, galhos, e, folhas das árvores. Há uma outra quantidade significativa de carbono que se incorpora na matéria orgânica sobre o solo e no solo, que pode elevar o fator para cerca de 600 tCO2eq/ha (AES Tietê, 2007). Foi adotado o mesmo fator como representativo de áreas nas regiões norte, nordeste e sul, embora se saiba que há diferenças entre as representatividades, entretanto, para que se pudessem adotar fatores diferentes para cada região, seriam necessários ajustes nos valores encontrados na literatura disponível no Brasil, de forma a estabelecer uma base confiável e comparável, trabalho esse que não foi possível ser desenvolvido no tempo utilizado para o desenvolvimento desta Tese. Não obstante ao propósito aqui estabelecido, recomenda-se esse esforço em futuros desenvolvimentos.

As emissões de gases de efeito estufa oriundas da operação das plantas do SIN ocorrem essencialmente nas emissões atmosféricas das plantas térmelétricas, e de metano (CH_4) dos reservatórios das usinas hidrelétricas. As emissões associadas à fabricação de equipamentos utilizados nas fontes de energia, bem como em obras de construção das mesmas, não foram considerados na presente abordagem, cabendo registrar-se também este como aspecto a ser desenvolvido em refinamento do cálculo da produtividade ambiental. As demais fontes, eólica e solar, têm associadas apenas emissões atmosféricas na fabricação dos equipamentos e obras de sua instalação, portanto não foram consideradas no cálculo de emissões oriundas de sua operação.

Para as emissões das plantas termelétricas foram adotados fatores de emissões médios representativos do conjunto das fontes termelétricas conectadas no SIN, considerando dados publicados pela (EPE, 2015). Esses fatores sao apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Fatores de emissões médios de plantas termelétricas no SIN

Combustível	tC/TJ	tCO_2/MWh
Gás Natural	15,30	0,70
Carvão	25,80	1,38
Óleo Combustível	-	-

Fonte: Empresa de Planejamento Energético, 2015

Para as emissões de metano nos reservatórios das usinas hidrelétricas, adotaram-se fatores obtidos a partir de medições realizadas em reservatórios hidráulicos de usinas hidrelétricas nas regiões norte, sudeste e sul (PINGUELLI et al., 2008), cujos valores medidos apresentaram grande variação, cabendo portanto ressalvar-se a utilização dos mesmos pelo histórico reduzido, e pelas variações encontradas. Entretanto, o trabalho consultado revela tendências e comportamentos que explicam, ainda que preliminarmente e sob as ressalvas apontadas, a razoabilidade da adoção de fatores representativos de emissões de CH_4 em períodos de tempo a partir da formação dos reservatórios. Consideramos aqui sempre o primeiro periodo de concessão das usinas hidrelétricas, por ser o período no qual se verificam as emissões mais intensas devido à decomposição da materia orgânica submersa com a formação do reservatório, adotando os fatores apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Fatores de emissões estimados de reservatórios de plantas hidrelétricas

Período	Kg C/km^2/dia	Kg $CO_{2\text{-}eq}$/ha/dia	Kg$CO_{2\text{-}eq}$/ha
1º e 2º anos	50	10,5	7.665,0
3º ao 10º anos	20	4,2	12.265,0
11º ao 30º anos	5	1,1	8.030,0
Total			27.960,0

Fonte: Oecologia Brasiliensis, 12(1): 116-129,2008

Os valores de produtividade ambiental das fontes de energia do SIN foram calculados com o auxílio de planilha elaborada com o software Excel, cujo arquivo é disponibilizado

juntamente com o arquivo eletrônico do presente documento. A Tabela 5 apresenta um extrato com dados representativos de períodos históricos durante os quais foram verificadas séries relativamente homogêneas. Observa-se nesse extrato o significativo aumento da produtividade ambiental com a introdução das fontes eólicas na primeira década do Século XXI, e, na primeira metade da segunda década.

Tabela 5. Produtividade ambiental de fontes do SIN em evolução histórica e por tipo de fonte

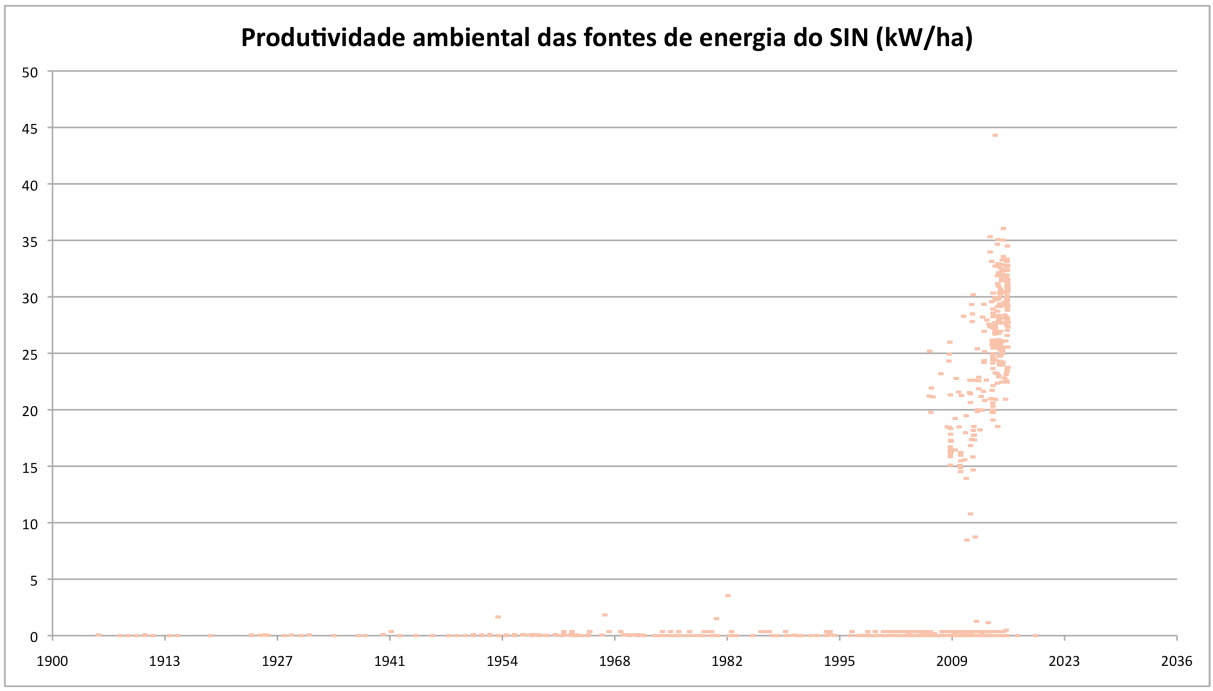
Usina	Ano	Fonte primaria de energia	Potência outorgada (kW)	Garantia física ($MW_{médios}$)	FC (%)	Área impactada da Biosfera (ha)	Área impactada da Atmosfera (ha)	Área total impactada	Produtividade ambiental (kW/ha)
Canastra	1905	UHE	44.800	24,00	53,57	358.982,44	16.728,58	375.711,03	0,0639
Rasgão	1925	UHE	22.000	11,84	53,82	176.286,02	8.214,93	184.500,95	0,0642
Fonte Nova	1940	UHE	131.988	104,00	78,80	1.057.619,98	49.285,09	1.106.905,07	0,0940
Cachoeira Dourada	1959	UHE	658.000	415,00	63,07	5.272.554,66	245.701,05	5.518.255,71	0,0752
Porto Primavera	1999	UHE	1.540.000	1.017,00	66,04	12.340.021,54	575.045,00	25312057,87	0,0787
Uruguaiana	2000	UTE (Gás Natural)	639.900	565,10	88,31	29,05	1.576.472,51	1.576.501,56	0,3585
Parque Eólico Osório	2006	EOL	50.000	17,71	35,42	835	0	835	21,2096
Volta do Rio	2010	EOL	42.000	19,84	47,24	701.4	0	701,4	28,2863
Dracena 1	-	UFV	30.000	5,90	19,67	19,50	0	19,50	302,5641
Solar Caetité	-	UFV	29.970	6,60	22,02	19,48	0	19,48	338,8003

Nota: 1. A Tabela 5 apresenta um extrato de algumas das fontes de energia do SIN, segundo sua data de comissionamento; foi extraída de planilha eletrônica extensa, contendo a relação completa das fontes do SIN, com número muito elevado de linhas

2. A planilha eletrônica contendo a relação completa das fontes do SIN é disponibilizada juntamente com o documento desta Tese.

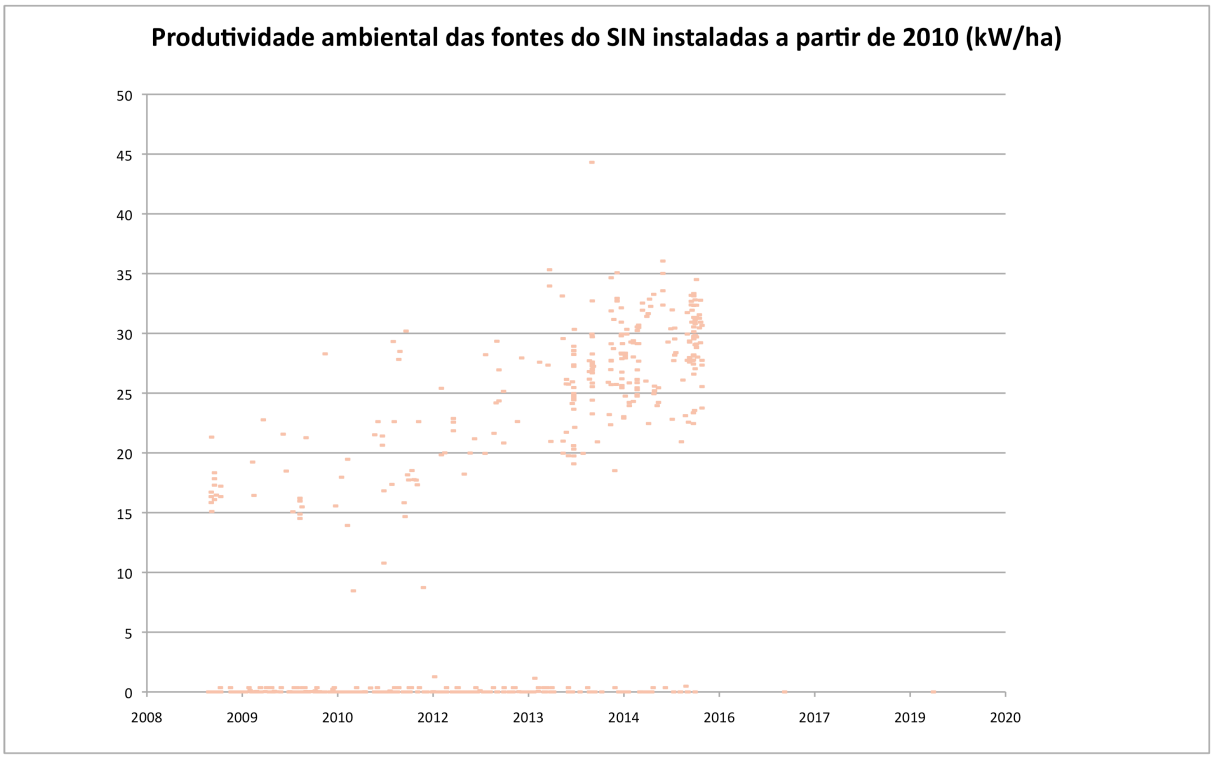
O Gráfico 1 ilustra a evolução no tempo da Produtividade Ambiental das fontes do SIN, no qual se assinala acentuado aumento da produtividade ambiental na primeira década do Século XXI, quando se iniciou a implantação de usinas eólicas no Brasil.

Gráfico 1. Produtividade ambiental das fontes do SIN em perspectiva histórica



O Gráfico 2 ilustra a dispersão de valores de produtividade ambiental de fontes do SIN, nas primeiras duas décadas do Século XXI, indicando significativo aumento dos valores de produtividade ambiental na segunda década.

Gráfico 2. Produtividade ambiental das fontes do SIN nas primeiras duas décadas do Século XXI



4.2. Produtividade ambiental dos principais agregados da matriz energética brasileira

O conceito de produtividade ambiental de fontes de energia pode ser aplicado a agregados da matriz energética, embora nesse caso não tenha sido possível incorporar no cálculo a diferenciação de áreas prioritárias para a conservação da biodiversidade, nem as emissões oriundas de reservatórios de usinas hidrelétricas, devido à indisponibilidade dos respectivos dados a nível agregado da matriz energética. Também, os sistemas de produção e disponibilização de energia apresentam parcelas de perdas de energia inerentes às tecnologias de sua produção e de transporte, até sua disponibilização para uso final, tornando necessária sua expressão em uma base comum de energia disponibilizada por fonte, para que a comparação entre as mesmas não seja distorcida.

O conceito da produtividade ambiental das fontes de energia não implica que o respectivo cálculo considere a energia útil, que incorpore as eficiências dos usos finais das diversas formas de energia. Deve ser calculada com base na energia efetivamente disponibilizada para

os usos finais. A base de dados mais consistente de agregados de energia por fonte, que apresenta de forma destacada as perdas de energia (antes do consumo final) é o Balanço de Energia Útil (BEU), cuja última publicação feita pelo MME foi em 2006; entretanto, o BEU incorpora também os rendimentos energéticos dos usos finais das formas de energia, cuja evolução têm apresentado perfil semelhante à evolução das eficiências de usos finais das diversas formas de energia.

Assim, considera-se que as tendências de evolução da produtividade ambiental das fontes primárias de energia, calculada a partir de seus agregados, pode ser razoavelmente observada, a partir do cálculo efetuado com base nos agregados de energia útil apresentados no BEU.

Para comparação entre as fontes de energia, foi adotada a unidade de toneladas equivalentes de petroleo (tep), resultando, portanto, a unidade de toneladas equivalentes de petróleo por hectare (tep/ha) para a produtividade ambiental das fontes agregadas de energia.

Assim considera-se razoável visualizar-se as tendências de evolução das produtividades ambientais das fontes agregadas estudadas, de forma consistente com o que seria esperado a partir de um estudo detalhado de fontes individualizadas.

Três das principais fontes comerciais de energia no Brasil são: (i) a Cana-de-Açúcar, (ii) a Hidroeletricidade, e (iii) o Petróleo, deste último considerada somente a parcela de seu consumo utilizada para produção de energia final, qualquer que seja sua utilização. Juntas estas fontes respondem por cerca de 70% da oferta interna de energia.

Os cálculos da produtividade ambiental dos agregados das fontes de cana-de-açúcar, hidreoeletricidade e petróleo, bem como de grande parte das usinas de geração de energia elétrica que compõem o parque gerador do SIN são apresentados a seguir.

A Tabela 6 apresenta valores de Energia Primária obtidos no BEU, apresentado pelo MME juntamente com o Balanço Energético Nacional de 2006, Ano Base 2005, último ano da série histórica de agregados publicada a partir de dados coletados junto a todas as fontes primárias de energia, e, consistidos em agregados e em energia útil. Nos anos posteriores a 2006, o MME tem publicado o Balanço Energético Nacional, contendo em anexo breve comentário sobre o balanço de energia útil, porém sem acrescentar dados atualizados.

Tabela 6 - Energia Primária

Energia Primária	(Mil tep)		
	1990	1994	2004
Cana-de-açúcar	18451	22010	29385
Hidroeletricidade	17770	20864	27589
Petróleo	32550	34446	76641

Fonte: MME, 2006

A Tabela 7 apresenta os rendimentos energéticos, também obtidos no BEU publicado em 2006, para os agregados das fontes energéticas consideradas. Os valores dos rendimentos das fontes de energia a nível agregado é aqui apresentado como coadjuvante na caracterização dos agregado das fontes.

Tabela 7 - Rendimentos Energéticos

Rendimentos energéticos	(%)		
	1990	1994	2004
Cana-de-açúcar	65	71,6	76,7
Hidroeletricidade	58,1	64,3	68,8
Petróleo	35,6	40,5	43,4

Fonte: MME, 2006

A Tabela 8 apresenta os valores calculados de Energia Gerada para os agregados das fontes.

Tabela 8 - Energia Gerada

Energia Gerada	(Mil tep)		
	1990	1994	2004
Cana-de-açúcar	11993	15759	22538
Hidroeletricidade	10324	13416	18981
Petróleo	11588	13950	33262

Fonte: MME, 2006

A Tabela 9 apresenta as áreas utilizadas na instalação das capacidades geradoras dos agregados das fontes de energia, e, no caso do Petróleo consumido com fins energéticos, as áreas indicadas foram calculadas a partir da correlação entre o volume de emissões de CO2 e a área de florestas nativas que deveria ser plantada para remover as emissões da atmosfera e estocar o respectivo volume de emissões de CO2.

A correlação entre áreas de florestas nativas e o volume de emissões foi considerada tomando por base valores característicos de florestas tropicais na região sudeste do Brasil,

representando um mix de florestas de mata atlântica e de cerrado. Referida correlação é representada pelo fator médio de 600 toneladas de CO2 equivalente por hectare, incluindo o estoque de carbono no solo.

Tabela 9 - Áreas utilizadas pelos agregados das fontes agregadas

		(10^6 ha)	
	1990	1994	2004
Cana-de-açúcar	4,29	4,36	5,57
Hidroeletricidade	2,53	2,78	3,58
Petróleo	33,89	39,42	NA

Fontes: MME, 2006; e AES Tietê, 2007

O cálculo da produtividade ambiental das três fontes consideradas, agregadas na matriz energética brasileira, resulta então nos valores apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Produtividade ambiental por fonte de energia agregada na matriz

Produtividade ambiental por fonte		(tep/ha)	
	1990	1994	2004
Cana-de-Açúcar	2,795571	3,61445	4,046320
Hidroeletricidade	4,080632	4,825899	5,301955
Petróleo	0,341930	0,353881	NA

A pesquisa desenvolvida buscou testar o conceito de "produtividade ambiental de fontes de energia" do SIN, considerando a disponibilidade de dados mais completos e consistentes sobre as instalações de geração de energia elétrica; e, ensaiar a aplicação desse conceito no agregado de três das principais fontes de energia da matriz energética brasileira. A determinação de condições de contorno de uma matriz energética com fundamento em lógica energética e ambiental para o Brasil, bem como conclusões e recomendações sobre a utilização do conceito testado, como elemento subsidiário de uma política energética com fundamento em produtividade ambiental de fontes de energia, completam o objetivo estabelecido para esta Tese.

A ampliação desse estudo para outras matrizes energéticas nacionais, e, uma avaliação de seu conjunto, permitiria melhor visualização do potencial de contribuição de uma política energética global para o esforço de redução de emissões, permitiria avaliar o custo e o

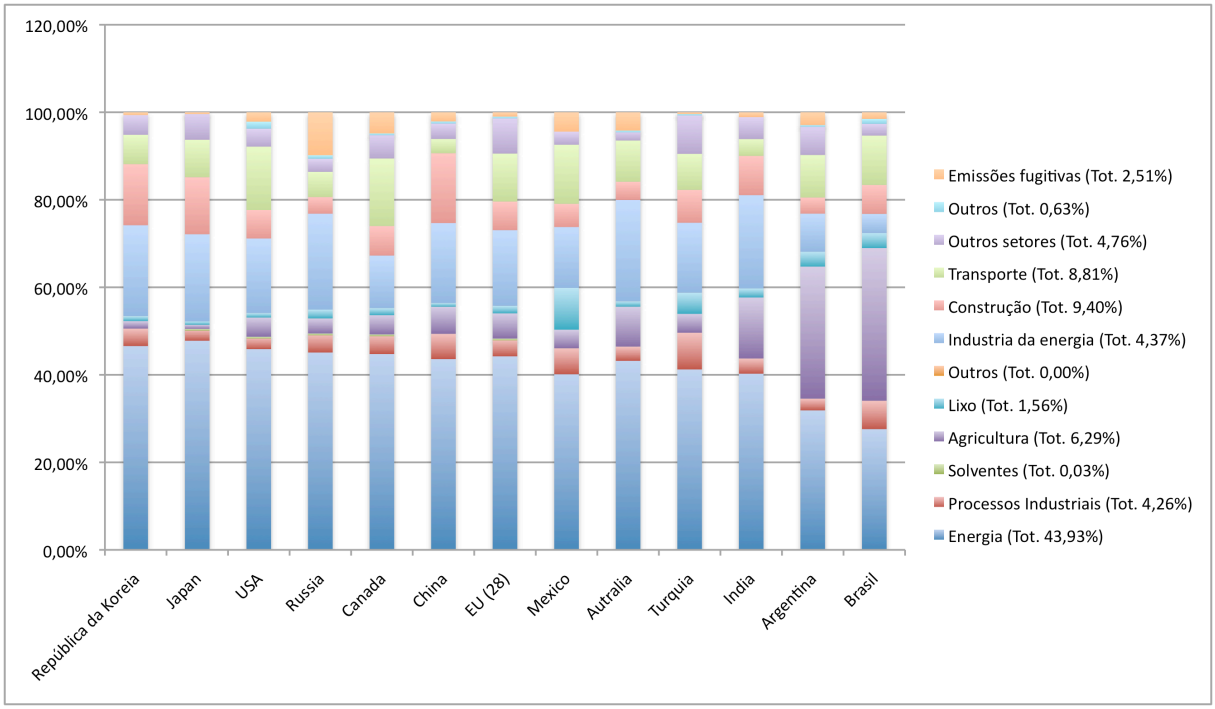
benefício, econômico e ambiental, do desenvolvimento de um ciclo virtuoso de transição da matriz energética global, a partir de investimentos em novas plantas de geração renovável de energia, viabilizados mediante incentivos regulatórios, de redução ou isenção de tributos, e, principalmente de financiamento, que poderiam ser assegurados por uma política energética global, utilizando mecanismos de implementação também globais, compromissados no âmbito da Convenção Quadro de Mudanças Climáticas.

5. Discussão à luz do conceito e resultados dos cálculos

O setor de energia no Brasil, o qual embora considerado como um dentre os que produz menores emissões de gases de efeito estufa (GEE), no entanto, apresenta uma incongruência do ponto de vista energético e econômico, com crescentes vulnerabilidades resultantes de fatores incontroláveis tais como a acentuação de sazonalidades atualmente verificada nas afluências hidráulicas ao sistema hidrelétrico interligado. Esta acentuação é provavelmente decorrente de mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global (Metz, 2002). Essa incongurência poderia ser minimizada, de forma a se preservar a segurança energética, com o alinhamento das políticas energética e ambiental, orientado para um ajustamento da matriz energética com base no estabelecimento de produtividades ambientais mínimas para novas fontes de energia que venham a ser licenciadas.

Em uma perspectiva global, o setor da energia representa mais de 60% do total de emissões de GEE, que aumentam o efeito estufa, aplicando tecnologias que já têm sido utilizadas durante toda a história de desenvolvimento industrial nos países desenvolvidos, e que ainda estão sendo atualmente usados no desenvolvimento recente das economias emergentes (Preto & Weisel, 2010). Nos países desenvolvidos, o setor da energia compreende a geração de energia elétrica a partir de derivados de petróleo, fornos de coque e eles represntam mais de 60% das emissões de gases, que por sua vez levam a um aumento do efeito estufa (Gerber & Opio, n.d). Por outro lado, existem poucos países cuja participação em emissões provenientes do setor da energia são relativamente reduzidas, como é o caso do Brasil e da Argentina, cujos percentuais situam-se abaixo de 30% (Preto & Weisel, 2010). Essa participação está inserida em substancial variação no contexto comparativo de vários países, como mostra o Gráfico 3.

Gráfico 3. Participações dos setores da economia nas emissões dos paises



Fonte: UNEP 2012. The Emissions Gap Report 2012. United Nations Environment Programme (UNEP), Nairobi (Gerber & Opio, n.d.)

Em geral, países desenvolvidos têm sido reconhecidos por seus esforços de substituição de fontes convencionais de energia por outras fontes de menores emissões de carbono. Além disso, o aumento da eficiência no consumo de energia é também uma importante alternativa para uma redução consistente nas emissões de gases do efeito estufa. Ainda, os países em desenvolvimento cujas emissões de gases de efeito estufa têm sido predominantemente associadas às mudanças de uso do solo, principalmente aqueles usos relacionados com a agricultura e a desflorestação, com a finalidade de manter numa miríade de atividades (Gerber & Opio, n.d), apresentam potenciais substanciais de redução de consumo de energia pelo aumento da eficiência. Existem alternativas para o aumento da oferta energia, tais como a adoção de políticas que promovam uma maior oferta de energia provenientes de fontes renováveis de baixo impacto ambiental, que podem proporcionar uma mais acelerada transição para os seus sistemas de energia, com nenhuma re-edição de rotas tecnológicas que prevaleceram no desenvolvimento de economias mais desenvolvidas (Metz, 2002).

Neste contexto, questões fundamentais têm sido debatidas tanto localmente quanto globalmente:

1. Qual seria o sistema de energia desejado para o planeta como um todo e para cada país específico num contexto de crescentes restrições ambientais e como deveria ser uma

política energética global para permitir a transição da matriz energética global na direção de menores impactos ambientais?

2. Que esforço global comum poderia ser bem sucedido em termos de redução das emissões globais de forma a preservar o aumento de temperatura na superfície da Terra em 2º C até 2020, para cumprir as metas acordadas para a Conferência das Partes na Convenção sobre a mudança climática global?
3. O programa de energia das Nações Unidas (UNEP) desde 2010 tem indicado as tendências para reduzir as emissões globais, como os compromissos assumidos pelas partes na COP e assinalou uma grande lacuna para 2020 em reduções de emissões de gases do efeito estufa em referência ao que é necessário para alcançar o objectivo de 2º C. Mas também existem alternativas técnicas para eliminar essa diferença se forem tomadas medidas rápidas, principalmente a adoção de políticas de energia para promover uma maior utilização de fontes renováveis de energia em substituição a outras intensivas em emissões de gases do efeito estufa (Goldemberg, 1994). Essas políticas devem ser adotadas através de um acordo de alcance global com um instrumento adequado para a transferência de tecnologias, incluindo um instrumento eficaz para o financiamento de sua implementação, este poderia ficar para contribuições expressivas em um esforço global para reduzir as emissões de gases de efeito estufa no curto prazo. Que instrumentos poderiam ser utilizados para a aplicação de uma política global da energia que poderia ser um objeto de acordo entre as nações no âmbito da COP no escopo da Convenção sobre a Mudança Climática Global?

Uma combinação de questões de energia, econômicas e ambientais tem caracterizado os problemas nos setores de energia em todo o mundo; soluções têm sido propostas com maior ou menor ênfase sobre cada uma destas questões (Smithson, 1989).

No entanto, com uma análise detalhada sobre o caso do Brasil e a partir dessa análise examinando o contexto dos países emergentes em geral, e também analisando a situação de setores energéticos nos países desenvolvidos, pode-se em geral concluir que as políticas energéticas em realidade são predominantemente orientadas com base em uma combinação de questões econômicas, de segurança energética e de questões de política comercial em vez de serem orientadas para sistemas de energia de menor impacto ambiental (Smithson, 1989).

Não obstante já existe considerável desenvolvimento tecnológico que permite políticas energéticas mais ambiciosas, tais como aquelas que aceleram a descarbonização dos setores de energia em perspectiva global (Lough, 1996). A instalação de novas plantas de geração de

energia de menor intensidade de emissões, viabilizada por essas políticas, seria capaz de criar um novo ciclo virtuoso para novos investimentos, algo muito desejável no contexto atual de depressão de várias economias (Smithson, 1989).

A Agência Internacional de Energia continuamente avalia os avanços tecnológicos relacionados à energia. Foram divulgadas perspectivas de tecnologias energéticas publicadas em 2012, incluindo evoluções bastante positivas de tecnologias de fontes renováveis. Destaca-se uma importante redução de custos de geração de energia fotovoltaica, conforme comentado e ilustrado no Anexo III.

No Brasil a expansão da geração de energia ocorre através de leilões realizados anualmente, quando novas fontes de energia são contratadas pelo menor preço ofertado pelo produtor de energia no Leilão, e são contratadas por todos os distribuidores de energia responsáveis pelo fornecimento de energia elétrica a usuários cativos. Uma redução acentuada de mais de 20% foi observada em preços para a energia eólica negociados em leilões. A energia eólica representa uma nova fonte e nova tecnologia no Brasil. O desenvolvimento da tecnologia de turbinas eólica com o uso de torres, acima de 80 m e mais recentemente, acima de 100 m, e o desenvolvimento de turbinas que utilizam de forma mais eficaz os ventos de 4 a 7 m/s, tem permitido uma importante redução de preços negociados nos leilões. A Tabela 11 ilustra a evolução do preço da energia negociada no Brasil.

Tabela 11. Preços de energia elétrica negociados em leilões no Brasil por fonte (R$/MWh), a preços de Dezembro/2015

Ano	Hidrelétrica	Biomassa	Eólica
2007	239	245	265
2008	239	250	218
2010	197	203	184
2011	123	140	142
2012	120	-	118
2013	137	162	143
2014	138	233	143
2015	168	298	206

Fonte: Câmara de Comércio de Energia Elétrica (CCEE), 2015

Fontes de energia solar e eólica têm potencial significativo de expansão não só para o sistema energético no Brasil, mas também a um sistema energético global, com reduções efetivas de emissões de gases de efeito estufa. Além disso, evidências de redução de custo indicam a possibilidade de adoção de uma política energética global de concessão de crédito para a substituição de fontes intensivas em emissões de gases de efeito estufa através de critérios que assegurem uma efetiva redução de tais emissões, com suporte em financiamento e tributação diferenciados que por sua vez as torna economicamente viáveis quando comparadas às soluções convencionais (Preto & Weisel, 2010).

Outras relações de diferentes naturezas têm também contribuído para desempenhos de preços referente à energia solar e eólica, grandes investimentos em instalações de produção de módulos fotovoltaicos na China, conseqüentemente resultando em enorme aumento de produção, um número crescente de sistemas fotovoltaicos instalados na Alemanha, resultando em uma grande redução de custos de instalação, e, uma melhor utilização da capacidade de reserva inativa de fabricação de turbinas eólicas na Europa, como resultado da crise financeira de 2008 que permitiu atender à demanda por turbinas eólicas a preços reduzidos no Brasil (Smil, 2008).

No entanto, considerando a referência de custos marginais de expansão do fornecimento de energia no Brasil e na Europa, respectivamente 88 USD/MWh[1] e 52 USD/MWh, preços reduzidos de geração de energia solar e eólica, além de considerar as respectivas intensidades de emissões de gases do efeito estufa em sistemas de energia, estimam-se os custos correspondentes às reduções de emissões substituindo fontes convencionais por fontes de emissões zero, em 115 USD/kg de CO2eq no Brasil e 117 USD/kg de CO2eq na Europa.

Estes custos são bastante baixos para a redução de emissões quando comparados aos custos incorridos pela economia global para a mitigação de impactos provocados pelas alterações climáticas, que seriam mais intensos no caso do cenário de uma insuficiente redução de emissões conforme estabelecido pela Convenção Global de Mudanças Climáticas, com a meta de se conter o aumento da temperatura na superfície da Terra em 2°C até 2020 (Dinda, n.d).

A expansão da oferta de energia através dessas e de outras fontes de menores emissões, tais como a biomassa e pequenas centrais hidrelétricas, competem com fontes convencionais por investimento, com critérios de menor custo, entretanto, esses critérios não consideram o custo real das fontes, incluindo os custos socio-ambientais de sua utilização. Os processos

[1]A referência de custo marginal para expansão de abastecimento de energia no Brasil é determinada a partir do plano decenal de energia elaborado pelo Governo Federal, através da Empresa de Pesquisa Energética (EPE)

decisórios para tais investimentos são basicamente fundamentados em princípios de menor custo e maior remuneração com nenhum procedimento formal de consideração de benefícios de redução de emissões de gases de efeito estufa. É por isso que se tornam necessárias políticas que acelerem a expansão do fornecimento de energia com base em fontes de menor intensidade de emissões (Labis, Visande, Pallugna & Caliao, 2011).

Sem políticas de energia eficazes, localmente ou idealmente uma política energética global, a redução da intensidade de carbono em um sistema energético global não irá evoluir de forma compativel com a meta de redução de emissões a nível mundial, com possibilidades efetivas de limitar o aquecimento global a 2°C no máximo até 2020.

Setores energéticos em várias nações, com muito poucas exceções, não são pura e simplesmente mercados livres. Eles são fortemente influenciados por incentivos e mecanismos de regulamentação como pagamentos por serviços ambientais, normas, isenções fiscais e financiamentos especiais (Ekins, Pollitt, Summerton & Chewpreecha, 2012).

O relatório especial sobre fontes de energia renováveis e mitigação das mudanças climáticas emitido pelo IPCC em 2011 esclarece o contexto de geração de energia renovável em um esforço global para mitigar as alterações climáticas (Pearce, 1991).

O conceito de produtividade ambiental de fontes de energia pode ser adotado como um critério de limitação para a autorização e a concessão de incentivos para fontes de energia, com o objetivo de reduzir a intensidade de emissões de gases do efeito estufa de fontes de energia na matriz energética podendo ainda funcionar como um critério para o descomissionamento de fontes de energia intensivas em emissões acima de determinado patamar que possa ser considerado inadimissível progressivamente ao longo do tempo (Gerber & Opio, n.d).

A "produtividade ambiental" das fontes de energia é um elemento definidor da métrica para avaliar as fontes e sistemas de energia, para verificar a sua eficácia ambiental, sendo esta entendida por meio da relação entre os fluxos de energia oferecido para consumo e a quantidade ou a extensão da biosfera e da atmosfera necessária para fornecer a energia correspondente.

Ensaios para a aplicação desse conceito na matriz energética brasileira, determinando as condições limites para uma matriz energética de baixo teor de carbono, um debate sobre mecanismos de regulação, como instrumentos da governança da política energética e uma proposta para alterações ou novos instrumentos necessários na política energética podem aproximar a estrutura de produção e consumo de energia no Brasil gradualmente para um

alvo de condições limites politicamente estabelecido (Ekins, Pollitt, Summerton & Chewpreecha, 2012).

A expansão deste estudo a outros sistemas de energia, permitiria estabelecer-se uma visão global da contribuição potencial de uma política energética global com base em limitações e incentivos vinculados a patamares mínimos de produtividade ambiental de fontes de energia. Permitiria avaliar custos e benefícios econômicos e ambientais do desenvolvimento de um ciclo virtuoso de transição do sistema global de energia. Tais benefícios resultariam em novos e maiores investimentos em fontes renováveis de energia, viabilizados a partir de incentivos regulatórios, reduções ou isenções fiscais e principalmente, através de financiamento que poderia ser assegurado por fundos multilaterais alinhados a uma política energética global, utilizando também mecanismos de implementação global, no âmbito da Conferencia das Partes (COP), da Convenção Quadro de Mudanças Climáticas (Neimark & Mott, 2011).

A "produtividade ambiental" das fontes de energia pode ser um indicador útil para comparar o esforço necessário para ampliação do ambiente de fornecimento de energia de um conjunto de fontes de energia disponíveis. Pode, por conseguinte, ser utilizado para ajudar na definição de estratégias de expansão da oferta de energia a partir de várias fontes, ao menor esforço ambiental.

6. Conclusão

A relação fundamental entre a produtividade e as políticas públicas tem impactos profundos, como analisados no presente estudo. Há uma profunda vinculação entre as políticas energéticas e as políticas ambientais (Vine, 2008).

Considerando a primeira pergunta sobre a forma como a energia é consumida e como se pode utilizar a produtividade ambiental das fontes de energia de forma a minimizar a depleção dos recursos da atmosfera ou da biosfera ao se expandir a geração de energia, e também a pergunta sobre o fornecimento de energia a partir de diferentes fontes e a sua sustentabilidade e confiabilidade, conclui-se a partir da pesquisa desenvolvida que:

- Fontes de energia renováveis constituem-se na imediata solução para o longo prazo em termos de produtividade ambiental. A expansão de sua utilização elevaria a produtividade ambiental das fontes de energia (Heijman, 1990).
- Adição de valor é fundamental para alcançar a sustentabilidade, bem como para incorporar medidas de eficiência e aumento de produtividade em diversos sectores, inclusive e particularmente a produtividade ambiental.

Com respeito a regulamentos e legislações que podem ser adotados para limitar a utilização de energia e os impactos e implicações de sua produção, de forma a considerar a métrica da produtividade ambiental das fontes de energia, como abordado na terceira questão proposta; o estudo permitiu concluir que:

- Há muitas reformas em políticas públicas nos setores da energia que seriam necessárias para salvaguardar, regular e também para transformar a utilização de energia para melhorar a produtividade ambiental da matriz energética.
- A adoção de uma métrica como a "produtividade ambiental das fontes de energia" pode ser incorporada na política energética de forma relativamente simples, na medida em que os elementos necessários ao seu cálculo e utilização nos processos decisórios de novas fontes de energia, ou de descomissionamentos de fontes existentes, fundamenta-se em informações já existentes e incorporadas nos respectivos processos decisórios.

7. Recomendações

Neste estudo reconhece-se que é crucial incorporar recursos renováveis e não renováveis de energia no contexto de análise. Aos recursos renováveis deve ser dada maior ênfase. Por conseguinte, é recomendado que a prioridade e a transição para fontes de energia seja estimulada para facilitar a substituição de combustíveis fósseis por fontes de energia renováveis (Wang, 2011). Em senso real esses estímulos facilitariam a redução da pressão sobre o meio ambiente especialmente sobre a biosfera e a atmosfera (Elbehri, Segerstedt & Liu, n.d).

É recomendado fazer-se uma transição rápida para uma matriz preponderantemente de fontes renováveis. Portanto, a sociedade deve perceber que a extrema dependência de fontes de energia fósseis leva a pressões desnecessárias sobre a biosfera e a atmosfera (Heijman, 1990).

As conclusões do estudo levam a percepções de que a maior produtividade energética e ambiental resulta em menores despesas, bem como melhoram as condições de segurança energética (Elbehri, Segerstedt & Liu, n.d). Tendo em mente o objetivo final de garantir a capacidade de consumidores em determinado contexto, de efetivamente terem menores custos a menores impactos ambientais, várias medidas que podem estimular a eficiência no uso de energia são essenciais para que essas organizações tenham operações efetivamente sustentáveis. Recomenda-se então a adoção de políticas de preços reais de energia, tais que considerem os reais custos ambientais e sociais incorridos. Tais políticas de preços de energia acabariam por reduzir a pressão sobre a biosfera e a atmosfera. A principal razão pela qual a maior produtividade ambiental na produção e maior eficiência no uso da energia reduzem as pressões sobre a atmosfera e a biosfera é a de que através do incremento de preços de energia e da correta sinalização de preços relativos, com base em sinais indicativos de níveis de produtividade ambiental, tanto os consumidores, quanto os agentes do mercado de energia, tomarão decisões naturais, orientadas à maior produtividade e eficiencia; deste modo, a vantagem é então vista colocando medidas que podem reduzir o custo de energia. Fazendo isso, a maior utilização de fontes de energia renováveis têm o melhor potencial de garantir produtividade energética para os usuários em geral.

É também recomendado que técnicos, financiadores e consultores financeiros neste campo de estudo também possam atuar como prestadores de serviços. Oferecendo seus serviços técnicos e de consultoria financeira, proporcionando soluções de energia de maior qualidade e

eficiência aos pequenos e grandes usuários, contribuindo para sua sustentabilidade, com redução de custos das operações. Recomenda-se igualmente que esses usuários possam ter acesso a uma adequada informação técnica e institucional, que deve ser objeto da atenção dos governos.

Por último, ressalta-se que não há políticas ou efeitos das mesmas, fundamentadas em incentivos a maiores produtividade ambiental e maior eficiência no uso de recursos, que possam causar impactos negativos para os usuários de energia. Por conseguinte, especialistas, técnicos e financiadores podem utilizar tal conceito para facilitar a formulação e implementação de tais políticas.

8. Referências

Adan, H., & Fuerst, F. (2015). Do energy efficiency measures really reduce household energy consumption? A difference-in-difference analysis. *Energy Efficiency*.

Anjaneyulu, Y., & Manickam, V. (2007). *Environmental impact assessment methodologies*. Hyderabad [India]: BS Publications.

Awange, J., & Kyalo Kiema, J. (2013). Environmental geoinformatics. Berlin: Springer.

Black, B., & Weisel, G. (2010). Global warming. Santa Barbara, Calif.: Greenwood.

Borg, N. (2008). Energy efficiency: past the tipping point?. *Energy Efficiency*, *1*(1), 77-78. http://dx.doi.org/10.1007/s12053-008-9008-8

Bozorgi, A. (2015). Integrating value and uncertainty in the energy retrofit analysis in real estate investment—next generation of energy efficiency assessment tools. *Energy Efficiency*, *8*(5), 1015-1034.

Brown, M., & Herendeen, R. (1996). Embodied energy analysis and EMERGY analysis: a comparative view. *Ecological Economics*, *19*(3), 219-235. http://dx.doi.org/10.1016/s0921-8009(96)00046-8

Dinda, S. *Handbook of research on climate change impact on health and environmental sustainability*.

Ec.europa.eu,. *Sustainable Use of Natural Resources - Environment - European Commission*. Retrieved 25 January 2016, from http://ec.europa.eu/environment/natres/studies.htm

Ekins, P., Pollitt, H., Summerton, P., & Chewpreecha, U. (2012). Increasing carbon and material productivity through environmental tax reform. *Energy Policy*, *42*, 365-376. http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2011.11.094

Elbehri, A., Segerstedt, A., & Liu, P. *Biofuels and the sustainability challenge*.

Environmental comfort and productivity. (1987). *Applied Ergonomics*, *18*(1), 81. http://dx.doi.org/10.1016/0003-6870(87)90116-5

Fiala, M., & Bacenetti, J. (2012). Model for the economic, energy and environmental evaluation in biomass productions. *Journal Of Agricultural Engineering*, *43*(1). http://dx.doi.org/10.4081/jae.2012.e5

Goldemberg, J. (1994). Science and the climate convention. *Science & Global Security*, *4*(3), 407-424. http://dx.doi.org/10.1080/08929889408426409

Goldemberg, J. (1995). Technically a sound case, but not convincing on economics. *Energy For Sustainable Development*, *2*(3), 60-61. http://dx.doi.org/10.1016/s0973-0826(08)60140-4

Goldemberg, J. (2012). *Energy* (pp. 20-42). Oxford: Oxford University Press.

Hansen, S., & Brown, J. (2004). *Investment grade energy audit*. Lilburn, Ga.: Fairmont Press.

Heijman, W. (1990). *Natural resource depletion and market forms* (pp. 20,30,45,71). Wageningen: Wageningen Agricultural University.

J. Goldenberg, Energy – What everyone needs to know, 2012. *Oxford University Press*, New York, United States

Khayyat, N. *Energy demand in industry* (pp. 20,32,46,54,60).

Labis, P., Visande, R., Pallugna, R., & Caliao, N. (2011). The contribution of renewable distributed generation in mitigating carbon dioxide emissions. *Renewable And Sustainable Energy Reviews*, *15*(9), 4891-4896. http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.064

Lough, T. (1996). Energy analysis of the structures of industrial organizations. *Energy*, *21*(2), 131-139. http://dx.doi.org/10.1016/0360-5442(95)00092-5

M. Wackernagel and W. Rees, Our Ecological Footprint: Reducing Human Impact on the Earth, *New Society Publishers*, Gabriola Island, BC, 1996

McCarthy, J. (2001). *Climate change 2001*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.

Metz, B. (2002). Towards an equitable global climate change regime: compatibility with Article 2 of the Climate Change Convention and the link with sustainable development. *Climate Policy*, *2*(2-3), 211-230.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *Balanço Nacional da Cana de Açucar e Agroenergia*, 2007

Ministério de Ciência e Tecnologia. Inventário de Emisions e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa não Controlados pelo Protocolo de Montreal – *Comunicação Inicial do Brasil*. 2010

Neimark, P., & Mott, P. (2011). *The environmental debate*. Amenia, NY: Grey House Pub.

Mortimer, N.D., (1991). Energy analysis of renewable energy sources. *Energy Policy*, *19*(9), 813. http://dx.doi.org/10.1016/0301-4215(91)90002-6

Publications of the International Atomic Energy Agency. (1965). *Nature*, *207*(5002), 1135-1135.

Pinguelli Rosa, et al .Emissões de eases de efeito estufa por reservatórios de hidrelétricas. (2008). Oecol.Bras., 12(1) 116-129, 2008. Rio de Janeiro, Brasil.

R. U. Ayres, L. W. Ayres, and B. Warr, Energy, Power and Work in the US Economy, 2002. INSEAD, Fontainebleau, France.

Recent Energy Studies and Energy Policies in Turkey. (2001). *Energy Sources*, *23*(6), 495-510. http://dx.doi.org/10.1080/00908310152125148

Silva, Ludimila L. A compensação financeira das usinas hidroelétricas como instrumento de desenvolvimento econômico, social e ambiental. *Universidade de Brasília*, 2007.

Simón, X. (2012). Eolic energy and rural development: an analysis for Galicia. *Spanish Journal Of Rural Development*, 13-28. http://dx.doi.org/10.5261/2012.gen3.02

Smil, V. (2008). *Energy in nature and society*. Cambridge, Mass.: MIT Press.

Smithson, P. (1989). Changes in Global Climate. *Quaternary Science Reviews*, *8*(2), 203.

Torrico Albino, J., & Janssens, M. (2011). ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT OF LAND USE SYSTEMS USING EMERGY IN TERESÓPOLIS-BRAZIL. *J. Nat. Resour. Dev.*. http://dx.doi.org/10.5027/jnrd.v2i0.02

Vine, E. (2008). Strategies and policies for improving energy efficiency programs: Closing the loop between evaluation and implementation. *Energy Policy*, *36*(10), 3872-3881.

W. Chern, W. James. Measurement of Energy Productivity in Asian Countries, *The Ohio State University*, USA

Wang, C. (2011). Sources of energy productivity growth and its distribution dynamics in Brazil. *Resource And Energy Economics*, *33*(1), 279-292. http://dx.doi.org/10.1016/j.reseneeco.2010.06.005

Williams, R., McKane, A., Perry, W., Aixian, L., & Tienan, L. (2005). *Linking Energy Efficiency and ISO*. Washington, D.C.: United States. Dept. of Energy.

Yan, H. *The Eco-Social Impacts of Biofuel Expansion in Brazilian Amazon | Amazonian Biofuels*. *Amazonian Biofuels*. Retrieved 25 January 2016, from http://sites.duke.edu/amazonianbiofuels/biofuels-effects-on-the-environment-overview/

Zubrin, R. (2007). *Energy victory*. Amherst, N.Y.: Prometheus Books.

9. Anexos

9.1. Anexo I – Análise sobre a eficiência energética e programas de eficiência

Foram escolhidos alguns exemplos de classes de consumidores industriais que em geral usam energia de forma intensiva como insumo, de modo a, com base na análise de seu consumo, tanto em pequena escala como em grande escala, compreender como a produtividade ambiental das fontes de energia pode ser estabelecida como indicador referencial para seus programas de sustentabilidade, particularmente foram analisados resultados de uma auditoria energética, incluindo pesquisa sobre conservação de energia e medidas de aumento de produtividade, e um quadro síntese de análise (Bozorgi, 2015). Isto foi feito por meio de um estudo de viabilidade e gestão incluindo adicionalmente dados sobre a disponibilidade de equipamentos para utilização eficiente de energia, por usuários de energia (Hansen & Brown, 2004). São apresentados os resultados da análise sobre o uso de energia, e possibilidades de introdução do indicador de produtividade ambiental de fontes de energia, nas decisões de contratação de energia e nos programas de sustentabilidade dos usuários de energia.

Tendo em conta o propósito subsidiário desta Tese, aceitamos que essa análise tenha sido feita a partir de relatórios de auditoria energética, produzidos em outros trabalhos. Esse tipo de estudo pode também ser feito a partir da análise da economia e eficiência do consumo de energia ("Conforto ambiental e produtividade", 1987). Neste ponto, a análise desenvolvida teve foco em três métodos que permitem aumentar a eficiência de energia: (i) roteiro sobre condutas para um consumo eficiente, (ii) transformação de energia e mudanças para formas mais eficientes, e (iii) inovações.

Melhorias na gestão das instalações de energia, sob responsabilidade dos usuários de energia, também implica em menores custos e mecanismos eficazes de aumento da eficiencia energética. Programas de análise de demandas de energia e eficiência no consumo de energia em instalações e equipamentos, em geral conduzidos através de auditorias energéticas são eficientes para identificar potenciais de economias e de aumento de produtividade.

Mecanismos de aumento de produtividade de energia, concebíveis com tecnologias novas, aumentam as possibilidades de reduzir o consumo de energia.

Os programas de eficiência energética considerados são a seguir apresentados:

Auditorias de energia

Uma auditoria de energia é um estudo sobre as instalações de um cliente nas quais ocorre a utilização de energia. O estudo envolve a auditoria sobre as instalações e a utilização de energia para seu funcionamento, tornando evidente para o cliente como se dá a utilização da energia e as práticas adotadas nessa utilização, apresentando os efeitos que pode obter com projetos de eficiência energética. Esse tipo de auditoria de energia forma consciências a partir de instruções para melhor utilizar a energia, e insta usuários a adotarem as propostas dos auditores (Hansen & Brown, 2004).

Programa de Descontos

É composto por dois segmentos; um no qual o usuário de energia recebe dinheiro ou descontos, e um segundo no qual o fabricante de equipamentos mais eficientes recebe reembolsos. No programa em que recebe dinheiro ou descontos, o cliente faz jus ao benefício sempre que compra determinados equipamentos mais eficientes, qualificados no programa. No programa de reembolsos o fabricante de equipamentos mais eficientes (qualificados no programa) recebe reembolso de despesas incorridas na fabricação, tais que reduzam os custos de seus produtos para seus clientes. Isto ajuda os usuários a decidirem pela aquisição de equipamentos mais eficientes (Awange & Kyalo Kiema, 2013).

Programa de instalação direta

Neste programa o concessionário fornecedor de energia tem seus projetos destinados a introduzir equipamentos eficientes junto a seus clientes. Um exemplo é a substituição de sistemas de iluminação por outros de menor consumo específico (como sistemas de iluminação com lâmpadas LED). Nesse tipo de programa a motivação para o investimento direto do concessionário é a liberação de capacidade do sistema elétrico para atendimento de outras cargas a um custo menor do que o investimento na ampliação de capacidade de geração, transmissão e distribuição do sistema elétrico. Os benefícios de redução de custos no sistema elétrico são mensuráveis.

Programa de educação e de formação

Este tipo de programa promove a instrução e treinamento de todos os agentes participantes da cadeia de fornecimento e utilização de energia, por exemplo, comercializadores, engenheiros, trabalhadores e avaliadores de instalações, sobre economia de energia, equipamentos e medidas que resultam em menor consumo, bem como pontos que devem ser monitorados.

Empréstimos e financiamentos ou subvenções

Custos iniciais, de melhorias em instalações e substituição de equipamentos, significam desincentivos. Pprogramas de empréstimos e financiamentos visam dar crédito aos usuários e permitem cobrir despesas incorridas no início da implementação de planos de eficientização de energia (Simón, 2012).

Licitações / Contratos de desempenho padrão

Este tipo de programa visa terceirizar a implementação de medidas de eficientização energética por meio de contratos de performance junto a especialistas na area de eficiencia energética, para supervisionarem e atualizarem os programas de eficiencia e produtividade de energia junto aos usuários finais. Especialistas em tornar mais eficiente a utilização de energia e mais produtiva a produção têm melhores condições do que as concessionárias de distribuição de energia elétrica, de identificarem as oportunidades de melhorias, maximizando a produtividade dos usuários de energia.

Incentivos a montante

Este tipo de programa visa a agregação de motivadores ou colaboradores junto a fabricantes, comercializadores, ou especuladores do mercado de energia, para incorporarem projetos de eficiencia energética. Esses projectos contribuem para expandir o investimento na utilização de energia eficiente (Williams, Perry, Aixian & Tienan, 2005).

Programa de substituição por falha

Este tipo de progama visa promover a introdução de equipamentos mais eficientes, em substituição a outros equipamentos existentes em eventos de falhas. Esta prática pode ser melhor implementada junto comerciantes ou prestadores de serviços de substituição de equipamentos em empresas, como no caso de serviços de manutenção de equipamentos de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar.

Programa de substituição precoce

Este visa a substituição de equipamentos que estão em operação, não o suficientemente falhos, mas que justifiquem sua substituição. A substituição por outros mais eficientes é justificada financeiramente. Neste caso somente argumentos e ganhos extraordinários justificam, particularmente quando estiver evidente a redução do custo de operação.

Programa de novas instalações

Quando há um novo paradigma para a forma de uma produção ou organização de sistemas que envolvem a utilização de energia, em geral caracteriza-se a oportunidade para introduzir práticas de maior eficiencia e produtividade de energia. Em geral, o desenho de um processo se dá inicialmente, quando de seu projeto, e, enolve um custo inicial correspondente àquela concepção. Alterações posteriores representam custos, e, em geral somente são

implementadas em aspectos específicos e limitados. É portanto, no desenho de um novo processo que se pode introduzir novos arranjos e equipamentos mais eficientes.

Comissionamento

O exito de programas de eficiencia e maior produtividade em energia está associado à mudança de paradigmas e cultura por parte dos usuários de energia. É importante marcar-se e reconhecer-se quando essas mudanças ocorrem e se materializam com a implementação de projetos que envolvem maior eficiencia e produtividade na utilização de energia.

Um exemplo é a adoção de eventos para divulgação de melhorias alcançadas em processos produtivos e novos produtos ou serviços que passam a ser oferecidos a usuários finais com menores consumos de energia ou menores impactos ambientais.

Na perspectiva desse tipo de programa, fabricantes procuram criar expectativas junto a seus clientes sobre novos e mais eficientes produtos (Ueda et al, 2009).

Observa-se através da mídia empresarial, que há uma tendência de crescente consideração por empresas, da necessidade de investimento em estratégia de mídia especializada, visando aumentar a estima de seus produtos por parte dos usuários finais (Broil e al., 1994). Este é um processo de interação entre fabricantes e usuários. Usuários demandam crescentemente maior qualidade e significado de produtos, e fabricantes entendem essa demanda e introduzem inovações e maior qualidade, competindo entre sí junto ao mercado, e, criando um ambiente virtuoso na medida em que o aumento de produtividade ocorre como consequencia desse processo (Heikki, 2000).

9.2. Anexo II - Avaliação econômica da implementação de eficiência energética

Garantir eficiencia energética implica em alguns custos, como por exemplo, o custo da compra de equipamentos, despesas de instalação e manutenção. Empresas e outros usuários finais de energia tornam-se motivados a implementarem medidas de eficiencia energética se os resultados financeiros compensarem o investimento e custos de implementação. Nessa avaliação, o conceito do valor presente líquido (VPL) é utilizado. O valor presente líquido é caracterizado pela diferença dos somatórios a valor presente, entre os custos projetados com e sem a implementação do projeto de eficiencia energética em questão. Essa análise é útil para evidenciar o detalhamento dos reais benefícios com a implementação de um projeto. No caso

de projetos de eficiencia energética, sua justificativa acaba por ser diretamente correspondente ao aumento da produtividade decorrente de sua implantação.

A avaliação do valor presente líquido de forma científica (Lim et al, 2008) pode ser desenvolvida com base nas seguintes equações.

$$I = p \times (L \times P \times 365 \times 24) \quad (7)$$

Onde: I = Receita anual do projeto

p = Preço unitário da eletricidade em kWh

L = Fator de utilização da instalação

P = Potência da instalação em kW

e

$$E = E_f \times P + E_v \times Q \quad (8)$$

Onde: E = Despesas anuais de operação e manutenção

E_f = Custo fixo de operação e manutenção em kW/ano

E_v = Custo variável de operação e manutenção em kWh

P = Potência da instalação em kW

Q = Quantidade de energia disponibilizada por ano em kWh

Outra forma para se avaliar a viabilidade financeira de produtividade de um projeto de energia é a avaliação do tempo de retorno do investimento (pay-back) que é uma forma mais direta de avaliação. O tempo de retorno do investimento com a implantação do projeto é a medida de tempo necessário para se recuperar o recurso financeiro aplicado na implantação do projeto. A

questão em geral é que esse método reduz a análise a uma especulação financeira. A sentença matemática utilizada na análise do tempo de retorno de um projeto é expressa a seguir:

Período de retorno = Investimento necessário / fluxo de caixa líquido (9)

O período de retorno é expresso em anos e em geral quanto mais curtos os períodos de retorno mais vantajosos se tornam os projetos. Por outro lado, curtos períodos de retorno não são as medidas mais satisfatórias para a avaliação a longo prazo dos benefícios de projetos de eficiência e aumento de produtividade energética (Honey bee, 2008). Esse sistema de período de retorno pode falhar no indicativo do real benefício de um projeto, se não for analisado em uma forma mais completa.

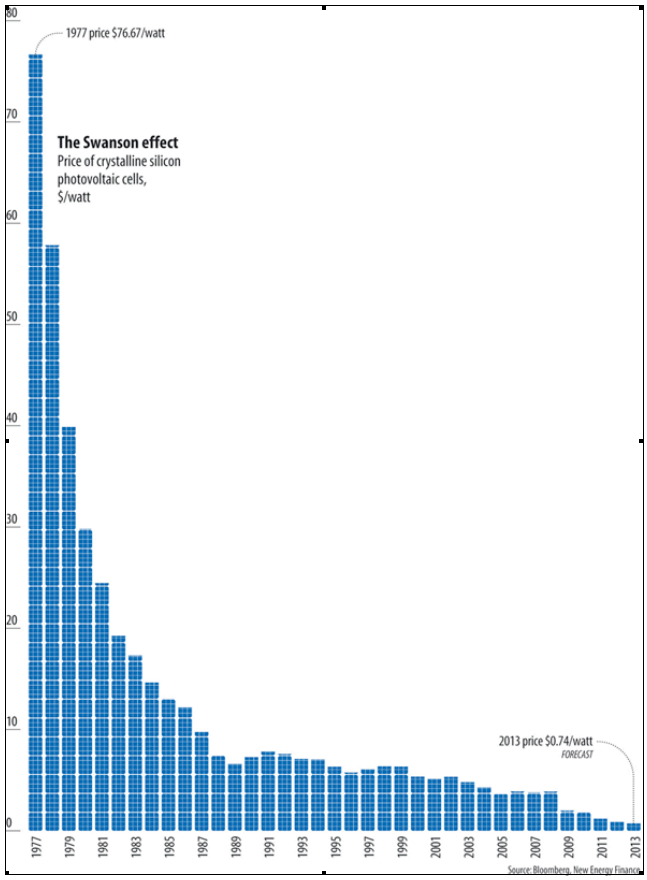
A maioria das empresas considera um período de retorno de 0 - 3 anos como limite para retornar o investimento da implementação de um projeto, mas, em um estudo desenvolvido mo mercado da Alemanha em 1991, verificou-se que em geral os períodos de retorno necessários eram em geral de 4,1 anos (Gruber e Brand, 1991).

É evidente que a decisão sobre a implementação de um projeto de eficiencia energética, tanto no lado da demanda quanto no lado da produção de energia, pode ser significativamente melhor, se forem introduzidos indicadores adicionais, que permitam adicionar-se o entendimento sobre implicações em geral não expressas nos métodos de análise essencialmente financeiros, notadamente indicadores que exprimam a extensão dos custos reais associados às decisões sobre continuar utilizando energia tal como nos arranjos convencionais, comparados a alternativas de outras fontes e formas de utilização de energia mais eficientes e de menor impacto ambiental.

9.3 Anexo III – Redução de custo da tecnologia fotovoltaica

Embora ainda seja a tecnologia mais cara de produção de eletricidade disponível comercialmente, tem apresentado acelerada redução de custos, como mostra o Gráfico 4.

Gráfico 4. Redução de preços de células fotovoltaicas de silício policristalino.



Fonte: Agencia Internacional de Energia, 2012

Observa-se uma redução de preços de módulos fotovoltaicos em mais de 70%, no período de uma década, conseqüentemente ocasionando importante redução de custos de geração de energia elétrica em centrais fotovoltaicas para níveis de 100 USD/MWh a 260 USD/MWh. Este nível de custos no seu limite inferior já permite a substituição de algumas fontes de energia convencionais mais intensivas em emissões de carbono (Ekins, Pollitt, Summerton & Chewpreecha, 2012).