UNIVERSIDADE PAULISTA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

AVALIAÇÃO ENERGÉTICO-AMBIENTAL DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NA CHAPADA DO PIAUÍ

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

MÁRCIO COSTA

São Paulo

2016

UNIVERSIDADE PAULISTA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

AVALIAÇÃO ENERGÉTICO-AMBIENTAL DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA NA CHAPADA DO PIAUÍ

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho.

Área de concentração: Sustentabilidade em Sistemas de Produção.

Linha de Pesquisa: Avanços em Produção Mais Limpa e Ecologia Industrial.

Projeto de Pesquisa: Avaliação Energético-Ambiental de Sistemas de Produção Utilizando a Abordagem Sistêmica.

MÁRCIO COSTA

São Paulo

2016

Costa, Márcio.
Avaliação energético-ambiental da geração de energia eólica na chapada do Piauí / Márcio Costa. - 2016.
112 f. : il. color. + DVD.

Dissertação de Mestrado Apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista, São Paulo, 2016.

Área de concentração: Sustentabilidade em Sistemas de Produção.
Orientador: Prof. Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho.

1. Energia eólica. 2. Contabilidade ambiental. 3. Índices de sustentabilidade. I. Agostinho, Feni Dalano Roosevelt (orientador). II. Título.

MÁRCIO COSTA

AVALIAÇÃO ENERGÉTICO-AMBIENTAL
DA GERAÇÃO DE ENERGIA EÓLICA
NA CHAPADA DO PIAUÍ

Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista – UNIP para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção.

Data da Aprovação _____/_____/_____

BANCA EXAMINADORA

_____/____/_____
Prof. Orientador Dr. Feni Dalano Roosevelt Agostinho
Universidade Paulista - UNIP

_____/____/_____
Prof.ª Dr. ª Cecília Maria Villas Bôas de Almeida
Universidade Paulista – UNIP

_____/____/_____
Prof. Dr. Fernando Jorge Cutrim Demétrio
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA

DEDICATÓRIA

À minha mãe, pelo apoio em todos os momentos;
À minha filha, a razão maior da minha vida;
À minha família e aos meus amigos.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida, pela saúde, sabedoria e pela fé de lutar pelos meus sonhos.

À minha filha, Marcela Costa, minha inspiração, meu amor incondicional, por me proporcionar os dias mais felizes de toda minha vida.

À minha mãe, Teresinha de Jesus Costa Machado, pelo amor e exemplo de vida digna e honesta, que sempre fez de tudo para garantir minha educação.

À minha tia, Maria Arcângela Costa, pelo amor e pelo tempo de sua vida que dedicou para ajudar na minha criação.

Ao meu irmão, Flávio Fernando Costa, meu amigo e compadre que nunca mediu esforços para ajudar na minha educação e formação de cidadão.

Às minhas irmãs, Socorro Costa, Célia Costa e Márcia Costa, por fazerem parte da minha vida, pela compreensão e pelo carinho.

À todos os sobrinhos e sobrinhas, por quem tenho muito carinho, aos demais familiares e a todos os amigos que fazem e que fizeram parte da minha história.

Ao professor doutor Feni Dalano Roosevelt Agostinho, pelos ensinamentos sistêmicos, pela orientação, amizade, compreensão e paciência durante todos os momentos dessa minha caminhada em busca de novos conhecimentos, muito obrigado.

Aos professores do LAPROMA – UNIP, Professora Dra. Cecília Maria Vilas Boas de Almeida por aceitar fazer parte da banca e pelas suas valorosas contribuições para melhoria desse trabalho. Ao Professor Dr. Biagio Giannetti, pelos ensinamentos e atenção e pelo relevante papel que desenvolve a frente desse grupo de pesquisa.

Ao professor Dr. Fernando Jorge Cutrim Demétrio, por disponibilizar do seu tempo para leitura, e pelas relevantes contribuições apontadas no trabalho no exame de qualificação, e sua disposição em participar da defesa.

Aos professores do programa de Mestrado-Minter, Irenilza Nãas, João Gilberto, Oduvaldo Vendrametto, Pedro Luís, Márcia Terra, Rodrigo Gonçalves, Jair Abe e José Socomano, pelo respeito, dedicação e disponibilidade de ensinar.

Aos colegas do programa, Alan, Alysson, Carla, Daiane, Fábio, Gorthon, Jaciara, Jorge, José Alberto, Karmem, Kelly, Linardy, Luís Antônio, Marcello,

Mathilde, Nayguel, Paola, Rimena, Sales, Thaís e Tadeu, pela amizade e companheirismo durante todo o curso.

À Universidade Paulista – UNIP, por acreditar no sucesso do Minter e na implantação do mestrado em Engenharia de Produção no estado do Piauí.

À Faculdade Santo Agostino – FSA, por colaborar e ser parceira nessa grande jornada.

À secretária Indira, pela atenção e presteza sempre que foi solicitada e a todos os colaboradores da Faculdade Santo Agostinho.

“É triste pensar que a natureza fala e que o gênero humano não a ouve...”

(Victor Hugo)

“O homem é infeliz porque não conhece a natureza”

(Demócrito)

RESUMO

A energia elétrica obtida de fonte eólica, apesar de ser geralmente rotulada como renovável, ainda exige altos investimentos em material, energia, mão de obra, tecnologia e informação para fabricação de seus componentes, transporte, instalação e manutenção. Toda esta demanda de recursos levanta dúvidas sobre sua real contribuição para a sociedade como fonte de energia renovável e eficiente na conversão de energia eólica em eletricidade. Na tentativa de colaborar nas discussões sobre o potencial da energia eólica, o objetivo desse trabalho foi calcular índices de desempenho energético-ambiental do parque eólico “Chapada do Piauí”, composto de 115 aerogeradores, ocupando uma área de 2.588 hectares, com capacidade instalada de 195 MW, localizado no município de Marcolândia-PI. Para atingir este objetivo, indicadores dos métodos Energia Incorporada, Avaliação do Ciclo de Vida, e da Contabilidade Ambiental em Emergia foram considerados. Os resultados mostram que o parque eólico avaliado possui baixo rendimento líquido (EYR=1,54), comparado com hidrelétrica com (EYR=5,41), baixa renovabilidade (%R=14%), moderada carga ambiental (ELR=6,23), alta dependência de recursos da economia (EIR=1,86), e baixa sustentabilidade ambiental (ESI=0,25). Por outro lado, o parque eólico possui melhor eficiência na conversão de recursos globais em energia elétrica (UEV=60.000 sej/J) comparada com outras fontes de energia como hidrelétrica e biomassa, além de emitir menor quantidade de gases de efeito estufa para a atmosfera (4,13 contra 11,84 gCO2-eq./kWh) e demandar menor quantidade de energia fóssil incorporada por quilowatt-hora de eletricidade gerada (0,04 contra 0,15 MJ/kWh). Os resultados indicam que a energia eólica deveria ser incentivada como alternativa complementar à energia obtida de potencial hídrico, pois ela possui elevada eficiência energética e em emergia, além de emitir menor quantidade de gases de efeito estufa para a atmosfera como almejado pelo governo brasileiro para os próximos 30 anos. Por outro lado, maior esforço deveria ser considerado para melhorar seu desempenho nos índices em emergia, incluindo aumentar a renovabilidade e rendimento líquido, além de reduzir a carga ambiental.

Palavras-chave: Energia Eólica. Contabilidade Ambiental. Indices de Sustentabilidade.

ABSTRACT

Although usually labeled as a renewable energy source, the electric energy obtained from wind source, still requires high investments in material, energy, labor, technology and information for manufacturing, transportation, installation and maintenance components. This high demand for resources raises doubts about its real contribution to society as a renewable and efficiently converting wind energy into electricity. In an attempt to contributing for further discussions about the potential of wind energy, this work aims to calculate energetic-environmental indices for the wind park called “Chapada do Piauí”; this wind park is located at Marcolândia city, Piauí State, it has a total of 115 wind-turbines in 2,588 hectares, and a capacity of 195MW for wind-electricity. To accomplish these objectives, energetic-environmental indices from embodied energy analysis, life cycle assessment, and emergy accounting are considered. Results shown a lower net yield for the wind-energy evaluated park (EYR=1,54) compared to hydropower (EYR=5,41), low renewability (%R=14%), moderate environmental loading (ELR=6,23), high dependence on resources from the larger economy (EIR=1,86), and low environmental sustainability (ESI=0,25). On the other hand, the wind park has higher efficiency in converting global resources into electricity (UEV=60,000 sej/J) than other energy sources as hydro and biomass. Notwithstanding, wind energy releases lower amount of greenhouse gases to atmosphere (4.13 vs. 11.84 gCO2-eq./kWh) and it demands lower amount of fossil embodied energy per each kilowatt of generated electricity (0,04 contra 0,15 MJ/kWh) than hydropower. Results indicate that wind-energy should be promoted as an alternative to hydropower, because the former has high energy and emergy efficiencies besides releasing lower amount of greenhouse gases that is the target of the Brazilian 2030 energy plan. Anyhow, efforts are still needed to improve emergy indices for wind-energy system, including higher renewability and net emergy yield, and reduce its environmental load.

Keywords: Wind Energy. Environmental Accounting. Sustainability Indices.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Qualificação das fontes primárias de energia 19
Figura 2 – Oferta de energia mundial (2014), (306 milhões de toneladas equivalentes de petróleo) 23
Figura 3 – Potencial eólico estimado para as regiões brasileiras.....25
Figura 4 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte/ano base 2015 26
Figura 5 – Expansão da oferta de energia por tipo, MW, ano 27
Figura 6 – Mapa do Potencial eólico Brasileiro 29
Figura 7 – Esquema do princípio de funcionamento do rotor de Savonius 30
Figura 8 – Exemplos de turbinas eólicas (pequena, média, grande).....31
Figura 9 – Sistema interligado a rede elétrica 31
Figura 10 – Demonstração do processo de interligação do parque eólico na rede elétrica.....32
Figura 11 – Modelo de sistema híbrido 33
Figura 12 – Componentes de um sistema eólico 34
Figura 13 – Moinho de Brush 35
Figura 14 – Comparação entre o fluxo de água do Rio São Francisco e o regime de vento 38
Figura 15 – Mapa de localização do Parque eólico Chapada do Piauí 55
Figura 16 – Modelo do aerogerador 57
Figura 17 – Nacele em detalhe 57
Figura 18 – Fronteiras do sistema avaliado neste trabalho (tempo: 20 anos vida útil).....59
Figura 19 – Fronteiras do Sistema analisado no cálculo da energia incorporada 60
Figura 20 – Diagrama de energia de um sistema de produção genérico 63
Figura 21 – Indicador de área (MWh/Km²ano) 97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Impactos ambientais causados por fontes renováveis de energia 48
Tabela 2 – Principais características do complexo de energia eólica Chapada do Piauí (195MW)ª 56
Tabela 3 – Exemplo de tabela de uma análise de energia incorporada.....60
Tabela 4 – Exemplo de Tabela de avaliação de emissões para o Potencial de Aquecimento global.....62
Tabela 5 – Tabela de avaliação em emergia.....64
Tabela 6 – Índices em emergia utilizados neste estudo.....65
Tabela 7 – Fluxos de emergia Parque Eólico.....93
Tabela 8 – Índices em Emergia do complexo eólico Chapada do Piauí.....93
Tabela 9 – Índices de emergia para alguns sistemas usados na geração de energia 94

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BIG	Banco de Informações de Geração
ED	Densidade em emergia
EFM	Pegada Ecológica em emergia
EIR	Razão de Investimento em Emergia
ELR	Razão de Carga Ambiental
EE	Emergia Específica
ESI	Índice de Sustentabilidade Ambiental
EYR	Razão de Rendimento em Emergia
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
F	Recursos provenientes da Economia
N	Recursos não renováveis
NOS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PNE	Plano Nacional de Energia
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
R	Recursos renováveis
SeJ	joules de energia solar

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 14

1.1 Objetivo 16

1.1.1 Objetivo geral 16

1.1.2 Objetivos específicos 16

1.2 Organização do trabalho 17

2 REVISÃO DE LITERATURA 19

2.1 Energia e desenvolvimento sustentável 19

2.2 Planejamento energético brasileiro 24

2.3 Energia eólica 28

2.3.1 Componentes e aplicações de sistemas eólicos 29

2.3.2 Evolução na geração da energia eólica 35

2.3.3 Energia eólica no contexto brasileiro 36

2.3.4 Expansão da energia eólica no Piauí 39

2.4 Indicadores de desempenho energético-ambiental 40

2.4.1 Energia incorporada 42

2.4.2 Potencial de aquecimento global 44

2.4.3 Contabilidade ambiental em emergia 45

2.5 Impactos sociais, econômicos, e energéticos-ambientais da energia eólica 47

3 MATERIAIS E MÉTODOS 55

3.1 Descrição da área de estudo 55

3.2 Fonte de dados 56

3.3 Análise de energia incorporada 59

3.4 Potencial de aquecimento global 61

3.5 Contabilidade ambiental em emergia 62

3.5.1 Etapas para avaliação em emergia 63

4 PUBLICAÇÕES 66

4.1 Resultados (1º artigo) 66

4.2 Resultados (2º artigo) 82

5 RESULTADOS COMPLEMENTARES 93

5.1 Contabilidade Ambiental em emergia: indicadores 93

5.2 Relação entre área e eletricidade gerada 96

6 CONCLUSÕES 98

7 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS 100

REFERÊNCIAS 101

APENDICE 110

Apêndice A – Memorial de cálculo dos fluxos de emergia para perda do solo ... 110

Apêndice B – Tabela de dados utilizados para analise em emergia 111

ANEXOS 112

1 INTRODUÇÃO

A qualidade de vida de uma sociedade está intimamente ligada ao seu consumo de energia. O crescimento da demanda energética mundial nos países traz a preocupação com alguns aspectos essenciais para a política e planejamento energético de todas as economias emergentes. Dentre eles, pode-se citar a segurança no suprimento de energia necessária para o desenvolvimento social e econômico de um país e os custos ambientais para atender a esse aumento no consumo de energia (MARTINS et al., 2008).

A energia, nas suas mais diversas formas, é indispensável à sobrevivência da espécie humana. O homem procurou sempre evoluir, descobrindo fontes e formas alternativas de atender às suas necessidades, é um recurso indispensável e estratégico para o desenvolvimento socioeconômico.

A energia é um dos recursos mais importantes e ao mesmo tempo uma das preocupações mais relevantes em todo o mundo devido ao esgotamento rápido de combustíveis não renováveis, o aquecimento global e as mudanças climáticas (LIRA-BARRAGAN et al., 2014).

O petróleo é a fonte primária de energia mais utilizada no mundo. Esta tendência se fortaleceu na década de 1960, quando o uso do óleo (fração líquida do petróleo) ultrapassou o do carvão como principal fonte energética. No entanto, as reservas de combustíveis fósseis são cada vez menores, causando um aumento no custo de produção, que resulta num aumento direto do custo da eletricidade (MATHIAS, 2008).

A produção mundial de energia eólica era equivalente a zero em 1980, mas em 2013 atingiu 2,7% do total de eletricidade consumida. Os EUA foram os maiores produtores de eletricidade a partir do vento em 2013 com 27% da produção total no mundo. O Brasil ocupava a 15 ª posição do ranking, mas tem o 1º lugar para o fator de capacidade, com 36%, um valor superior a Turquia (33%), Austrália e EUA (32%); destacando que o Brasil tem a maior capacidade potencial em todo o mundo para a produção de eletricidade a partir de energia eólica (N3E, 2014).

Para o aproveitamento desse potencial energético, o governo Brasileiro desenvolveu um planejamento estratégico de longo prazo, para manter com o atual nível de importância de cerca de 43% para as chamadas fontes renováveis (incluindo, principalmente, lenha, bagaço de cana, eólica e hidráulica) em sua matriz

energética nacional até 2023 (BRASIL, 2014). Para isso, foi criado o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), uma importante ação política com o objetivo de promover o uso de fontes alternativas de energia.

Desde a criação do PROINFA a produção de energia eólica no Brasil vem aumentando. Considerando o potencial eólico instalado e os projetos em construção, a meta do programa era atingir a marca dos 4400 MW, no final de 2013. Segundo o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, publicado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás, o território brasileiro tem capacidade para gerar até 143 GW de energia eólica.

O PROINFA é um avanço do governo brasileiro em relação às políticas públicas para a diversificação da Matriz Energética Brasileira. Além da contribuição na geração de energia, o programa tem como um de seus objetivos fomentar a indústria de base nacional com a intenção de fortalecer a indústria brasileira de geração de Energia Elétrica, com o objetivo principal de aumentar a participação das fontes eólica, biomassa e pequenas centrais hidrelétricas (PCH). Vale a pena dizer que a geração de eletricidade, através da energia eólica vem sendo beneficiada pela redução de seu preço de mercado estabelecido por leilões públicos (N3E, 2014).

Com as reduções nos preços de mercado, as organizações, indústrias e empresas de serviço assumem, cada vez mais, o seu interesse na energia eólica como bom investimento e como solução para os problemas energéticos do futuro. No entanto, a viabilidade econômica dos investimentos é muito diferente de país para país e de região para região, dependendo essencialmente da distribuição geográfica do potencial eólico e dos outros tipos energéticos disponíveis no local (OCÁCIA, 2002).

Na busca pela ampliação da oferta de energia chamada limpa e transição para uma economia de baixo carbono, a energia eólica confirma-se como uma fonte crescente de aproveitamento energético no mundo (GWEC, 2011).

Segundo Goldemberg (2015) em sua análise da evolução do sistema de produção de eletricidade no País, o autor aponta o problema gerado pelo abandono da construção de grandes reservatórios, motivado pelas variações de clima e precipitação hídrica, tornado o sistema vulnerável, e levando a uma carbonização do sistema com usinas térmicas representando hoje cerca de 30% da energia produzida.

A expansão da geração de eletricidade com fontes renováveis de energia (biomassa, eólica, solar) poderia é contribuir para a solução deste problema. A energia eólica vem recebendo vários adjetivos, sendo chamada de energia limpa, verde, não poluente, etc., mas usualmente estas afirmações são baseadas apenas no fato de que a energia primária sendo convertida provém do vento que, por definição é uma fonte de energia renovável.

Por outro lado, a conversão de energia eólica em elétrica demanda uma série de recursos materiais e de energia para implantar e operar os parques eólicos, o que poderia interferir no grau da renovabilidade da energia eólica e em sua eficiência energética (em diferentes escalas) comparada à já utilizada energia hidroelétrica no Brasil. Neste sentido qual o desempenho energético-ambiental da energia eólica gerada no Estado do Piauí? Ela possui energia líquida positiva? Incentivos devem ser feitos favorecendo sua produção considerando o contexto da matriz energética brasileira? Desta forma, além de indicadores socioeconômicos, avaliar o desempenho energético-ambiental da energia eólica torna-se importante para melhor subsidiar decisões estratégicas sobre o futuro energético do Brasil.

A hipótese desse trabalho é de que os métodos científicos aqui utilizados apresentem indicadores que apontem que a energia eólica produzida no Piauí possui desempenho energético-ambiental que justifique os esforços governamentais aplicados em dar suporte a este tipo de geração de energia.

1.1 Objetivo

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar o desempenho energético-ambiental da energia eólica gerada na chapada do Piauí e discutir sobre seu potencial em contribuir para uma matriz energética sustentável no Brasil.

1.1.2 Objetivos específicos

a) Realizar revisão bibliográfica sobre avaliações energético-ambientais publicadas em veículos de elevada qualidade científica para discutir sobre o estado do conhecimento deste tema;

b) Mostrar o funcionamento, e obter dados primários (massa, energia e monetário) do complexo de energia eólica considerado como estudo de caso no estado do Piauí;
c) Aplicar uma abordagem multiescala e multidimensional (energia incorporada, potencial de aquecimento global e contabilidade ambiental em emergia) do complexo de energia eólica estudado para auxiliar na discussão sobre o seu desempenho energético-ambiental;

1.2 Organização do trabalho

Esta dissertação apresenta-se no modelo de artigos como proposto e incentivado pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista (UNIP) objetiva-se com esta estrutura de dissertação tornar mais efetivo as publicações dos resultados dos projetos desenvolvidos no programa. Esta dissertação apresenta a seguinte estrutura:

1) A primeira parte apresenta a introdução, descrevendo a motivação, hipótese e justificativa do trabalho, contextualizando o leitor sobre o tema, o objetivo geral e os objetivos específicos.
2) A segunda parte trata da revisão de literatura apresentando, além de informações importantes sobre a geração de energia eólica, o planejamento energético brasileiro, conceitos sobre sustentabilidade e as abordagens metodológicas utilizadas. Adicionalmente, o referencial teórico sobre a geração de energia eólica e seu desempenho energético-ambiental é apresentado.
3) A terceira parte apresenta o método científico utilizado, incluindo a descrição da área de estudo, fontes de dados, análise da energia incorporada, cálculo do potencial de aquecimento global e dos indicadores da contabilidade ambiental em emergia. Através destas informações o leitor poderá, se desejável, replicar todos os cálculos.
4) A quarta parte apresenta os resultados obtidos no desenvolvimento deste projeto de pesquisa. Para isso, são apresentados os dois artigos oriundos desta pesquisa.
5) A quinta parte apresenta os resultados complementares desta dissertação obtidos após a apresentação das duas publicações anteriores.

6) Finalmente, a sexta e sétima partes apresentam as conclusões desta dissertação e propostas para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Energia e desenvolvimento sustentável

Segundo Goldemberg (2010) a energia tem a capacidade de produzir transformações num sistema (mecânicas, físicas, químicas ou biológicas). A energia pode se manifestar de diversas formas: energia de radiação; energia química; energia nuclear; energia térmica; energia mecânica; energia elétrica; energia magnética e energia elástica. A mais importante propriedade dessas formas de energia é que podem ser convertidas umas nas outras

A classificação apresentada por Goldemberg e Lucon (2011) demonstra as fontes de energia em vista de seus processos de conversão de energia primária em secundária (energia elétrica, química, térmica e mecânica), e suas diferentes aplicações no desenvolvimento de atividades humanas (Figura 1).

Figura 1 – Qualificação das fontes primárias de energia

<table>
<tr><th colspan="2">Fontes de Energia</th><th>Energia Primária</th><th>Energia Secundária</th></tr>
<tr><td rowspan="2">Não renováveis</td><td>Fósseis</td><td>Carvão Mineral
Petróleo e Derivados
Gás Natural</td><td>Termoeletricidade, Calor, Combustível para transporte</td></tr>
<tr><td>Nuclear</td><td>Materiais Físseis</td><td>Termoeletricidade, Calor</td></tr>
<tr><td rowspan="7">Renováveis</td><td>Tradicionais</td><td>Biomassa primitiva: lenha de desmatamento</td><td>Calor</td></tr>
<tr><td>Convencionais</td><td>Potenciais hidráulicos de médio e grande porte</td><td rowspan="2">Hidroeletricidade</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Modernas
(ou novas)</td><td>Potenciais hidráulicos de pequeno porte</td></tr>
<tr><td>Biomassa “moderna”
Lenha replantada, Culturas energéticas (cana de açúcar, óleos vegetais)</td><td>Biocombustíveis (Etanol, biodiesel), Termoeletricidade, calor</td></tr>
<tr><td>Biogás gerado em aterros sanitários e biodigestores</td><td>Termeletricidade, calor</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Outas</td><td>Energia Solar</td><td>Calor, eletricidade fotovoltaica</td></tr>
<tr><td>Geotermal</td><td>Calor e eletricidade</td></tr>
<tr><td>Eólica</td><td rowspan="2">Eletricidade</td></tr>
<tr><td></td><td>Mare motriz e das Ondas</td></tr>
</table>

Fonte: Adaptada de Goldemberg e Lucon (2011, p. 69).

Na geração de eletricidade, esse processo de conversão ocorre por intermédio de empreendimentos geradores de diferentes naturezas: usinas hidrelétricas (exploração de potenciais hidráulicos); usinas termelétricas (aproveitamento do poder calorífero de combustíveis fósseis, biomassa, calor geotermal ou fissão nuclear); usinas solares, mediante a instalação de painéis fotovoltaicos, coletores termos solares; usinas eólicas, aproveitando a força dos ventos; entre outras formas de aproveitamento.

Os padrões atuais de produção e consumo de energia são baseados nas fontes fósseis, o que gera emissões de poluentes locais, gases de efeito estufa e põem em risco o suprimento de longo prazo no planeta. A maior parte dos problemas ambientais provem da obtenção de energia, e suas maiores fontes poluidoras são a produção de eletricidade, transporte, indústria, construção e o desmatamento.

Devido aos problemas ambientais causado na obtenção de energia, o governo busca implantar uma matriz energética que seja sustentável, o conceito de desenvolvimento sustentável vem sendo estudado desde a década de 1980, quando foi criada pela Assembleia Geral das Nações Unidas a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CMMAD), presidida por Gro Harlem Brundtland que, em 1987, lançou o relatório "*Nosso Futuro Comum",* também conhecido como o Relatório de Brundtland (GOLDEMBERG, 2015).

O Relatório de Brundtland definiu o desenvolvimento sustentável da seguinte forma: "[...] aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem a suas próprias necessidades [...]". No entanto essa definição vem sendo criticada, desde a ocasião em que foi formulada.

A primeira dessas críticas é a de que a definição não diz nada sobre a métrica a ser usada. Como se deve interpretar a menção às "gerações futuras". Quantas gerações? Nossos filhos? Nossos netos? (GOLDEMBERG, 2007).

A segunda é que ela ignora o fato de que existem grupos e classes sociais diferentes numa sociedade e que o interesse em garantir a sustentabilidade de cada uma delas pode ser diferente.

Para Goldemberg (2015), o desenvolvimento sustentável tem três componentes indispensáveis, isto é, se apoia num tripé: a sustentabilidade econômica, a social e a ambiental, e todas elas precisam ser levadas em conta e

harmonizadas. Quando uma delas não está presente o desenvolvimento não é sustentável.

Em 2012, vinte anos após a realização da Eco-92, ocorreu a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio + 20), que reuniu 193 delegações diplomáticas para discutirem, na cidade do Rio de Janeiro, o modelo de desenvolvimento ambientalmente sustentável. Houve, sem dúvidas, um enriquecimento do debate sobre meio ambiente em diferentes esferas, como a governamental, não-governamental, empresarial, acadêmica e científica (OLIVEIRA, 2012).

Para Ortega (2012), mesmo com os avanços nos debates sobre o meio ambiente, a situação do planeta se agravou e as reivindicações continuam sem serem atendidas, ao passo que o termo “Sustentabilidade” passou a ser de domínio público. O autor destaca que o termo Sustentabilidade precisa ser resgatado usando a visão sistêmica ecológica.

Sachs (1990) já descrevia a sustentabilidade nesse conceito dinâmico, que leva em conta as necessidades crescentes das populações num contexto internacional em constante expansão, chamando a atenção para as seguintes cinco dimensões principais:

1. A sustentabilidade social está vinculada a uma melhor distribuição de renda com redução das diferenças sociais.
2. A sustentabilidade econômica está vinculada ao fluxo constante de inversões públicas e privadas, além da destinação e administração correta dos recursos naturais.
3. A sustentabilidade ecológica está vinculada ao uso efetivo dos recursos existentes nos diversos ecossistemas e, como um dos resultados, mínima deterioração ambiental.
4. A sustentabilidade geográfica que está ligada a uma espacialização rural-urbana mais equilibrada.
5. A sustentabilidade cultural que procura a realização de mudanças em harmonia com a continuidade cultural vigente.

Uma visão macro do conceito de sustentabilidade é apresentada por Herman Daly (1997), quando se refere aos dois princípios básicos que devem ser atendidos:

1º) Principio da sustentabilidade ambiental - os recursos naturais não devem ser consumidos a uma velocidade que impeça sua recuperação;
2º) Princípio da sustentabilidade ambiental - a produção de bens não deve gerar resíduos que não possam ser absorvidos pelo ambiente de forma rápida e eficaz.

A aplicação desses princípios em nível global direciona ações locais em prol da conservação dos sistemas de sustentação da vida e da biodiversidade, do aumento de uso de recursos renováveis, da minimização da utilização de recursos não-renováveis e do respeito aos limites da capacidade de suporte dos ecossistemas (GIANNETTI et al., 2007).

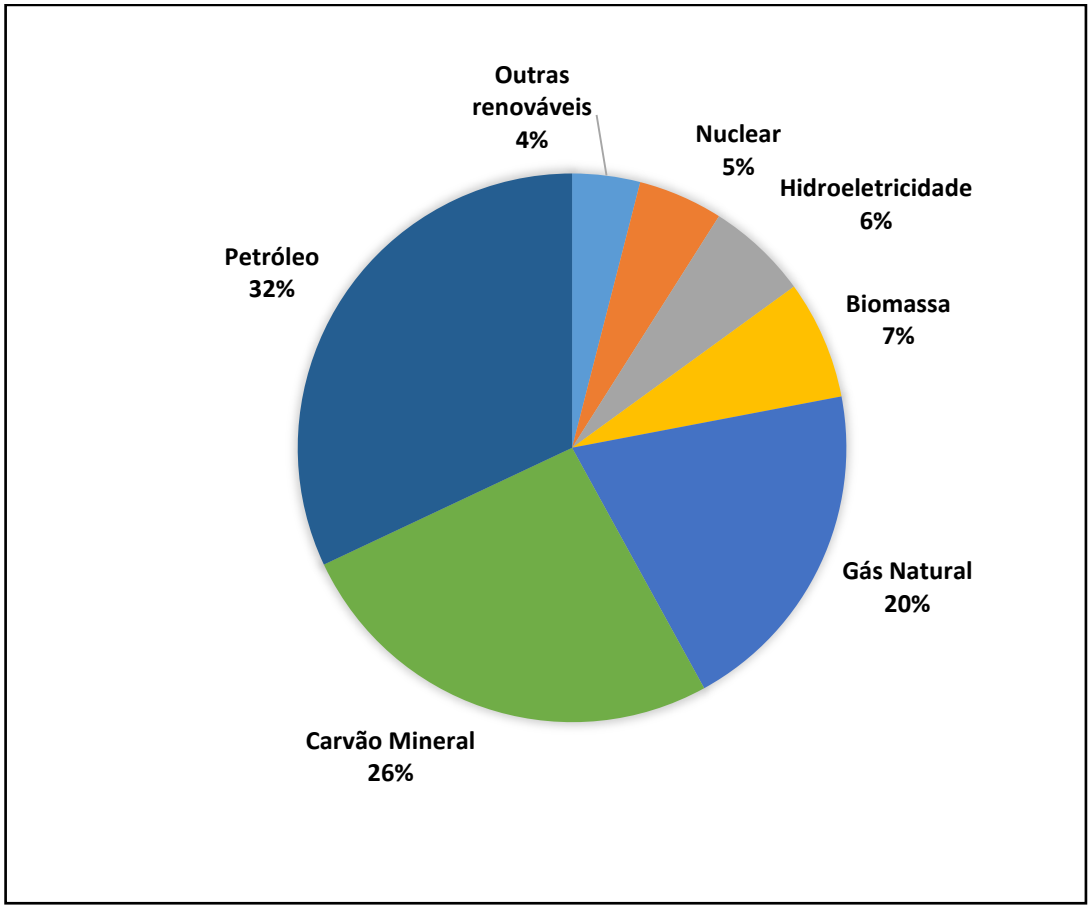
Segundo Ferraz (2003), a sustentabilidade de qualquer atividade deve ser avaliada considerando-se três eixos básicos: (i) o econômico, que tradicionalmente é o único levado em consideração e se refere à rentabilidade econômica ao longo do tempo; (ii) o ecológico, que avalia a manutenção do ecossistema afetado pela atividade ao longo do tempo; (iii) o social, que considera a compatibilidade da gestão e da organização do sistema com valores éticos e culturais do grupo e da sociedade envolvidos.

A promoção do desenvolvimento sustentável deve ser perseguida, isto é, buscando explorar os recursos, orientar investimentos e adotar técnicas e arranjos institucionais que permitam atender as necessidades dos homens atuais e das gerações futuras (BURGENMEIER, 2005).

Para Brown e Ulgiati (1997), a sustentabilidade de uma economia pode ser avaliada em termos de emergia, criando uma função da dependência dessa economia de emergia renovável local, do grau de dependência de emergia importada, e da carga total da atividade econômica no ambiente.

As fontes de energia usadas no presente, isto é, as matrizes energéticas mundiais, são as indicadas no Gráfico (Figura 2). Os combustíveis fósseis (carvão, petróleo e gás natural) representam mais de 80% do consumo mundial.

Figura 2 – Oferta de energia mundial (2014), (306 milhões de toneladas equivalentes de petróleo)



Fonte: BP Statistical Review of World Energy (2015).

Os principais problemas decorrentes e limitações do uso de uma matriz energética fortemente dependente de combustíveis fósseis, como a atual, são os seguintes (GOLDEMBERG, 2007):

1. Exaustão dos combustíveis: As reservas existentes destes combustíveis fósseis são conhecidas, sendo previsível que elas se esgotem, sejam 41 anos para petróleo, 63 para gás natural e 147 para o carvão, isto é, dentro de uma ou duas gerações;
2. Segurança no acesso aos combustíveis fósseis: Uma vez que as principais reservas estão distribuídas de forma desigual entre os países, gerando problemas geopolíticos no acesso a elas;
3. Degradação da saúde e condições ambientais: tanto no nível local (poluição atmosférica), nível regional (chuva ácida) e nível mundial (aquecimento global), produzido principalmente pelo CO2 resultante da queima de combustíveis fósseis.

Segundo Goldemberg (2015), a resposta para todos estes problemas, ou seja, a busca da sustentabilidade, é a adoção de energias renováveis que respondem bem a estes aspectos acima mencionado: a maioria das energias renováveis (energia eólica, solar térmica, eletricidade solar com células fotovoltaicas e energia de biomassa) tem origem na radiação solar que não vai se esgotar e que não é poluente diretamente. Além disso, a radiação solar está distribuída sobre o planeta de uma forma mais equitativa que as fontes fósseis de energia.

2.2 Planejamento energético brasileiro

A crise internacional do petróleo ocorrida na década de 1970 despertou o interesse e investimentos suficientes para viabilizar o desenvolvimento e a aplicação de equipamentos de geração de energia eólica. O mundo então começou a utilizar o vento como fonte de energia em escala comercial, passando por um intensivo desenvolvimento tecnológico nos anos 90 (GWEC, 2010).

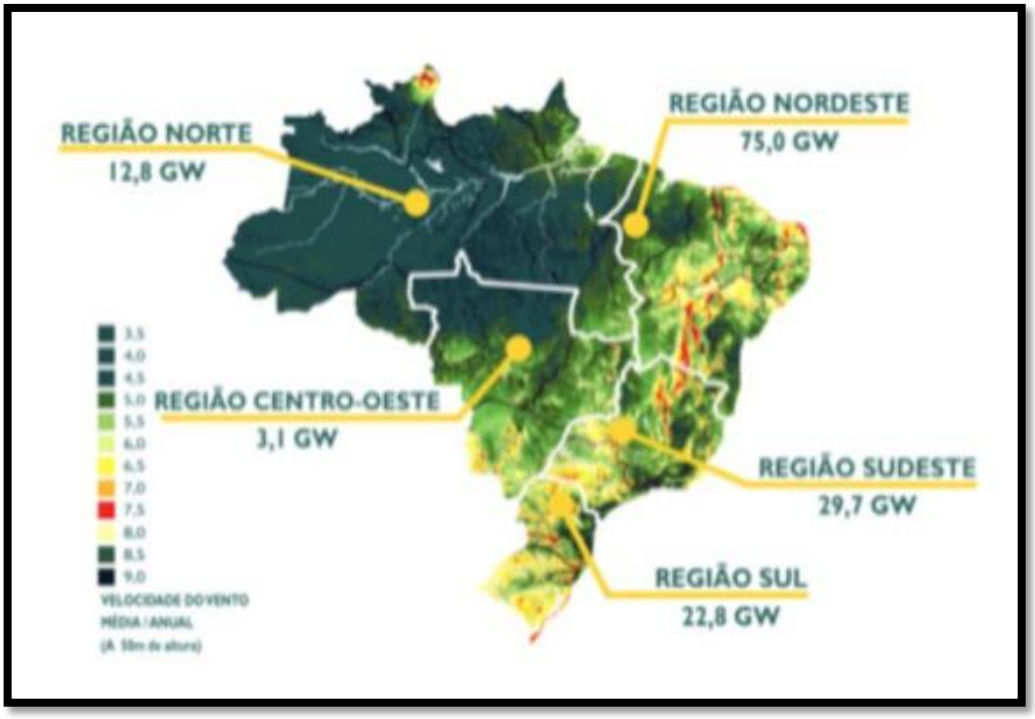
Segundo associação de Energia Eólica Europeia (EWEA), entre as fontes de energia renováveis a energia eólica é a que mais cresce no mundo, já sendo uma alternativa consolidada. Estima-se que em 2020 a capacidade instalada em termos de energia eólica nos países que compõem a União Europeia será em torno de 180 GW, o que equivale a algo em torno de 12% da demanda de eletricidade da Europa.

Hoje, além de ser reconhecida como uma das fontes de energia que mais cresce no mundo, a taxas superiores a 28% ao ano, é reconhecida mundialmente por ser uma importante fonte de energia renovável para geração de eletricidade pela baixa emissão de dióxido de carbono e gases poluentes durante sua operação (GWEC, 2010).

No Brasil a produção de energia eólica ainda é restrita, no entanto o país é o quarto no mundo em termos de potencial de expansão da capacidade eólica instalada, perdendo apenas para China, Estados Unidos e Alemanha.

O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, elaborado pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) mostra um potencial de expansão bruto de 143 GW. O maior potencial foi identificado na região Nordeste com 75,0 GW, seguido pela região Sudeste de 29,7 GW, região Sul com 22,8 GW, região Norte com 12,8 GW e região Centro-Oeste com 3,1GW conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Potencial eólico estimado para as regiões brasileiras



Fonte: EPE (2007).

O estudo realizado pelo Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia para Mudanças Climáticas (INCT-Clima), avaliou o potencial eólico onshore (“em terra”) do Brasil, levando em consideração o aumento da altura das torres de geração energética. Esse estudo aponta que o país pode ter uma capacidade seis vezes maior de produzir energia a partir dos ventos do que os 143 GW estimado.

O Atlas do Potencial Eólico Brasileiro realizado em 2001, foi feito com a estimativa do uso de torres de 50 metros de altura. Atualmente existem torres acima de 100 metros, que ampliam o potencial tecnicamente viável de exploração de 143 GW para 880 GW, segundo pesquisa do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (Inpe).

Em 2014, a potência instalada para geração eólica no país expandiu 122%. Segundo o Banco de Informações da Geração (BIG), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), o parque eólico nacional cresceu 2.686 MW, alcançando 4.888 MW ao final do mesmo ano (BEN, 2015).

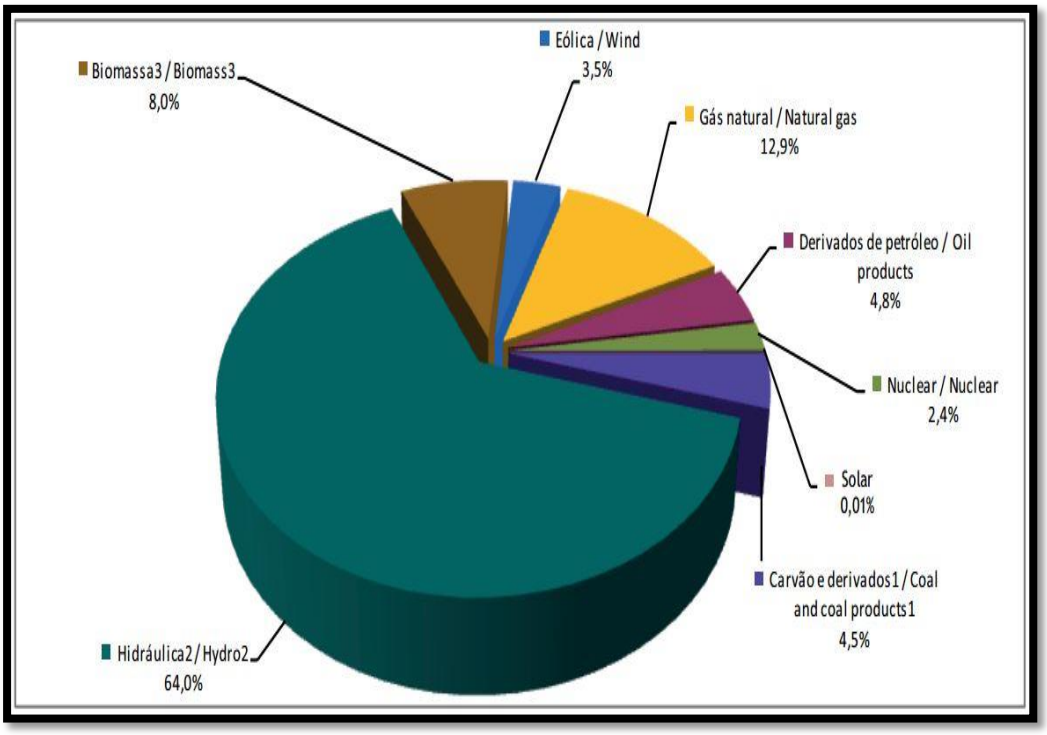
Com a quantidade de rios existente é natural que o Brasil tire das hidrelétricas a maior parte da energia elétrica que consome, mas a construção dessas usinas custa caro, demora muito e gera problemas ambientais. Com a capacidade instalada de mais de 83000 MW, as usinas hidrelétricas respondem pela maior parte do

consumo no Brasil, mais a tendência é que a energia dos ventos tenha uma maior participação do que a atual.

Segundo Elbia Melo, presidente da Associação Brasileira de Energia Eólica (ABEE), o Brasil cresce a cada ano cerca de 6 GW, o que corresponde a uma Usina Hidrelétrica de Belo Monte e meio para atender a demanda do Brasil. O destaque é que só de eólica o potencial estimado chega à 300 GW (ABEE, 2015).

A Figura 4 apresenta a estrutura da oferta interna de energia elétrica por fonte no Brasil para o ano de 2015. O Brasil dispõe de uma matriz elétrica de origem predominantemente renovável, com destaque para a geração hidráulica que responde por 64% da oferta interna. A segunda fonte de energia no País é o gás natural com 13%, a energia nuclear com duas usinas em funcionamento fica com 2%, e as usinas eólicas chegando ao total de 4%, o restante é atendido pelo petróleo usado nas termelétricas, que também são movidas a gás, a queima de biomassa como bagaço de cana, o carvão e outros.

Figura 4 – Oferta Interna de Energia Elétrica por Fonte/ano base 2015



Notas: 1 Inclui gás de coqueira; 2 Inclui importação de eletricidade; 3 Inclui lenha, bagaço de cana, Lixívia e outras recuperações
Fonte: Balanço Energético Nacional (2016).

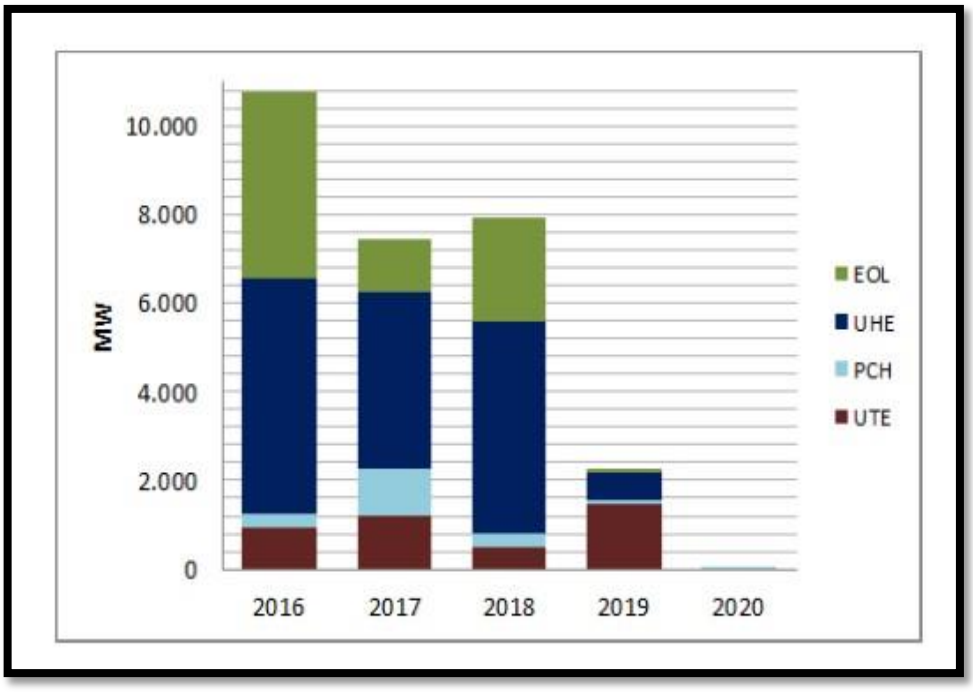
Atualmente, a nova ordem mundial é a busca pela autossuficiência em geração de energia, aliada a uma diversificação da matriz energética, ou seja, a

procura por diferentes fontes de energias alternativas que supram a demanda interna dos países, no caso de uma escassez de combustíveis fósseis. Para tanto, os países têm que ter sob controle fontes primárias de geração de energia elétrica, térmica e veicular, e em um mundo globalizado é necessário que haja uma interdependência entre os países e uma autossuficiência em alguma fonte de energia (IGNATIOS, 2006).

Segundo a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE), estatal vinculada ao Ministério de Minas e Energia, caso a demanda por energia venha a crescer anualmente na ordem de 4,8%, o país precisará investir em torno de R$ 125 bilhões para a ampliação de geração e transmissão de energia elétrica a fim de que haja fornecimento regular sem riscos de apagão (EPE, 2014).

A Figura 5 representa a expansão da oferta de energia por tipo e MW/ano. Os Relatórios de Acompanhamento Mensal das Usinas Hidrelétricas (UHEs), Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), Eólicas (EOLs) e as Usinas Termelétricas (UTEs), publicados no portal da ANEEL (ANEEL, 2015), ao disponibilizar as informações relativas aos empreendimentos, faz uma previsão de entrada em operação comercial das usinas por tipo a partir de 2016. Essa previsão considera apenas os empreendimentos já outorgados que ainda não entraram em operação comercial, ou seja, estão incluídas apenas as usinas que têm a outorga vigente.

Figura 5 – Expansão da oferta de energia por tipo, MW, ano



Fonte: ANEEL (2015).

O Plano Decenal de Expansão de Energia para 2019 destaca o potencial da energia eólica como alternativa renovável que pode contribuir para a diversificação da matriz energética do país, que se encontra significativamente dependente de recursos hidráulicos que se alteram ao longo das diferentes estações, principalmente em períodos de inverno (BRASIL, 2010; GWEC, 2010).

De fato, a energia eólica pode e deve contribuir para a diversificação da matriz energética do país, com dados promissores em termos de atratividade. Silva (2012) destaca que para o uso deste potencial, é necessária uma avaliação do ajuste das características da tecnologia eólica à estrutura do sistema elétrico brasileiro.

2.3 Energia eólica

A energia eólica tem origem na energia solar. É um tipo de energia renovável que tem como fonte o vento, resultante do deslocamento de massas de ar, originado pelos efeitos das diferenças de pressão atmosférica entre duas regiões distintas e influenciadas por efeitos naturais como continentalidade, maritimidade, latitude, altitude, e a rugosidade do solo, entre outros (GWEC, 2011).

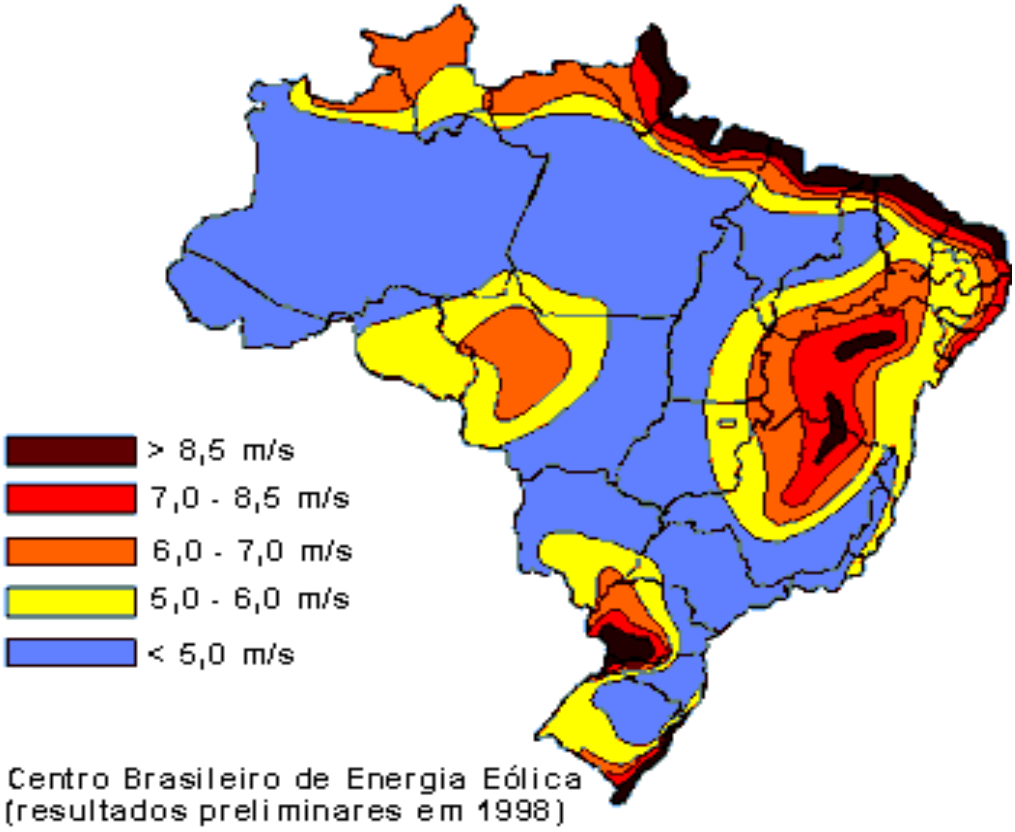
A energia eólica é considerada, segundo a Aneel (2008), como aquela proveniente da energia cinética do ar em movimento (ventos), resultante de diferenças de temperatura existentes na superfície do planeta.

Assim como ocorre com outras fontes energéticas, a geração de energia eólica pressupõe a existência de condições naturais específicas e favoráveis. Por sua vez, é influenciada por aspectos físicos e climáticos, como a densidade do ar, a intensidade, direção e velocidade do vento.

A Zona Litorânea Norte-Nordeste é definida como a faixa costeira com cerca de 100km de largura, que se estende entre o extremo norte da costa do Amapá e o Cabo de São Roque, no Rio Grande do Norte. Nessa região, os ventos são controlados primariamente pelos alísios de leste e brisas terrestres e marinhas. Essa combinação das brisas diurnas com os alísios de leste resulta em ventos médios anuais entre 5m/s e 7,5m/s na parte norte dessa região (litorais do Amapá e Pará) e entre 6m/s a 9m/s em sua parte sul, que abrange os litorais do Maranhão, Piauí, Ceará e Rio Grande do Norte (CEPEL, 2001).

O Estado do Piauí, como mostra o Mapa do Potencial Eólico Brasileiro elaborado em 1998 (Figura 6), apresenta significativo potencial eólico, principalmente em áreas próximas ao litoral e regiões mais elevadas, como na Chapada do Araripe nas divisas com os estados da Bahia e o Pernambuco. Estudos apontam condições de ventos favoráveis a implantação de parque eólicos nessa região, com médias de ventos variando de 6,0 a 7,0m/s. Globalmente, apesar de distribuído de maneira não uniforme entre os países, o potencial técnico da energia eólica é maior que a produção mundial de eletricidade (IPCC, 2011).

Figura 6 – Mapa do Potencial eólico Brasileiro



Fonte: ANEEL (2015).

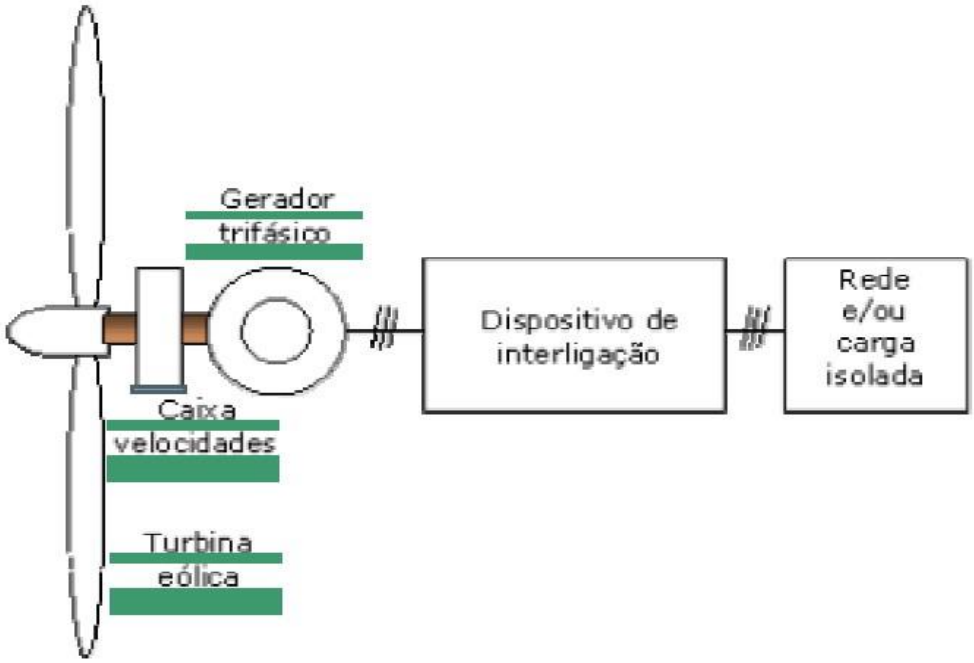
2.3.1 Componentes e aplicações de sistemas eólicos

A energia eólica com a finalidade de conversão em energia elétrica é gerada por meio de aerogeradores. Um aerogerador é um gerador elétrico integrado ao eixo de um cata-vento e que converte energia eólica em energia elétrica.

Os elementos da cadeia de conversão de energia podem ser combinados de diversas formas. Os elementos presentes são: uma turbina eólica, um gerador

trifásico e um dispositivo de interligação à rede de distribuição elétrica (Figura 7; BRIZON, 2012).

Figura 7 – Esquema do princípio de funcionamento do rotor de Savonius



Fonte: Brizon et al. (2012).

As turbinas eólicas podem ser classificadas em Turbinas quanto a sua forma em horizontal e vertical, e quanto a potência que varia até 50kW, para pequeno porte, de 50 a 1000kW (médio porte) e acima de 1MW para grande porte.

A tecnologia atual oferece uma variedade de máquinas, segundo a aplicação ou local de instalação. Quanto à aplicação, as turbinas podem ser conectadas à rede elétrica ou destinadas ao suprimento de eletricidade a comunidades ou sistemas isolados.

Em relação ao local, a instalação pode ser feita em terra firme com turbina de médio porte ou off-shore (no mar) com turbinas de grande porte, conforme ilustra a (Figura 8). Uma das vantagens do sistema eólico é que ele pode ser utilizado em sistemas isolados, sistemas híbridos e sistemas interligados à rede. O uso nos sistemas isolados é de fundamental importância, por viabilizar o uso da energia elétrica em lugares antes improváveis ou reduzir consideravelmente o custo em outros lugares isolados, que necessitariam de um sistema de transmissão e distribuição de energia para atender a uma quantidade muito pequena de consumidores (CÂMARA, 2011).

Figura 8 – Exemplos de turbinas eólicas (pequena, média, grande)

Fonte: Centro Brasileiro de Energia Eólica – CBEE/UFPE (2003). Disponível em: www.eolica.com.br

Segundo Daros (2013) Sistemas interligados à rede elétrica constituem sistemas de grande porte, interligados à rede de distribuição de duas formas: diretamente, através de geradores de indução ou síncrono, ou indiretamente, por meio de inversores acoplados a geradores de corrente contínua. Os sistemas interligados à rede elétrica podem ser dotados de várias dezenas de máquinas eólicas, e injetam toda a energia gerada na rede elétrica convencional, funcionando como uma usina geradora; são também denominadas usinas eólicas (Figura 9).

Figura 9 – Sistema interligado a rede elétrica

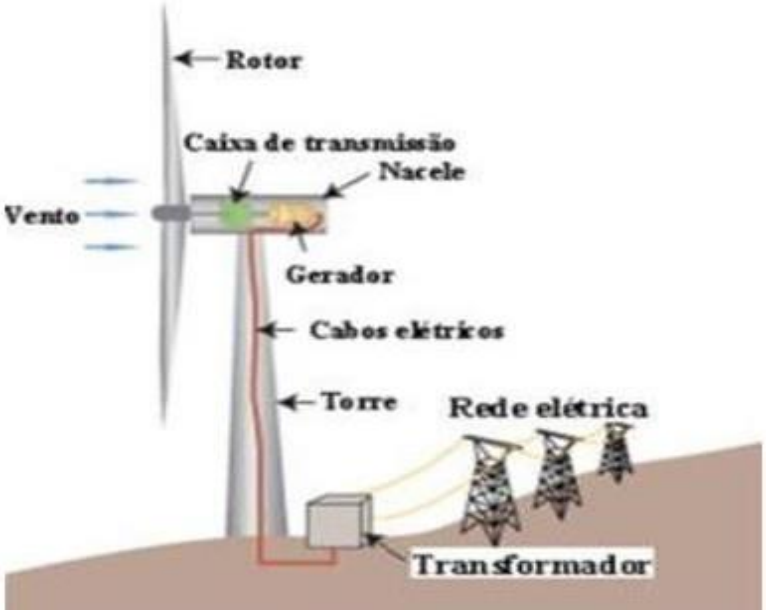
Fonte: Acervo do autor

As turbinas de grande porte são conectadas a rede elétrica tradicional convencional, geralmente essa conexão é feita por meio dos seguintes dispositivos:

- Conversor - equipamento eletrônico (composto por retificador, inversor) que converte a energia gerada pela turbina de tensão e frequência variáveis, para níveis adequados à injeção na rede;
- Transformador - equipamento elétrico que aumenta o nível de tensão gerado pelo conversor para a tensão da rede, da ordem de dezenas ou centenas de kW (linha de transmissão).

Os sistemas conectados à rede geralmente não são dotados de armazenamento de energia (baterias), de forma que produzem energia somente quando existe disponibilidade de vento. A figura 10, demonstra o processo de interligação desde a geração até o envio para a rede elétrica (Figura 10).

Figura 10 – Demonstração do processo de interligação do parque eólico na rede elétrica



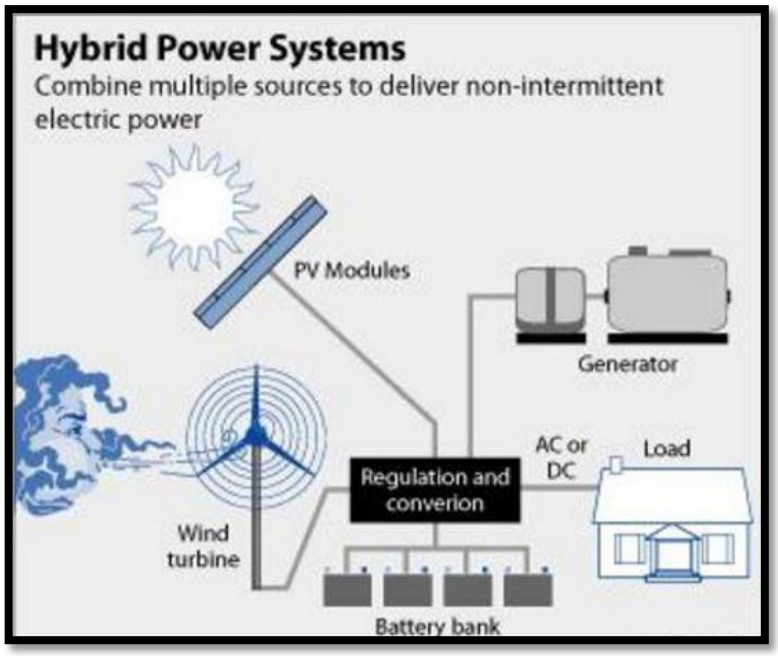
Fonte: Disponível em: www.davidlarlin.info

Já para os sistemas isolados ou independentes, que são chamados de sistemas autônomos de pequeno porte com potência instalada na faixa de até 80 kW, são normalmente destinados à eletrificação rural. Tais sistemas podem destinar-se a alimentar uma residência rural, uma fazenda, uma aldeia ou outro tipo de instalação. Normalmente, utilizam alguma forma de armazenamento, podendo ser baterias para utilização de aparelhos elétricos ou armazenamento de água para posterior utilização (BARBOSA, 2008).

Os sistemas de apoio ou sistemas (híbridos) são aqueles em que uma turbina eólica opera em paralelo com uma fonte de energia constante (na maioria grupo-geradores diesel), tendo como objetivo principal economizar combustível. Também são utilizados em conjunto com módulos fotovoltaicos (ELS, 2010).

Os sistemas híbridos (Figura 11) apenas são vantajosos em regiões onde os padrões de vento e os recursos solares se complementam significativamente, ou seja, em lugares onde o vento sopra frequentemente a velocidades significativas durante a noite, ou em que os períodos de bons recursos solares também são frequentemente acompanhados por ventos consistentes.

Figura 11 – Modelo de sistema híbrido



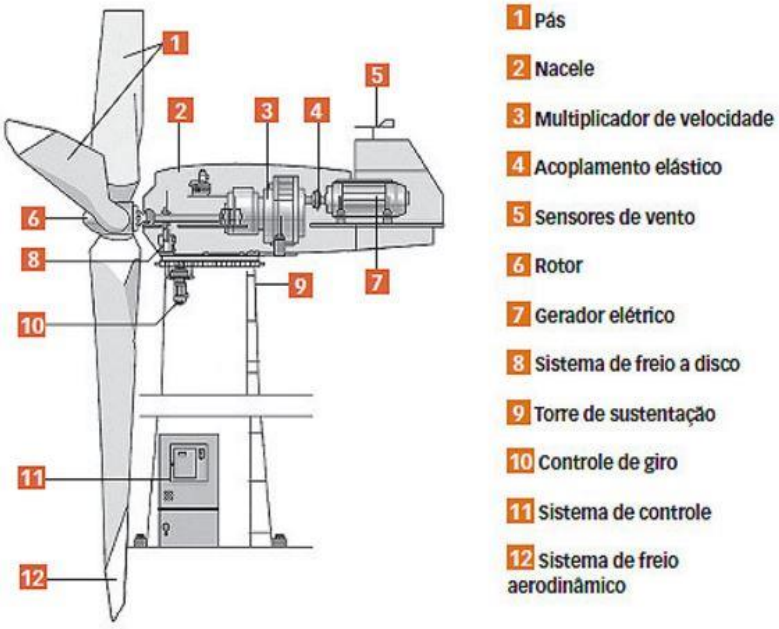
Fonte: http://vivagreen.com.br/eolica.

No início da utilização da energia eólica, surgiram turbinas de vários tipos, com eixo horizontal, eixo vertical, com apenas uma pá, com duas e três pás, gerador de indução, gerador síncrono, etc. Com o passar do tempo, consolidou-se o projeto de turbinas eólicas com as seguintes características: eixo de rotação horizontal, três pás, alinhamento ativo, gerador de indução e estrutura não-flexível (CARDOSO, 2016).

Um sistema eólico é constituído por vários componentes que devem trabalhar em harmonia de forma a propiciar um maior rendimento final. Para efeito de estudo global da conversão eólica devem ser considerados os seguintes componentes (Figura 12):

- Vento: Disponibilidade energética do local destinado à instalação do sistema eólico.
- Rotor: Responsável por transformar a energia cinética do vento em energia mecânica de rotação.
- Transmissão e Caixa multiplicadora: Responsável por transmitir a energia mecânica entregue pelo eixo do rotor até a carga.
- Gerador Elétrico: Responsável pela conversão da energia mecânica em energia elétrica.
- Mecanismo de Controle: Responsável pela orientação do rotor, controle de velocidade, controle da carga, etc.
- Torre: Responsável por sustentar e posicionar o rotor na altura conveniente.
- Sistema: Alguns geradores não utilizam este componente; neste caso, o eixo do rotor é acoplado diretamente à carga de armazenamento, responsável por armazenar a energia para produção de energia constante a partir de uma fonte intermitente.
- Transformador: Responsável pelo acoplamento elétrico entre o aerogerador e a rede elétrica.
- Acessórios: São os componentes periféricos.

Figura 12 – Componentes de um sistema eólico



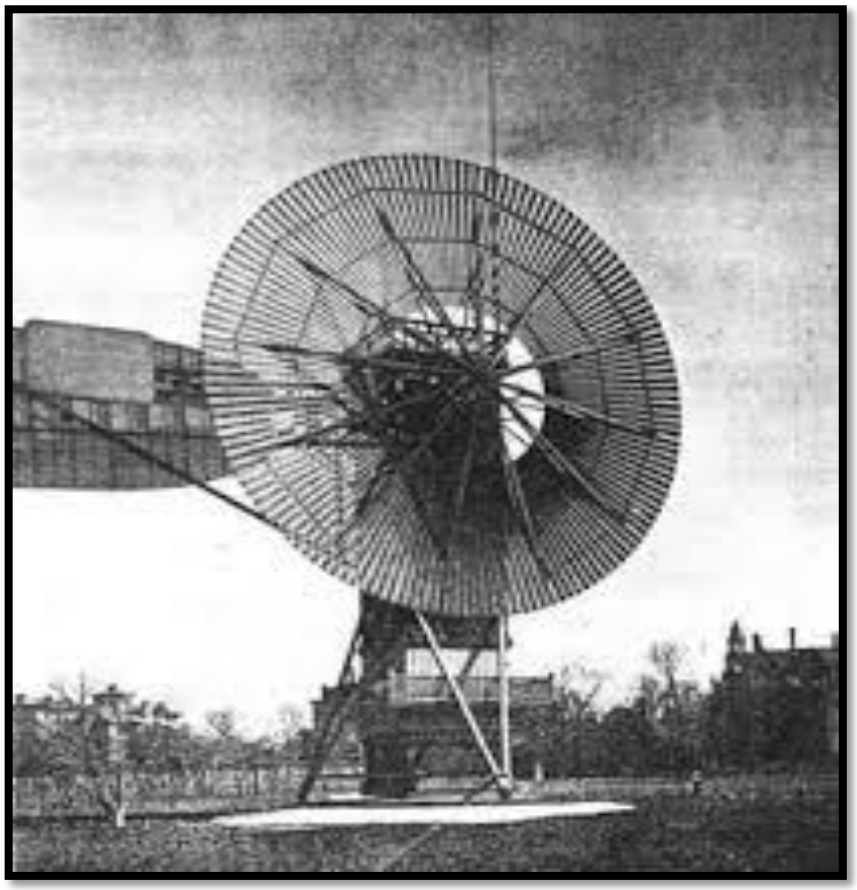
Fonte: Centro Brasileiro de energia eólica - CBEE / UFPE (2000).

2.3.2 Evolução na geração da energia eólica

A energia cinética dos ventos vem sendo utilizada pela humanidade a mais de 3000 anos, com os moinhos de ventos usados em atividades agrícolas e bombeamento de água. A primeira turbina eólica que gerava energia foi inventada em 1888 por Charles F. Brush.

No final do século XIX, quando o uso de energia elétrica começou a crescer rapidamente no planeta, as principais turbinas eólicas foram aplicadas na conversão da energia dos ventos diretamente em energia elétrica. A Figura 13 mostra a primeira turbina eólica automática, com diâmetro do rotor de 17m e 144 pás de madeira, para gerar energia elétrica (RÜNCOS, 2005).

Figura 13 – Moinho de Brush



Fonte: Fundação de Amparo à Pesquisa de São Paulo (2007).

A primeira turbina eólica comercial ligada à rede elétrica pública foi instalada em 1976, na Dinamarca. Atualmente, existem mais de 30 mil turbinas eólicas em operação no mundo. Em 1991, a Associação Europeia de Energia Eólica

estabeleceu como metas a instalação de 4.000 MW de energia eólica na Europa até o ano 2000 e 11.500 MW até o ano 2005. Essas e outras metas foram cumpridas muito antes do esperado (4.000 MW em 1996, 11.500 MW em 2001). Na Europa as metas para 2010 eram de 40.000 MW, nos Estados Unidos, o parque eólico existente era da ordem de 4.600 MW instalados e com um crescimento anual em torno de 10%. Estima-se que em 2020 o mundo terá 12% da energia gerada pelo vento, com uma capacidade instalada de mais de 1.200GW (RIOS, 2016).

2.3.3 Energia eólica no contexto brasileiro

O Brasil enfrentou uma grande crise no setor energético em 2001, com a crise o governo passou a dar mais atenção para a diversificação da matriz energética, com o aumento da participação da energia eólica, que na época era muito pequena. Somente no primeiro semestre de 2016, o Brasil já tinha instalado 381 usinas eólicas, totalizando 9 GW de potência instalada, até 2019 a meta é chegar aos 19 GW. Na tentativa de incentivar a contratação de novos empreendimentos de geração de energia no país, foi criado um programa emergencial de energia eólica, o PROEÓLICA.

Esse Programa, no entanto, não obteve resultados positivos, e foi substituído pelo Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), para incentivar a utilização de outras fontes renováveis, como eólica, biomassa e Pequenas Centrais hidrelétricas (PCHs). Além de incentivar o desenvolvimento das fontes renováveis na matriz energética, abriu caminho para a fixação da indústria de componentes e turbinas eólicas no país. A primeira turbina de energia eólica do Brasil foi instalada em Fernando de Noronha em 1992.

Alves (2010) relata que ano de 2001 durante uma grande crise energética no Brasil, assistiu-se a uma verdadeira corrida de empreendedores interessados em investir na construção e operação de usinas eólica no Brasil. A região Nordeste, por todo o seu potencial de ventos, apresenta atrativos para o uso de energia eólica do litoral dos estados do Ceará e do Rio Grande do Norte, onde se concentrou a atenção dos investidores.

Em 2009 foi realizado o primeiro leilão de energia eólica, em um movimento para diversificar a sua matriz de energia. Desde 2010, foram negociados mais de 340 projetos eólicos nos certames realizados no País. Somente em 2014, os

investimentos em energia eólica decorrentes dos leilões foram superiores a US$ 4 bilhões. (ANEEL, 2014).

Segundo Associação Brasileira de Energia Eólica – ABEEÓLICA, a energia eólica atendeu 80% do mercado no leilão A-3 para contratação de energia proveniente de empreendimentos de geração a partir das fontes eólica, biomassa, PCH e gás natural., realizado em 21 de agosto de 2015, para essas fontes, a contratação total foi de 669,498 MW. A fonte eólica contribuiu com a contração de 538,8 MW e será responsável pela aplicação de R$ 2 bilhões em investimentos e produção. Esse volume de energia será capaz de abastecer 1 milhão de residências mensalmente e evitar mais de 1 milhão de toneladas de CO2, por ano (ABEEÓLICA, 2015).

Segundo o fabricante de aerogerador marca Wobben, (http://www.wobben.com.br/), o valor médio em investimento inicial para usinas de médio e grande porte (acima de 30MW) é de R$ 4.200.000,00 por MW instalado. Este valor inclui o aerogerador, infraestrutura civil e elétrica, tudo isso dependendo das características de cada empreendimento. Na composição do cálculo de investimento e custo nesta forma de energia levam-se em conta diversos fatores, como a produção anual estimada, as taxas de juros, os custos de construção, de manutenção, de localização e os riscos de queda dos geradores. Sendo assim, os cálculos sobre o real custo de produção da energia eólica diferem muito, de acordo com a localização de cada usina.

Os preços do MW/h nos últimos leilões vêm diminuindo, chegando a ser até mais barato que a energia de termoelétricas a gás natural. Isso se explica pelas novas tecnologias que estão sendo estudas, tanto a potência quanto à altura das torres tem aumentado, e hoje a maioria dos fabricantes já comercializam turbinas de 2 MW, com 80 m de raio. Já existem protótipos de turbinas de 5 MW, com 130 m de raio.

A instalação de uma usina eólica demanda cerca de 18 meses, o que torna esta modalidade de geração de energia altamente competitiva em relação a outros projetos de produção de energia elétrica, tanto alternativos quanto convencionais, principalmente com relação a área ocupada, a energia eólica demanda menos área por MW (ABEEÓLICA, 2015).

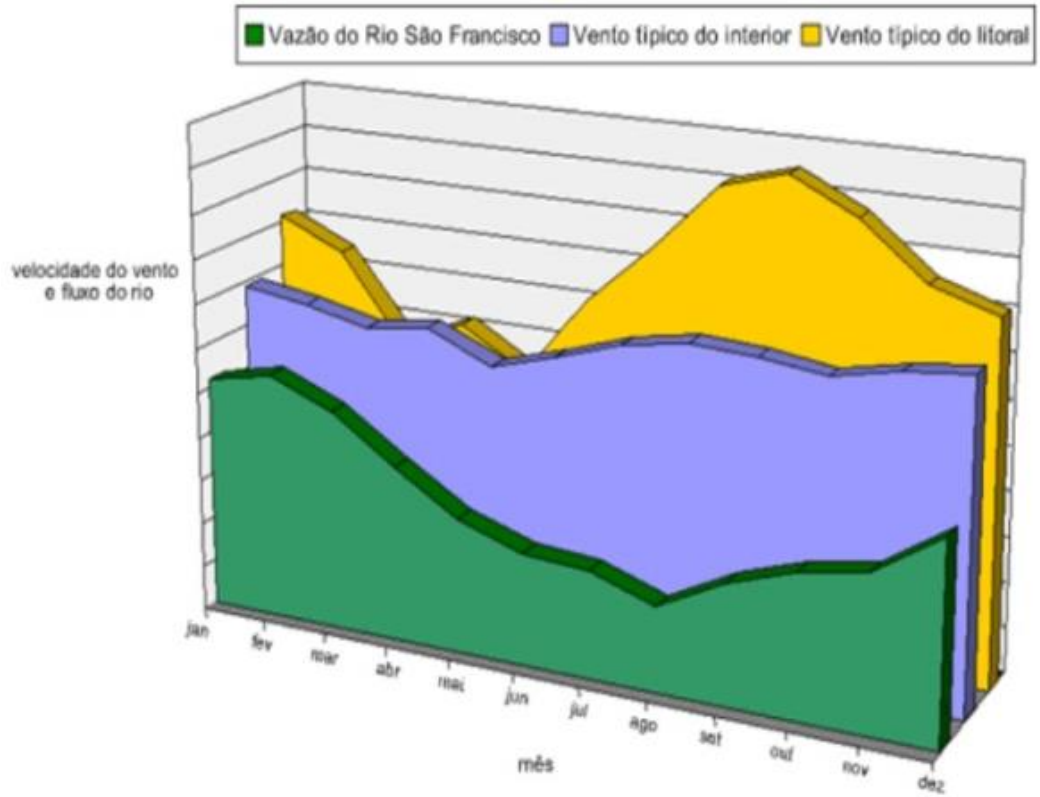
Outro fator importante, como incentivo, é a possibilidade de complementaridade entre a geração hidrelétrica e a geração eólica, visto que o

maior potencial eólico, na região Nordeste, ocorre durante o período de menor disponibilidade hídrica. Bittencourt (2000) e Alves (2001) mostraram que existe a possibilidade de se complementar a oferta de energia elétrica de fonte hídrica através da energia eólica.

A tendência de estabilização sazonal na oferta de energia utilizando a energia eólica como complemento foi comprovado ao se estudar o nível médio de vazão dos rios a algumas usinas da região Nordeste e na região Sul. Nos períodos de seca, quando os reservatórios das barragens estão em seu nível mais baixo, coincidem com o período de maior incidência e intensidade de ventos, isso faz do vento uma grande fonte suplementar à energia gerada pelas hidrelétricas.

Durante este período pode-se preservar as bacias hidrográficas fechando ou minimizando o uso das hidrelétricas. Com isso, há uma complementaridade quase perfeita entre as fontes eólica e hidrelétrica, garantindo o suprimento de energia contínuo e confiável na região durante o ano inteiro. A Figura 14, faz uma comparação entre o fluxo de água do rio São Francisco e o regime de ventos, ou seja, nos períodos de estiagem onde ocorre a baixa dos reservatórios tem-se uma maior incidência dos ventos.

Figura 14 – Comparação entre o fluxo de água do Rio São Francisco e o regime de vento



Fonte: CBEE (2008).

O Nordeste brasileiro é considerado uma das regiões mais bem servidas de ventos do país e responde por 54% do potencial eólico brasileiro. As fontes alternativas de energia surgem como uma solução viável para a atual situação em que o mundo se encontra, com as crises de petróleo, e pela dificuldade de construção de centrais hidrelétricas. O que poderia evitar o uso das termoelétricas, carvão mineral, xisto e usinas nucleares, pois são fontes de energia que causam certa carga sobre o meio ambiente, sociedade e economia.

Segundo Demétrio (2011) os indicadores ambientais calculados dos estados da Região Nordeste podem fornecer informações no estudo de sistemas regionais, em sua avaliação o Nordeste apresenta valores de recursos renováveis superiores aos não renováveis e dos provenientes da economia para o ano de 2007. A fração de recursos renováveis encontrado para o estado do Piauí foi de 61,60%, valor abaixo apenas do Maranhão e Rio Grande do Norte que apresentaram valores de 76,64% e 73,17%, respectivamente.

Nos estados do Maranhão, Piauí, Alagoas, Sergipe e Bahia a energia química da chuva, somada com a energia potencial representam em fluxos de emergia renovável a segunda principal fonte destes estados. Já para os estados do Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba e Pernambuco a segunda fonte de energia renovável é proveniente da energia do vento. A precipitação média, a velocidade do vento e as altitudes médias dos estados são os principais fatores internos que influenciam nos fluxos de vento e chuva (DEMETRIO, 2011).

Do ponto de vista da economia, a geração de energia eólica requer altíssimos investimentos de capital e baixos custos de manutenção. Os custos com a construção de cada aerogerador de alta potência podem alcançar milhões de reais, já os custos com manutenção são baixos e o custo com combustível é zero.

2.3.4 Expansão da energia eólica no Piauí

O estado do Piauí se destaca pela disponibilidade de recursos naturais como as fontes eólica e solar. No entanto, esses recursos ainda são pouco aproveitados pelas empresas geradoras de energia elétrica. A principal fonte geradora de energia está concentrada na usina Hidrelétrica de Boa Esperança com potência instalada de 237 MW (LIRA et al., 2013), somente no ano de 2009 é que foi inaugurada a

primeira usina eólica no estado do Piauí, localizada na praia da Pedra do Sal no município de Parnaíba.

Nesse mesmo ano a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) leiloou a um grupo de investidores com o apoio do governo federal uma nova usina eólica, implantada na cidade de Luís Correia (RIBEIRO et al., 2012).

Segundo Tolmasquim (2011), o investimento girou em torno de R$ 285 milhões para sua implantação, com potência gerada de 75 megawatts (MW) e o valor total estimado com a venda da energia na ordem de R$ 6 milhões ano.

A usina Eólica da Pedra do Sal possui capacidade instalada de 18 MW, que corresponde a 20 aerogeradores do tipo E-44/900kW fabricados pela Wobben/Enercon, que possuem geradores síncronos de baixa velocidade e que operam a velocidade variável, sendo que a linha de transmissão utilizada é de 138 kV conectada à uma subestação de distribuição.

As usinas do Delta do Parnaíba, Porto das Barcas e Porto Salgado possuem capacidade instalada de 30 MW, 20 MW e 20 MW, respectivamente, utilizando turbinas produzidas pela Vestas, que possuem geradores indutivos duplamente alimentados, controle de passo e sistema de regulação de potência ativa e reativa que visa manter o equilíbrio de tensão no ponto de conexão, também conectados a uma Subestação (SE) de distribuição através de uma Linha de Transmissão (LT) de 138 kV.

Com a expansão da energia eólica no estado e o aumento da sua capacidade de geração, os novos complexos serão interligados ao Sistema Nacional (SIN), através de Linha de Transmissão. Dentre os novos complexos eólicos, que estão gerando energia, e os que ainda não estão em fase de operação, pode-se destacar: (i) Complexo Eólico Chapada do Piauí, (considerado com estudo de caso nesta dissertação), (ii) Complexo Eólico Chapada do Piauí II e (iii) Complexo de Caldeirão do Piauí.

2.4 Indicadores de desempenho energético-ambiental

Índices ou indicadores funcionam como um sinal de alarme para manifestar a situação do sistema avaliado, pois são valores estáticos, isto é, dão uma fotografia do momento atual. Sabendo que a natureza e a economia são sistemas dinâmicos,

os índices não captam certos fenômenos que ocorrem no sistema, como a mudança tecnológica ou a adaptabilidade dos sistemas sociais (SICHE et al., 2007).

A dependência energética do mundo não é uma prática sustentável, o que reforça a nossa necessidade urgente de produção de energias alternativas por fontes renováveis que garantam a sustentabilidade na geração de energia. Para isso existem vários indicadores para medir a sustentabilidade ambiental de parques eólicos.

O termo indicador é expressão do latim *indicare*, que significa descobrir, apontar, anunciar, estimar. Nas ciências ambientais, indicador significa um organismo, uma comunidade biológica ou outro parâmetro (físico, químico, social) que serve como medida das condições de um fator ambiental, ou um ecossistema (BITTENCOURT, 2006).

A sustentabilidade é determinada por um conjunto de fatores (econômicos, sociais e ambientais), e todos devem ser contemplados no cálculo do índice de sustentabilidade através dos correspondentes indicadores (BOUNI, 1996).

Os índices mais importantes nesta linha são os de desempenho emergético (BROWN; ULGIATI, 1997). A maioria dos índices e indicadores de sustentabilidade são considerados como informações essenciais para auxiliar na avaliação dos sistemas.

Para Siche et al. (2007) existem muitas ferramentas que calculam índices de sustentabilidade, cada um com suas especificidades: necessidade de diferentes quantidades de dados primários; consideram diferentes fluxos de energia, massa e dinheiro; consideram pesos diferentes entre as abordagens econômica, ambiental e social; possuem diferentes considerações iniciais; mas todas objetivam diagnosticar o desempenho do sistema em estudo e servir como subsídio aos tomadores de decisão.

Os autores se referem a sustentabilidade em diferentes abordagens, mas em todas está intrínseco o conceito de equilíbrio da biosfera e do bem-estar da humanidade. Se nosso desenvolvimento atual não é sustentável, é porque degradamos alguns biomas naturais que forneciam serviços ambientais, essenciais ao nosso bem-estar e que não podem ser substituídos pelo capital humano.

Segundo Ulgiati et al. (2006), de uma maneira geral, todas as ferramentas de avaliação de impactos podem ser divididas em duas principais categorias:

- A montante - Focam na qualidade de recursos utilizados por unidade de produto, fornecendo valiosas informações sobre os custos ambientais indiretos;
- A jusante - Focam nas consequências das emissões dos sistemas, pois estão próximos aos impactos imediatamente identificados sobre o ecossistema local, podendo revelar grandes diferenças entre sistemas com desempenho similar à montante.

Os indicadores energéticos-ambientais constituem uma importante ferramenta para avaliar e descrever a sustentabilidade dos sistemas. O método de análise de energia incorporada (SLESSER, 1974; HERENDEEN, 1998; SZARGUT; MORRIS, 1998), e o método de contabilidade ambiental (ODUM, 1988; ODUM, 1996; BROWN; ULGIATI, 2004) foram usados para analisar o desempenho em escala local e global, respectivamente.

2.4.1 Energia incorporada

Segundo o *International Federal of Institutes for Advanced Studies (IFIAS),* a análise da energia incorporada é o método que determina a energia necessária*,* direta e indireta, para realização de um serviço ou produção de um bem (OLIVEIRA; AGOSTINHO, 2013).

Para Herendeen (1998), o foco da metodologia está nos combustíveis, produtos químicos, fertilizantes, eletricidade e outros insumos que entram nos processos, baseados em energia de petróleo equivalente requeridos para produzir um bem ou serviço.

Na visão de Szargut e Morris (1998), a energia incorporada é aplicada na escala local do sistema analisado a fim de determinar a sua eficiência energética em escala global, levando em consideração todas as fontes de energia comerciais empregadas. Cada entrada do sistema é contabilizada em termos de seu conteúdo de energia fóssil.

Para Agostinho e Siche (2014), a abordagem metodológica utilizada no cálculo da energia líquida de combustíveis é a análise da energia incorporada por meio de seu principal indicador chamado retorno de investimento em energia (EROI). No entanto, os resultados obtidos com este método podem ser considerados

como subestimado, pois não leva em conta os recursos de entrada importantes reconhecidos como essencial para o funcionamento do sistema. Pois os recursos naturais e do trabalho humano são geralmente ignorados do cálculo EROI tradicional.

O EROI é um método utilizado para calcular o retorno de energia à economia e sociedade, comparado à energia utilizada para obter esta energia (HU et al., 2013, HEUN; WIT, 2012). É calculado pela relação entre a saída e a entrada de energia (EROI = E input / Eoutput) de um mesmo processo. (RAUGEI et al., 2012). O EROI oferece uma percepção da energia útil à sociedade obtida através de um recurso, antes do que simplesmente contabilizar a energia total que este recurso oferece (HU et al., 2013). Um processo com EROI > 1.0 indica uma “fonte de energia”. (HEUN; WIT, 2012).

A energia direta é definida como o combustível e a eletricidade utilizada nos processos de produção. Contudo, Raugei et al. (2012) consideram como energia direta a energia primária para obtenção da eletricidade. A energia indireta é a energia usada na economia para produzir os materiais necessários à atividade da cadeia produtiva e para produzir e manter o capital usado para extrair os recursos (CLEVELAND, 2005).

Agostinho (2009) acrescenta que o método da contabilidade de energia incorporada considera o requerimento bruto (direto e indireto) de energia comercial que o sistema utiliza. Esse método fornecendo informações úteis sobre a eficiência energética do sistema em escala global, contabilizando todo o suprimento de energia comercial empregada.

De acordo com Franzese et al. (2009), a análise de energia incorporada objetiva quantificar a disponibilidade e o uso de reservas de combustíveis fósseis, algumas vezes também referida como energia comercial, isto é, combustível fóssil e energia equivalente de fóssil.

Para Ulgiati et al. (2006) a energia incorporada aborda o conceito de eficiência e tem uma relação mais direta com a lógica do mercado, pois se preocupa com o emprego da energia comercial dos recursos, tanto como insumos diretos e indiretos, com a mesma exigência em escala global. Dessa maneira, ela fornece uma boa indicação da intensidade global do sistema em estudo, a partir das reservas dos combustíveis fosseis.

O método da contabilidade de energia incorporada considera o requerimento bruto (direto e indireto) de energia comercial que o sistema utiliza. Essa ferramenta fornece informações úteis sobre a eficiência energética do sistema em escala global, contabilizando todo o suprimento de energia comercial empregada. Para calcular a área de suporte considerando essa abordagem, inicialmente todos os inputs utilizados são quantificados em massa, volume ou energia e multiplicados pelos respectivos valores de intensidade energética. O índice de Energia Incorporada usado nesse estudo foi calculado em MJ/kwh. Alguns trabalhos científicos que utilizam o método da energia incorporada em sistemas de geração de energia e os principais resultados são apresentados no item 2.5 a seguir.

2.4.2 Potencial de aquecimento global

Potencial de Aquecimento Global ou Fator de Aquecimento Global é uma medida de como uma determinada quantidade de gás do efeito estufa (GEE) contribui para o aquecimento global (IPCC, 2013). O índice para cálculo do potencial de aquecimento global é kgCO2eq./Kwh. Representado o efeito do aumento da temperatura em baixa atmosfera, que é normalmente aquecida pela entrada de radiação da atmosfera exterior (a partir do sol).

Segundo o 5º relatório de avaliação do Painel Intergovernamental das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (IPCC), entre 2000 e 2010 as emissões cresceram mais rapidamente do que na década anterior, sobretudo em razão do aumento do uso de carvão para geração de energia. Hoje, a concentração de gases de efeito estufa na atmosfera é a mais alta desde os últimos 800 mil anos. Se nada for feito, a previsão é de que até 2100 a temperatura média global aumente 5ºC (IPCC, 2014).

Segundo estudo feito pelo IPCC, deverão ser instalados aproximadamente 30.000 MW de energia eólica no mundo até 2030. O Brasil possui um imenso potencial eólico, porém ainda não aproveitado (CRESESB, 2011).

Para a categoria de aquecimento global, os fatores de potenciais utilizados, foram emitidos em algum lugar do Planeta para produzir a matéria-prima e energia utilizada pelo parque. Devido a isso, e considerando os conceitos da Análise do Ciclo de Vida, aquelas emissões devem ser contabilizadas na avaliação dos impactos ambientais do parque eólico. Os GWP foram desenvolvidos pelo IPCC

para um grande número de substâncias, são normalmente baseados sobre modelagem e são quantificados para horizontes de tempo de 20, 100 ou 500 anos para certo número de gases causadores de efeito estufa (CO2, CH4, N2O, CFCs, HCFCs, HFCs, etc).

A eliminação do uso de combustíveis fósseis juntamente a outras medidas (como o fim do desmatamento) pode levar a que, em 2100, as emissões globais de gases de efeito estufa sejam quase zeradas. Considerando somente as emissões de geração de eletricidade, contudo, esse número precisa ser alcançado ainda em 2050 (MONZONI, 2009).

Segundo Agostinho (2009), fatores de emissão são considerados como uma ferramenta fundamental no desenvolvimento de inventários de emissões regionais, estaduais e locais para auxiliar nas decisões de gerenciamento de qualidade do ar e desenvolvimento de estratégias do controle de emissões. Esses fatores permitem a estimativa de emissões de várias fontes de poluição do ar.

Oliveira e Agostinho (2013) destacam que o inventário de emissões permite obter a quantidade de gases emitidos pelo sistema, em escala local e escala global, uma vez que fornecem informações de emissões diretas (dentro do sistema) e indiretas (fora do sistema). As emissões indiretas que mesmo produzidas em outros locais, também emitem gases para a atmosfera e contribui para a carga ambiental global.

Aquecimento Global é o efeito do aumento da temperatura em baixa atmosfera, que é normalmente aquecida pela entrada de radiação da atmosfera exterior (a partir do sol). O índice para cálculo do potencial de aquecimento global é kgCO2eq./Kwh.

2.4.3 Contabilidade ambiental em emergia

A metodologia em emergia se propõe a medir todas as contribuições (moeda, massa, energia, informação) em termos equivalentes (emergia). Para tal, faz uso da Teoria de Sistemas, da Termodinâmica, da Biologia e de novos princípios do funcionamento de sistemas abertos que estão sendo propostos, entre eles o da hierarquia universal de energia, o da auto-organização e estabelecimento do maior fluxo possível de energia disponível no sistema.

A emergia é utilizada como uma alternativa para avaliar o grau de sustentabilidade, pois considera o impacto das atividades econômicas dentro dos ecossistemas naturais e permite determinar o grau de uso de recursos renováveis e não renováveis das atividades produtivas.

Na economia convencional, o preço de um produto corresponde aproximadamente à somatória das despesas realizadas com insumos, mão-de-obra e outros tipos de serviços, mais a margem de lucro desejada. Em certa forma, o preço econômico mede o trabalho humano agregado, porém, não leva em conta a contribuição da natureza na formação dos insumos utilizados, o custo das externalidades negativas no sistema regional, nem as despesas resultantes da exclusão social gerada pelo empreendimento e pagas pela sociedade local (ORTEGA, 2002a; 2000b; 2003).

A emergia se propõe medir todas as contribuições (moeda, massa, energia, informação) em termos equivalentes. Para tal, faz uso da Teoria de Sistemas, da Termodinâmica, da Biologia e de novos princípios do funcionamento de sistemas abertos que estão sendo propostos, entre eles o da hierarquia universal de energia e o da auto-organização (ODUM, 1996).

As diferentes contribuições de energia para gerar um produto ou serviço são expressas em uma base comum (em joules de energia solar, seJ) permitindo sua contabilidade. O desempenho do sistema e a sua interação com o meio ambiente é avaliado com a contabilização dos fluxos renováveis (R), não renováveis (N) e provenientes da economia (F) empregados para sua implantação e operação.

De acordo com Odum (1996), Emergia e Transformidade podem ser definidas como:

- Emergia - é a quantidade de energia solar necessária, de forma direta ou indireta, para obter um produto (bem ou serviço) num determinado processo. (Unidade: sej).
- Transformidade - é a quantidade de energia solar empregada, diretamente e/ou indiretamente, na obtenção de um joule de um determinado produto (bem ou serviço) e sua Unidade é seJ/J.

Transformidade solar para uma ampla variedade de produtos e serviços podem ser obtidos a partir de estudos anteriores para facilitar a análise de emergia.

No entanto, a transformidade de um objeto da mesma categoria pode ter valores diferentes devido ao processo utilizado em sua obtenção e localização geográfica.

Os índices de emergia usados para esse estudo são: Razão de Rendimento em Emergia (EYR), Razão de Carga Ambiental (ELR), Razão de Investimento (EIR), Renovabilidade (%R), e Índice de Sustentabilidade Ambiental (ESI).

Neste sentido, a contabilidade ambiental em emergia (ODUM, 1996) parece ser uma alternativa poderosa para estimar a energia líquida de combustíveis, no qual seu principal indicador para esta finalidade é a razão de rendimento emergia (EYR). Este indicador mostra o quanto de emergia da natureza (considerado livre de mercado) tornou-se disponível para o desenvolvimento da sociedade, investindo uma certa quantidade de emergia da economia. De acordo com Odum (1996), quando uma fonte de energia oferece mais emergia do que é utilizado para obtê-lo, então a economia social é abundante com altos padrões de vida.

2.5 Impactos sociais, econômicos, e energéticos-ambientais da energia eólica

A geração de energia elétrica por meio de turbinas eólicas constitui uma alternativa para diversos níveis de demanda. As pequenas centrais podem suprir pequenas localidades distantes da rede, contribuindo para o processo de universalização do atendimento. Quanto às centrais de grande porte, estas têm potencial para atender uma significativa parcela do Sistema Interligado Nacional (SIN) com importantes ganhos: contribuindo para a redução da emissão oriundas das usinas térmicas, de poluentes atmosféricos; diminuindo a necessidade da construção de grandes reservatórios; e reduzindo o risco gerado pela sazonalidade hidrológica.

Goldemberg e Lucon (2011) demonstram que as fontes renováveis de energia são, também, causadoras de diversos impactos ambientais (Tabela 1). Na visão dos autores, os impactos ambientais decorrentes da utilização de fontes renováveis de energia devem ser devidamente observados ao longo de seus ciclos de vida e balanços energéticos, visto que a natureza e magnitude destes impactos estão relacionadas à dinâmica e condicionantes específicas da localidade onde são implantados os empreendimentos geradores ou explorados os recursos energéticos.

Tabela 1 – Impactos ambientais causados por fontes renováveis de energia

Fontes de energia	Causa do impacto	Impacto ambiental
Todas	Uso de combustíveis fósseis durante o ciclo de vida	Poluição, aquecimento global
Eólica	Ruído dos equipamentos Instalação dos sistemas Funcionamento das pás	Incômodos Poluição estética Morte de pássaros
Solar	Uso de cobre nos coletores e chumbo nas baterias	Acúmulo de resíduos tóxicos no ambiente
Pequenas Hidrelétricas	Formação de reservatórios	Interferência na fauna e na flora local, conflitos com o turismo

Fonte: Adaptado de Goldemberg e Lucon (2001, p.178).

O abandono da construção de grandes reservatórios que acompanhassem o aumento de geração tornou o sistema vulnerável a variações de clima e precipitação hídrica, o que levou a uma “carbonização” do sistema com usinas térmicas representando cerca de 30% da energia produzida.

Do ponto de vista ecológico, as hidrelétricas causam impactos no meio ambiente devido à construção das represas, que provocam alagamento de grandes áreas de matas, interferem no fluxo de rios, prejudicam a fauna e a flora, e interferem na ocupação humana. A vegetação encoberta pelo lago, entra em decomposição e libera gás metano, um dos responsáveis pelo efeito estufa.

As usinas termelétricas geram energia a partir da queima de combustíveis fósseis, diesel ou carvão, e são importantes fontes de gás carbônico e óxidos de nitrogênio e de enxofre, que acentuam o efeito estufa e provocam as chuvas ácidas. Segundo Goldemberg (2003), a obtenção de eletricidade por meio de combustíveis fósseis é a principal fonte de óxidos de enxofre (SOx, SO2), óxidos de nitrogênio (NOx, NO e NO2), dióxido de carbono (CO2), metano (CH4), e particulados (entre eles o chumbo Pb) durante sua operação.

A energia eólica é vista como uma contribuição para a redução de emissão de gases de efeito estufa. Os impactos ambientais gerados pela energia eólica estão relacionados principalmente a ruídos, ao impacto visual e ao impacto sobre a fauna.

Guzzi et al. (2015) fez um estudo sobre o impacto dos parques eólicos sobre as aves, caracterizando a composição e dinâmica ecológica das espécies de aves residentes e migratórias presentes na área da Usina Eólica da Pedra do Sal, em

Parnaíba, Estado do Piauí. Através do método ponto de escuta, em cada base dos aerogeradores. Foram registrados 6.843 contatos de aves pertencentes a 67 espécies distribuídas em 22 famílias e 13 ordens. A maioria das aves identificadas é de ambiente aquático e durante o desenvolvimento do estudo não foram registradas colisões entre as aves e os aerogeradores.

Custódio (2009), observa ainda que, dentre outros fatores, os efeitos indesejáveis provocados pelos parques eólicos são menos impactantes se comparados a outros empreendimentos de geração de eletricidade.

A quantificação dos impactos provenientes de energia eólica em parte pode ser avaliada pela quantidade de CO2 não emitido na atmosfera. Por exemplo, uma turbina de 600KW, dependendo do regime de vento e do fator de capacidade, pode evitar a emissão entre 20.000 e 36.000 toneladas de CO2 equivalentes comparada à geração convencional das hidrelétricas, durante sua vida útil estimada em 20 anos (TOLMASQUIM, 2004).

Para Junfeng et al. (2010), as usinas de energia eólica desempenham um papel importante para o desenvolvimento econômico, redução da pobreza, controle da poluição atmosférica e redução de emissão de gases de efeito estufa. Isso está aliado à busca pelo desenvolvimento sustentável.

Diferentes trabalhos que avaliam a desempenho energético-ambiental dos mais variados sistemas de produção, podem ser encontrados na literatura. Especificamente para a geração de energia são encontrados para os Combustíveis fósseis (ODUM et al., 1976; BROWN et al., 1993; ODUM, 1996; BARGIGLI et al., 2004; BASTIANONI et al., 2005; 2009), eletricidade renovável e não-renovável (ODUM et al. 1983., BROWN; ULGIATI, 2001; ULGIATI; BROWN, 2001; PENG et al. 2008; SILVA et al., 2010), represas hidrelétricas (BROWN; McCLANAHAN, 1992; WITTMANN, 2010; TASSINARI, 2014) e biocombustíveis (ODUM, 1980a; ODUM; ODUM, 1984; CARRARETO et al., 2004; DONG et al., 2008; FELIX; TILLEY, 2009; FRANZESE et al., 2009, entre outros).

Brown e Ulgiati (2002; 2004) estudaram seis usinas de energia elétrica na Itália por meio de contabilidade ambiental em emergia, como um complemento da abordagem para outras metodologias mais amplamente utilizadas. Índices de emergia apontam que a geração de energia eólica e hidrelétrica têm os maiores valores para o índice razão de rendimento em emergia (EYR), comparados com outras fontes. Um índice calculado de carga ambiental (ELR), indicou

quantitativamente que a eletricidade gerada nas usinas, eólica, geotérmica e hidrelétrica tiveram o menor impacto ambiental. Finalmente, os autores apontam que as plantas eólicas e hidrelétricas possuem maior índice de sustentabilidade (ESI), principalmente quando visto de forma agregada (econômico e ecológico). Os autores acrescentam ainda, que esses indicadores poderiam ser usados para monitorar as alterações de desempenho e tecnologia, e auxiliar aos tomadores de decisão quanto às melhorias em algumas ou em todas as etapas do processo de conversão.

A geração de CO2 foi contabilizada a fim de comparar as fontes renováveis e não renováveis de energia. Os sistemas de produção incluem plantas usando energia não renovável (gás, petróleo, plantas térmicas a carvão) e as assim chamadas fontes renováveis (geotérmicas, hidroelétricas e eólicas). Plantas de energia renovável foram caracterizadas por altos retornos do investimento, enquanto as fósseis exibiram média de eficiência entre 25 e 36%. O valor do EYR variou desde 7,6 para a geração hidrelétrica até 4,2 para a térmica a petróleo. As plantas de energia renovável requereram a maior entrada do meio ambiente por unidade de saída, enquanto as plantas de combustíveis fósseis requereram menos recursos ambientais para resfriamento e apoio para a queima do combustível. A carga ambiental foi maior para as plantas térmicas. Usando o índice de sustentabilidade em emergia, as fontes eólica, hidrelétrica e geotérmica, apresentaram maior sustentabilidade comparadas com plantas térmicas (BROWN e ULGIATI, 2002; 2004).

Yang e Chen (2013) estudaram a avaliação integrada da energia incorporada, emissão de gases de efeito estufa (GEE) e desempenho econômico de um sistema de geração de energia eólica na China. O estudo foi realizado usando indicadores para energia e emissões de GEE e custo por unidade. Os resultados mostram que a eficácia de emissões de GEE por saída de energia do sistema são 0,034MJ /J e 0,002kgCO2-eq / MJ, respectivamente. Comparando com outro sistema de geração de energia eólica é mais competitivo em termos de poupança de energia e redução de emissões GEE. O estudo acrescenta ainda que, se a reciclagem das turbinas de ventos, na fase de desmontagem forem consideradas 46,7% seria economizado com uma taxa de reciclagem de 0,467. A viabilidade economia de 5,722 kgCO2-eq/$ foi realizada a partir da analises de cenários e das perspectivas dos investidores e do governo.

Kubiszewski et al. (2010) estudaram o retorno líquido de energia para geração de eletricidade por turbinas eólicas. Retorno de energia sobre o investimento (EROI) é a razão da energia entregue aos custos de energia. Foram examinadas 119 turbinas eólicas de 50 análises diferentes, variando na data de publicação de 1977 a 2007. O resultado para o EROI em função da potência. Em média de todos os estudos (operacionais e conceituais), de 25,2. O EROI médio apenas para os estudos operacionais é de 19,8. Isso coloca o vento em uma posição favorável em relação aos combustíveis fósseis, nuclear e tecnologias de geração de energia solar em termos de EROI.

Huang et al. (2016) avaliou o impacto ambiental e o benefício energético dos sistemas de energia eólica offshore utilizando a análise do ciclo de vida (ACV) e a análise de energia líquida. O impacto ambiental dos sistemas de energia eólica offshore baseia-se principalmente no metal ferroso, que é usado para instalar as fundações, torres e nacelles. As categorias de impacto com maior relevância foram os combustíveis fósseis e os inorgânicos respiratórios. Este estudo supôs que o ciclo de vida de um sistema de energia eólica offshore tem quatro estágios (produção, instalação, operação e manutenção, e fim de vida). Dois cenários foram examinados, e a principal diferença entre os cenários foi que o cenário 2 incluiu uma subestação offshore. O impacto ambiental global no Cenário 2 foi superior ao do Cenário 1 em cerca de 10%. A análise de energia líquida neste estudo incluiu as avaliações da demanda de energia acumulada (CED), retorno de energia sobre o investimento (EROI) e tempo de retorno de energia (EPT). Para os cenários 1 e 2, o CED foi de 0,192 e 0,216 MJ / kWh, o EROI foi de 18,7 e 16,7 e o EPT de 12,8 e 14,4 meses, respectivamente. Além disso, quando se considerou a reciclagem de resíduos, cada cenário produziu um impacto ambiental menor de 25%, exigência energética 30% menor e 4 meses menor de EPT. Segundo os autores na avaliação do impacto ambiental e os benefícios energéticos da energia eólica offshore, mostra que a instalação de uma subestação offshore levaria a um maior impacto ambiental, e o maior impacto ambiental foi atribuído ao uso de metais ferrosos. O retorno de energia sobre o investimento pode chegar a 27 e a reciclagem dos resíduos pode reduzir em grande parte a entrada de energia.

Riposo (2008) aplicou a analise em emergia em um parque eólico em Nova York, USA, com 195 torres, 80 m de altura, com potência instalada de 322 MW e capacidade nominal de 1,65MW por turbina. Para o índice de retorno de

investimento em energia (EROI), obteve uma taxa de retorno de 23,1, e para a razão de rendimento emergia (EIR), foi calculado dividindo-se o rendimento de emergia associada com a produção de eletricidade pelas entradas de emergia para o sistema, foi de (EIR = 8,47). Esse índice foi usado para comparar com outras fontes disponíveis na literatura.

Chen et al. (2011) avaliaram o grau de renovabilidade da energia eólica na China com um estudo de caso do custo de energia não renovável e emissão de gases de efeito estufa para um parque eólico. A conta para o ciclo de vida da fabricação e transporte de componentes, instalação, operação, manutenção, desmontagem e descarte baseia-se nas intensidades de incorporação de uso de energia não renovável e emissão de gases de efeito estufa por uma análise de input-output ambiental ampliada para commodities típicas da economia chinesa. O custo energético não renovável e as emissões de gases com efeito de estufa são estimados, respectivamente, em 0,047 MJ e 0,002 kg CO2-eq para 1 MJ de eletricidade, respectivamente, 56 e 108 vezes menos do que as plantas de carvão na China. Considerando a predominância da energia de carvão, a poupança de energia não renovável é estimada em 1,22E + 10 MJ durante o período de funcionamento de 20 anos, enquanto a redução das emissões de gases de efeito estufa é de 1,03E + 09 kg CO2-eq pelo parque eólico estudado. Em comparação com o estudo dos parques eólicos em todo o mundo, a intensidade dos custos de energia não renováveis de turbinas eólicas chinesas de 1,25 MW está na faixa mediana e a intensidade de emissão de GEE está no extremo inferior da escala. Os resultados têm implicações essenciais para a formulação de políticas que apoiam uma maior disseminação da tecnologia de energia eólica na China.

Yang e Chen (2013) estudaram a sustentabilidade de um parque eólico em Guangxi, na China, comparando os insumos econômicos no sistema de geração de energia eólica. A comparação dos resultados com dados existentes de outras fontes renováveis revela que a transformidade solar para energia eólica é menor, em comparação a outras tecnologias de geração de eletricidade, o que indica que ele tem uma maior eficiência termodinâmica do ponto de vista da biosfera. Para avaliar o desempenho relativo e a sustentabilidade do sistema, os autores compararam diferentes tipos de sistemas de energias renováveis com índices de emergia, incluindo a razão de rendimento (EYR=1,25), razão de carga ambiental (ELR=4,00), taxa de investimento em emergia (EIR=4,00), percentual de renovabilidade

(%R=20%) e índices de sustentabilidade (ESI=0,31). Os resultados mostraram que a energia eólica tem um melhor nível de renovabilidade e maior eficiência, com o menor impacto ambiental comparado com as outras fontes do estudo. Para os autores, os resultados da análise em emergia pode servir como indicadores ecológicos para o desempenho ambiental de parques eólicos.

Campbell (2014) estudou métodos não convencionais de produção de combustíveis fósseis avaliados. Os resultados mostram um benefício líquido na análise de energia. Este benefício é menor que o benefício fornecido através da produção de combustíveis fósseis convencionais já avaliados anteriormente. Análise do retorno de investimento em energia (EROI) mostra uma tendência de queda na contribuição líquida de combustíveis fósseis ao longo do tempo e é muito provável que a análise de emergia mostrará resultados semelhantes, mas isso ainda deve ser confirmado. Campbell (2014) ressalta ainda que, embora tenha havido algumas análises em emergia de fontes alternativas renováveis, cálculos atualizados devem ser feitos para comparar às reservas decrescentes de combustíveis fósseis, em um esforço para identificar situações em que a alternativa renovável é preferencial ao uso dos combustíveis fósseis.

Tassinari (2014) usou a emergia para fazer uma avaliação da geração de hidroeletricidade em usinas convencionais e modelo fio d`água. Foi realizado cálculo, em joules de energia solar (seJ) dos recursos globais aplicados e classificados em renováveis (R), não renováveis (N) e provenientes da economia (F). Valores de EYR maiores que 5 e valores de ELR menores que 1, indicando que os empreendimentos possuem sustentabilidade de longo prazo, com (ESI=7,43) e (ELR=0.79) contribuindo para a economia com baixa carga ambiental. A contabilidade ambiental em emergia contribuiu para o cálculo dos índices usados numa base científica, no entanto o autor ressalta que o resultado dessa comparação não pode ser analisado de forma isolada, deve ser levado em conta junto com outros fatores decisivos para a escolha, como a pluviosidade do local pretendido para a nova instalação.

Yang e Chen (2016) utilizaram a análise de emergia para quantificar o ambiente, renovabilidade, eficiência econômica e sustentabilidade de um sistema de energia eólica típico, considerando o ciclo de vida, desde a extração e processamento de matérias-primas e recursos para o produto final (eletricidade) através de material de transporte, construção e operação. Caminhos possíveis para

alcançar sustentabilidade no desenvolvimento da cadeia de fornecimento de energia eólica também foram analisados com base na análise de cenários. Os resultados mostram que a energia eólica é um meio promissor de substituição de energia à base de combustíveis fósseis tradicionais nos sistemas de geração, com a menor transformidade de 4,49 x 10^4sej / J, menor razão de carga ambiental de (ELR=5,84), e menor intensidade de emissão de gases com efeito de 0,56 kg / kWh. Uma análise de sensibilidade foi feita através da criação de cenários a partir das perspectivas de materiais recicláveis de plástico e desenvolvimento técnico. Os resultados sugerem que o uso de novos materiais de menor intensidade energética ou materiais reciclados na fabricação de turbinas eólicas e materiais de construção a montante são as medidas mais eficazes.

Especificamente para este trabalho, EYR avalia se a emergia investida com o trabalho humano, informação, aço, concreto, diesel e vários outros insumos necessários para gerar eletricidade a partir das turbinas de vento apresentam resultados em maior quantidade de emergia à disposição da sociedade.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de estudo

A área escolhida para esse estudo de caso foi o parque eólico chapada do Piauí (coordenadas geográficas: latitude 7º 32’ 18, 047” S; longitude 40º 41’ 56,446” O; altitude 783,55 m), localizado no município de Marcolândia, situado a 550 km da capital Teresina, estado do Piauí.

O acesso a área do complexo eólico pode ser realizado através da rodovia federal BR-316. Saindo de Teresina segue-se através da rodovia federal BR-316; na sede da cidade de Marcolândia, toma-se a PI-142 através da qual se tem acesso a estrada que dar acesso a área do empreendimento. A área do projeto apresenta uma morfologia predominantemente plana, inserida no ambiente geomorfológico da Chapada do Araripe (Figura 15).

Figura 15 – Mapa de localização do Parque eólico Chapada do Piauí

Fonte: Banco de dados Georreferenciado da ANEEL (2016).

O complexo eólico apresenta uma área total de 2.855,00 ha, com 115 aerogeradores instalados. Para os parques eólicos ventos de Santa Joana IX, X, XI,

XIII estão projetados para uma potência total instalada de 29.6 MW cada, através da operação de 16 aerogeradores GE 1.85 - 82.5. Os parques eólicos ventos de Santa Joana XII, XV e XVI estão projetados para uma capacidade total instalada de 28.9 MW cada, através da operação de 17 aerogeradores GE 1.7 - 100. Apresentando uma capacidade de 1.7MW de potencial nominal e capacidade total instalada de 503.70 GWh/ano de energia elétrica considerando 50% de eficiência de conversão (Tabela 2). A escolha do parque ocorreu devido ao fato de ser o primeiro a entrar em operação na região (julho/2015) no complexo da chapada do Piauí, o que facilitou a obtenção de dados primários.

Tabela 2 – Principais características do complexo de energia eólica Chapada do Piauí (195MW)[a]

Descrição	Ocupação de terras	turbinas de vento	A eletricidade gerada [b]
Fazendas de vento	(ha)	(unidades)	(GWh / ano)
Ventos de Santa Joana IX	278	16	70.08
Ventos de Santa Joana X	353	16	70.08
Ventos de Santa Joana XI	187	16	70.08
Ventos de Santa Joana XII	593	17	74.46
Ventos de Santa Joana XIII	245	16	70.08
Ventos de Santa Joana XV	489	17	74.46
Ventos de Santa Joana XVI	443	17	74.46
Total:	2588	115	503.70

[a] Modelo GE 1.7-100MW hh80m com 1.7MW de potência nominal.
[b] Média de eletricidade gerada por cada turbina de vento = 1 MWh / h ou 8,76 GWh / ano. Considerando 50% para a eficiência de conversão, cada turbina fornece cerca de 4,38 GWh / ano de energia elétrica.
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2 Fonte de dados

Os parques eólicos estudados dependem de diferentes indústrias que estão focados em aspectos específicos sobre a produção de turbinas eólicas (rotor, nacelle e torre), exigindo diferentes materiais e níveis tecnológicos para sua produção. Assim, os dados primários foram obtidos a partir de um número de diferentes fontes (incluindo Yang e Chen (2013) e os dados obtidos *in loco*). Todos os dados primários coletados foram disponibilizados e validados por engenheiros que trabalham na implantação do projeto eólico avaliado e verificado no site dos fabricantes e fornecedores da indústria de turbinas eólicas no Brasil.

Os aerogeradores são constituídos de três componentes: Torre, Nacele e Rotor. A Nacele é o compartimento que abriga os componentes essenciais para a geração de energia (gerador, caixa de velocidade e sistema de transmissão), o Rotor é acoplado na Nacele (peso de 71 toneladas) junto com as três Pás, cada pá

medindo 47,5 m de comprimento, pesando de 8,5 tonelada; são feitas com vibra de vidro e material de resina. O cubo da torre (97 toneladas) é feito de aço e mede 80m; com altura total do diâmetro do rotor de =~130m). Todas as especificações de materiais e serviços constam na memória de cálculo dos artigos apresentados nos próximos itens. Um modelo do aerogerador e da nacele são apresentados nas (Figuras 16 e 17), respectivamente.

Figura 16 – Modelo do aerogerador

Fonte: Acervo do autor.

Figura 17 – Nacele em detalhe

Fonte: Acervo do autor.

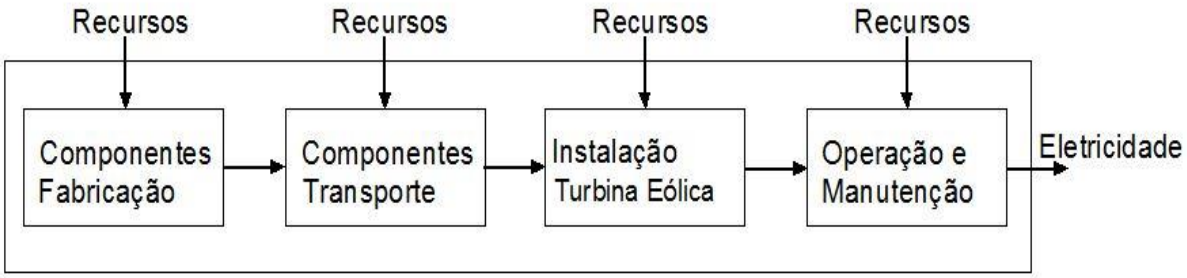
O Complexo Eólico Chapada do Piauí possui turbinas com geradores de indução duplamente alimentados cuja tensão de saída é 690 V. Com o objetivo de minimizar perdas na transmissão a tensão de saída é elevada para 34,5 kV por transformadores instalados próximos a cada turbina. Após a elevação do nível de tensão a energia gerada vai para um sistema coletor que transporta toda a energia produzida pelas turbinas para uma subestação elevadora e posteriormente para o Sistema Interligado Nacional. O SIN é um sistema de coordenação e controle, formado pelas empresas, que congrega o sistema de produção e transmissão de energia elétrica do Brasil.

O Complexo estudado ainda possuirá duas outras subestações (SE), a SE Chapada I e a SE Chapada II, sendo que 6 dos 7 primeiros parques eólicos da (Tabela 2) estão conectados a SE Chapada I e o último parque está conectado a SE Chapada II. A conexão desse complexo eólico ao SIN será feita por meio de duas linhas de transmissão (LT), a LT de 230 kV que irá da SE Chapada I para a SE Picos, e a LT de 230 kV que irá da SE Chapada II para a Subestação Seccionadora que ainda será construída. Cabe ressaltar que os custos com a implantação de subestações e das linhas de transmissão da energia não fazem parte do escopo deste trabalho, e portanto, não foram contabilizados nesse estudo.

Os limites do sistema definidos neste trabalho incluem (i) turbinas de vento - componentes de fabricação por diferentes fornecedores, (ii) transporte dos materiais e equipamentos das indústrias produtoras até os parques eólicos (porta a porta), (iii) instalação, operação e manutenção dos aerogeradores (Figura 18).

Os processos pós-uso também não estão incluídos neste momento devido à falta de informação disponível. Transporte é um subsistema especial, pois cada componente é fabricado em uma indústria localizada em diferentes regiões do território brasileiro. Por exemplo, alguns componentes de turbinas eólicas são produzidos a 2000 km de distância do parque eólico estudado, enquanto outros são produzidos regionalmente. Em relação à análise temporal, considera-se a vida útil de 20 anos para os aerogeradores como considerado por Yang e Chen (2013); Riposo (2008), assim todos os recursos necessários na operação e manutenção dos aerogeradores durante este tempo são contabilizados.

Figura 18 – Fronteiras do sistema avaliado neste trabalho (tempo: 20 anos vida útil)



Fonte: Elaborada pelo autor.

3.3 Análise de energia incorporada

As abordagens de energia incorporada são centradas no conceito fundamental de eficiência, e tem relação direta com a lógica do mercado. A análise Energética inclui todas as entradas de energia que convergem para o sistema, limitando-se a escala local de análise. Pode ser considerada como uma ferramenta valiosa para comparar a eficiência termodinâmica inerente do processo em estudo, e sugerir possíveis melhorias tecnológicas (ULGIATI et al., 2006).

O Método da análise da energia incorporada (SLESSER, 1974; HERENDEEN, 1998) é calculada pela soma de todas as entradas no sistema multiplicada pelos seus respectivos fatores de intensidade energética, um tipo de relação entre a energia que sai pela energia que entra.

Segundo Slesser (1974), análise de energia incorporada tem como objetivo avaliar a necessidade de energia bruta direta e indireta pelo sistema. Ele oferece um indicador útil sobre a eficiência energética do bem ou serviço produzido sob uma visão de larga escala, isto é, que considera toda a energia "comercial" incorporada. Energia comercial aqui está relacionada com a energia fóssil.

Fatores de intensidade de energia que representam toda a energia fóssil anteriormente exigido para disponibilizar um bem ou serviço (normalmente em unidades de MJ / produto) são utilizados para converter todas as entradas no sistema de matéria e energia em energia fóssil equivalente. Neste trabalho, foram utilizados os fatores de intensidade de energia fornecidos pelo Ecoinvent Dataset v.3.1-2014 (www.ecoinvent.ch). A soma de toda energia fóssil equivalente de cada entrada mostra a quantidade de energia bruta necessária para transformar energia eólica em elétrica, em unidades de MJ / kWh.

Para o cálculo da energia incorporada foram seguidos seguintes passos:

1. Todas as entradas do sistema foram contabilizadas em unidades de massa ou energia consumida anualmente (fluxos);
2. Cada fluxo foi multiplicado pelo seu respectivo valor de intensidade de energia incorporada (em unidades de MJ/kg ou MJ/J) obtido do Ecoinvent;
3. Com o resultado tem-se a demanda total de energia comercial pelo sistema, nas unidades de MJ/kWh de energia produzida (Tabela 3).

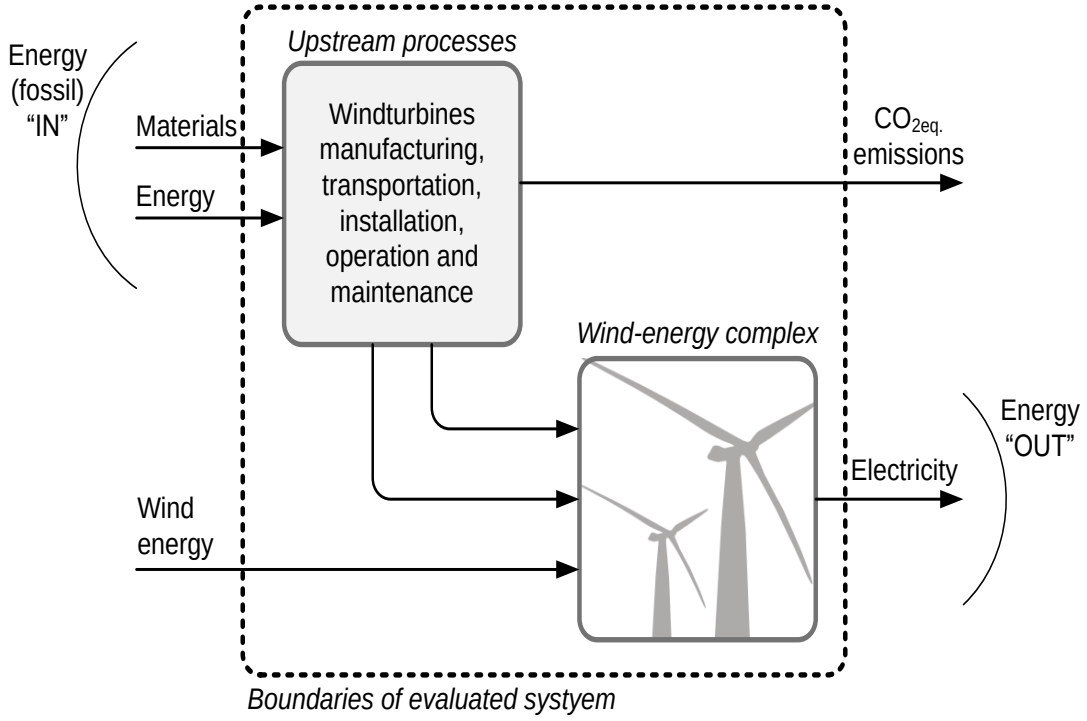
Tabela 3 – Exemplo de tabela de uma análise de energia incorporada

Item	Valor	Unidade[a]/ano	Energia Incorporada MJ/unidade	Ref. Para MJ/ano	Energia Comercial Total Incorporada (MJ)
Item 1					
Item 2					
Item 3					
					Energia Total

[a] Unidade pode ser em massa/volume ou energia
Fonte: Elaborada pelo autor.

O sistema que demanda menor quantidade de energia por unidade funcional é considerado mais eficiente. A figura 19 mostra a estrutura do sistema avaliados representando as entradas que foram contabilizadas.

Figura 19 – Fronteiras do Sistema analisado no cálculo da energia incorporadora



Fonte: Autor.

3.4 Potencial de aquecimento global

Nesta abordagem são contabilizadas as emissões indiretas (causadas a montante) e as emissões diretas (causadas a jusante) do sistema em estudo. Para a estimativa das emissões indiretas, o procedimento de cálculo consiste basicamente em utilizar fatores de intensidade de emissão de CO2 (kgCO2eq./kg) e multiplicá-los pelas respectivas quantidades de recursos que entram no sistema estudado.

O Potencial de Aquecimento Global considerando que o complexo de energia eólica avaliado não usa de combustível fóssil ou mesmo qualquer fonte de energia baseada em carbono localmente para gerar eletricidade, as emissões estão localizadas longe de onde os parques eólicos estão instalados. Esta abordagem "a montante" tem em conta todas as emissões indiretas liberados para disponibilizar todos os materiais e energia utilizada para fabricação de componentes, transporte, instalação, operação e manutenção.

Os fatores de intensidade utilizados nesse estudo foram fornecidos pelo Ecoinvent Dataset v.3.1-2014 (www.ecoinvent.ch), que reflete a quantidade de CO2 equivalente liberado para atmosfera para obter determinado input que o sistema utiliza, esses fatores de intensidade representam todas as emissões que podem contribuir para o potencial de aquecimento global. Além disso, todas as emissões devido ao diesel queimado na fase de transporte também são contabilizadas, considerando os fatores de emissão fornecidos por Sheehan et al. (1998) disponíveis no Apêndice B do 2º. artigo, e os seguintes fatores equivalentes de CO2, publicados pela Jensen et al. (1997) CO2=1; CH4=62; N2O=290; CO=1,6; Hidrocarbonetos = 3,1. Ambas as fontes de emissão (indiretas e que ocorreram durante a fase de transporte), quando adicionados fornece o potencial de aquecimento global na transformação da energia eólica em energia elétrica, em unidades de kgCO2eq./kWh.

O Inventário de Emissões Gasosas é geralmente utilizado em estudos de impactos à montante. Considerando que, na produção da energia eólica, o CO2-equivalente diretamente liberado para a atmosfera possui baixos valores quando comparados com as emissões indiretas; esse estudo considera ambos.

Toda a energia incorporada pelo sistema foi considerada (Tabela 4). Este trabalho considera a abordagem LCA (1997) e seus fatores de equivalência para estimar as categorias de impacto aquecimento global (expresso como CO2-equivalente) e acidificação (expresso como SO2-equivalente).

As incertezas não foram abordadas neste trabalho, pois valores médios de dados primários para entrada de cada sistema foram considerados ao invés de faixas de valores, o que implica que as conclusões deste trabalho podem ser utilizadas exclusivamente para discutir sobre o sistema aqui avaliado e privilegiando os objetivos primários previamente estabelecidos.

Tabela 4 – Exemplo de Tabela de avaliação de emissões para o Potencial de Aquecimento global

Item	**Valor**	**Unidade[a]/ano**	**GWP $kgCO_2eq.$ /unidade**	**$kgCO_2eq./ano$**
Item 1				
Item 2				
Item 3				
				Energia Total:

[a] Unidade pode ser em massa/volume ou energia
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.5 Contabilidade ambiental em emergia

O método da síntese em emergia pode fornecer uma visão integrada da sustentabilidade de um sistema a partir de diferentes perspectivas. Para Brown e Ulgiati (2002), a emergia é a memória da energia ou a energia total incorporada em produto ou serviço; da análise em emergia resultam indicadores que refletem tanto a contribuição do sistema econômico com a do meio ambiente.

Segundo Ulgiati e Brown (2014), para que fluxos com unidades distintas (energia, massa e monetário) sejam convertidos em uma base única comum (seJ), devem ser aplicados os fatores de conversão ou coeficientes de intensidade de emergia. Estes coeficientes são genericamente denominados como Valores Unitários de Emergia (Unit Emergy Value, UEV), onde os mais utilizados são:

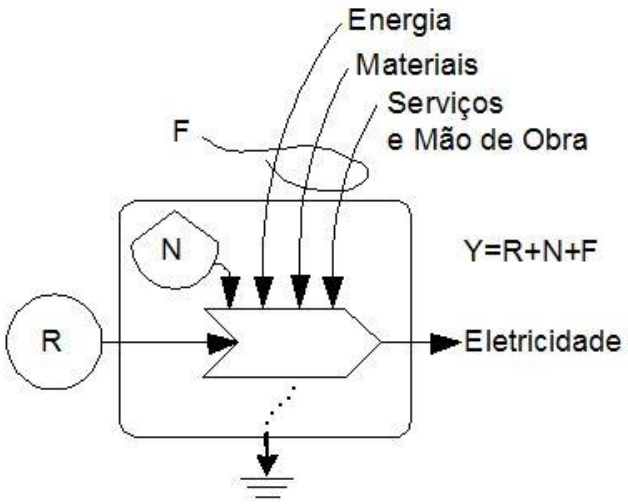
a) Transformidade solar: a emergia solar requerida para fazer 1 (um) Joule de um produto ou serviço. Sua unidade é o emjoule solar por Joule (seJ/J) (ODUM, 1996).
b) Emergia específica: a quantidade de emergia requerida para fazer uma unidade de massa de um produto ou serviço. Usualmente, a unidade da emergia específica é seJ/g (BROWN; ULGIATI, 2004).
c) Emergia por unidade monetária (EMR): a quantidade de emergia requerida para gerar uma unidade econômica. A unidade da razão emergia por dinheiro é seJ/$ (geralmente expresso em dólar, USD (BROWN; ULGIATI, 2004).

3.5.1 Etapas para avaliação em emergia

Neste trabalho a aplicação da contabilidade ambiental em emergia é baseada nos modelos apresentados por Odum (1996;1983), Ulgiati e Brown (1998) e Brown e Ulgiati (2004). Basicamente, o procedimento de avaliação de emergia de sistema de parque eólico é composto das seguintes etapas:

Primeira etapa: Elaboração do diagrama de energia para o sistema estudado. A Figura 20, mostra um diagrama genérico dos fluxos agregados. Uma visão geral de avaliação começa com a diagramação para identificar componentes, processos e fluxos de energia característicos do sistema avaliado. Para desenvolver esse diagrama, Odum (1996) criou uma linguagem de símbolos específicos que podem ser visualizados no Anexo I.

Figura 20 – Diagrama de energia de um sistema de produção genérico



Fonte: Adaptado pelo autor.

A janela do sistema é simbolizada pelo retângulo que separa as fontes externas dos processos internos ao sistema. Como saída do sistema tem-se a produção de bens e serviços. Na parte inferior do diagrama encontra-se o sumidouro de energia, que representa a perda de energia decorrente das transformações internas do sistema (2.ª Lei da Termodinâmica).

Geralmente as entradas são classificadas em três tipos: (a) recursos renováveis locais (R), como a luz solar, vento e chuva; (b) recursos não-renováveis locais (N), refere-se aos disponíveis em quantidade limitada dentro dos limites do sistema, tais como a erosão do solo e das águas subterrâneas, etc.; (c) entrada

compradas (F), inclui aqueles comprados da economia, como energia elétrica, máquinas e trabalho humano. A emergia total demandada pelo sistema (Y) é igual à soma de emergia dos fluxos (N + R + M).

Segunda etapa: elaborar a tabela de avaliação em emergia (Tabela 4), incluindo todos os fluxos de massa, energia e monetário que cruzam as fronteiras do sistema e suas respectivas UEVs (Valores de Unitários de Emergia) obtidas da literatura. Os itens incluem não só o investimento de capital inicial para equipamentos e construção de instalações e as entradas contínuas de operação e manutenção, mas também fatores como o trabalho e serviços humanos. Diferentes unidades de fluxos atuais na tabela são multiplicadas pelas UEVs correspondentes para convertê-los em emergia solar. Cada fluxo de energia que entra pela fronteira do sistema é representado por uma linha na tabela.

Todos os valores de unidade de emergia (UEVs) utilizados neste trabalho foram atualizados com base na emergia de 15.83E24 Sej / ano (ODUM, 2000) e não contabilizam mão-de-obra e serviços. As UEVs foram obtidas a partir da literatura científica e referenciadas em conformidade. Todo o processo de cálculo é fornecido quando pressupostos e correções foram julgados necessários para melhor representar o sistema avaliado ou as especificidades regionais brasileiras. As UEVs utilizadas neste trabalho estão disponíveis no Apêndice A do 1º. Artigo deste trabalho (item resultados).

Tabela 5 – Tabela de avaliação em emergia

Item (1)	**Descrição (2)**	**Unidade (3)**	**Quantidade (4)**	**UEV (5)**	**Referencia (6)**	**Emergia (seJ) (7)**
R: Recursos da Natureza renováveis						
N: Recursos da natureza não- renováveis						
M: Materiais da economia						
S: Serviços da economia						
Emergia total (Y)						

Fonte: Odum (1996).

Terceira etapa: calcular os índices de emergia (Tabela 5) com base na tabela de avaliação em emergia. Por meio dos fluxos de entrada do sistema, é possível avaliar os indicadores em emergia dos sistemas estudados, destacando a interação entre os sistemas e o ambiente em que estão inseridos.

Tabela 6 – Índices em emergia utilizados neste estudo

Indicador	Descrição	Equação
EYR	Rendimento emergético (emergy yield ratio, EYR) é a emergia do fluxo de saída Y (produto, processo ou serviço) dividida pela soma das emergias do fluxo de emergia proveniente da economia (F). É um indicador de retorno de energia sobre o investimento realizado (energia líquida do sistema).	EYR =Y/F ou (R+N+F)/F
EIR	O investimento emergético (environmental investment ratio) é dado pela razão entre a emergia do fluxo F e os fluxos de emergia provenientes do ambiente, N e R. Um índice baixo indica que o ambiente provê mais recursos para o processo que a economia (materiais e serviços).	EIR=F/N+R
ELR	O indicador de carga ambiental (environmental loading ratio) mostra a razão entre os fluxos de investimento econômico e de recursos não renováveis e a emergia associada ao fluxo de recursos renováveis. Avalia o stress imposto ao ambiente, quanto menor o valor, menor o stress causado.	ELR=N+F/R
ESI	O índice de Sustentabilidade (sustainability index) agrega o rendimento emergético e a carga ambiental. Maior será a sustentabilidade de um sistema com alto rendimento em emergia e baixa carga ambiental.	ESI=EYR/ELR
%R	Percentual de recursos renováveis, indica a porcentagem de fluxo de energia que é proveniente de fontes renováveis. Sistemas com alto valor deste índice são mais sustentáveis.	(R/Y).100%

Fonte: Elaborada pelo autor (adaptada de GIANNETTI et al., 2007).

Estes índices são utilizados para avaliar as relações entre componentes do sistema produtivo e as reservas utilizadas para a obtenção do produto de interesse; dependem da fração de insumos renováveis e não renováveis e consideram os insumos disponíveis localmente e aqueles importados de fora do sistema. Obtém se, desta forma, informações valiosas sobre o desenvolvimento e a operação dos sistemas produtivos, levando em conta a capacidade de carga do ambiente. Pode-se ainda avaliar a eficiência termodinâmica do sistema, a qualidade dos fluxos de entrada e saída do sistema de produção e especialmente a interação entre o sistema e o ambiente em que este está inserido (BARRELLA et al., 2005).

4 PUBLICAÇÕES

4.1 Resultados (1º artigo)

Este primeiro trabalho foi apresentado na 9th Biennial Emergy Research Conference[1], University of Florida, Gainesville, USA, em janeiro de 2016. A versão aqui apresentada é a versão final, já atualizada após correções sugeridas durante a apresentação no evento e cuja será publicada no livro de Proceedings do evento (impresso e digital).

Este trabalho teve como principal objetivo avaliar a eficiência global em (sej/kW) e emergia líquida (EYR) da energia elétrica gerada pelo complexo eólico do Piauí. Estes indicadores podem ser considerados como importantes na avaliação do real benefício que a energia eólica disponibiliza para a sociedade brasileira, principalmente em comparação com a energia hidráulica que é a principal fonte de energia elétrica gerada e consumida no país. Comparações com outros sistemas eólicos de outras regiões do mundo também são realizadas para avaliar o desempenho, em emergia, do sistema brasileiro em relação ao mundo.

[1] http://www.cep.ees.ufl.edu/emergy/conferences/ERC09_2016/index.shtml

1

Net emergy assessment of wind-electricity generation in the Brazilian northeast region

Márcio Costa and Feni Agostinho

Production Engineering Graduate Program, Paulista University (UNIP), São Paulo, Brazil; marciocosta.geo@gmail.com; feni@unip.br

ABSTRACT

The search for energy alternatives to fossil fuel is increasing along years, in which wind energy receives an important role in a global future scenario mostly dependent on renewable energy. Specifically for Brazil, federal government is promoting wind-electricity production in its territory, mainly in the Northeast region with the best natural conditions. However, although assuming this kind of electricity as renewable, it still demands high investments in material, energy, labor and information for components manufacturing, transportation, installation and maintenance. This claims for studies to verify its real effectiveness in providing net emergy (with an "m") to support societal development. This work aims to assess the net emergy of wind-electricity generated at *"Chapada do Araripe"*, Piaui State, Brazil. The wind-electricity energy complex has 195MW through its 115 wind-turbines that occupies about 2,600 ha of land. Results show that wind-electricity generated has higher global efficiency (59,600 seJ/J) compared to other usual sources for electricity production (i.e. hydropower, fossil oil, natural gas, nuclear and biomass; ranging from 104,664 to 391,440 seJ/J); this reinforces its usage in a world with reduced resources availability. Regarding net emergy, the values of 1.21 and 2.99 seJ/seJ obtained for the emergy yield ratio (EYR) calculated from two different approaches indicate that wind-electricity energy complex evaluated is providing a net emergy of 0.21 and 1.99 seJ, respectively, to society per 1 seJ invested from economy. These numbers indicate that wind-electricity energy complex should be supported to collaborate towards the Brazilian societal development.

Key words: Emergy yield ratio; Piaui state; Renewable energy.

1. INTRODUCTION

The worldwide wind electricity production was equivalent to zero in 1980, but in 2013 it reached 2.7% of total electricity consumed. The USA was the largest wind electricity producer in 2013 with 27% of total production in the world. Brazil occupied the 15th position of that ranking, but it has the 1st place for the capacity factor with 36%, a value superior to Turkey (33%), Australia, and USA (32%); this means that Brazil has the highest worldwide potential capacity to produce electricity from wind energy (N3E, 2014). Although considering all this potential, the installed power in Brazil was 12TW in 2014, which corresponds to less than 2% of total electricity produced from all summed sources (including hydro, fossil based, biomass and wind) (BEN, 2015). This indicates a huge potential for increase in this field.

Brazilian government has a long term strategic planning to keep with the current importance level of about 43% for the so-called renewable sources (mainly including firewood, sugarcane bagasse, wind, and hydraulic) in its national energy matrix until 2023 (BRASIL, 2014). For this, an important political action was presented aiming to promote the usage of alternative energy sources: the PROINFA program. Among all renewable energy sources cogitated, the wind energy received special attention by PROINFA. According to BRASIL (2007), it is expected an increase of about 3,300 MW of wind-electricity between 2015-2030 period, which will result in a total of 4,682 MW for 2030. It is worth to say that wind-electricity generation has been benefited by the reduction of its market price as established by public auctions, from 110 USD/MWh in 2004 to 41 USD/MWh in 2014 (N3E, 2014) – using the current ratio of 3.3 BRZ/USD for Brazilian to American dollar currency.

More than be renewable, the ability of energy sources in providing a positive net energy to society deserves equal attention. A renewable energy source can support a sustainable development, but when considering the growing phase of society – divided into growth, climax and degrowth phases (Odum and Odum, 2001) –, the positive net emergy allows its real development independently of energy source renewability. This claims for efforts in evaluating the net emergy obtained from alternative energy sources to fossil fuels.

When well structured, political efforts in replacing fossil-based energy sources as the Brazilian PROINFA program can be viewed as a good strategy towards a sustainable development. Additionally, the energy generation and consumption at the same region is other positive aspect, because it reduces the amount of material and energy that would be demanded to convert and transport that generated energy to other regions. On the other hand, important issues must be carefully considered before stating that such energy source will return in net benefits to society. Although there are technical studies evaluating the most appropriate regions in Brazil where wind farms must be installed (i.e. intermittent wind availability with high speed), the used technology by wind turbines production is still foreign, which results in high costs related to payment of legal rights– i.e. information – in using such technology. Notwithstanding, the wind turbine components are usually produced far from the regions where they will be actually installed in Brazil, which increase the transportation costs; lets remind that wind turbine components are large and heavy. These aspects raise doubts about the net energy provided to Brazilian society by the wind electricity produced and its performance compared to hydropower that currently provides about 80% of total Brazilian electricity.

The widely used methodological approach in calculating the net energy of fuels is the embodied energy analysis through its main indicator named energy return on investment (EROI). However, the results obtained by this approach could be considered as underestimated because it does not account for important input resources recognized as essential for system functioning. For example, natural resources and human labor are usually disregarded from traditional EROI calculation due to its reduced scale of analysis (Agostinho and Siche, 2014). In this sense, emergy accounting (Odum, 1996)

appears to be a powerful alternative in estimating the net energy of fuels, in which its main indicator for this purpose is the emergy yield ratio (EYR). This indicator shows how much emergy from nature (considered free of market) has become available for societal development by investing emergy from economy. According to Odum (1996), when an energy source delivers more emergy than is used to obtain it, then societal economy is abundant with high standards of living. Specifically for this work, EYR evaluates if the emergy invested with human labor, information, steel, concrete, diesel and several other necessary inputs to generate electricity by the assessed wind-turbines results in a positive net emergy for Brazilian societal development.

The objective of this work is to use emergy accounting to assess the net emergy of wind electricity generated by the ongoing project of wind farms supported by Brazilian government in the Piaui State.

2. METHODOLOGY

2.1. Case study and data source

This work evaluates the wind-electricity energy complex called *"Chapada do Araripe"*, located at Piaui State, Brazil (Figure1). This region is identified by Brazilian governmental reports as the most appropriated place to install wind farms in Piaui State, due to landscape (accessibility and availability) and wind conditions. Seven wind farms are being implemented and will generate 504 GWh/yr of wind electricity (Table 1).

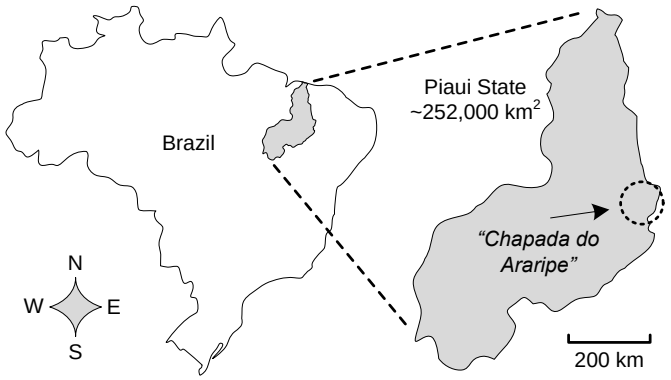


Figure 1. Geographical position of *"Chapada do Araripe"* wind-electricity energy complex in the Piaui State, Brazil.

Regarding scale of analysis, the system boundaries of this work include (i) wind-turbine components manufactured by different suppliers, (ii) components transport from industries to wind-farms (gate to gate), (iii) wind-turbines installation, (iv) operation and maintenance (Figure 2). Decommissioning step was not included at this time due to lack of available information. Transportation is a special subsystem because each component is manufactured in industries located at different regions within Brazilian territory. For instance, some components of wind-turbine are produced at 2,000 km far away from the studied wind farms, while others are produced regionally. Regarding temporal analysis, it is considered the lifespan of 20 years for

wind-turbines (as considered by Yang and Chen (2013) and Dolan (2007)), thus all resources needed in operating and maintaining the wind-turbines during this time are included.

Table 1. Main characteristics of the "*Chapada do Araripe*" wind-electricity energy complex evaluated (195MW).

Wind farms	Land occupation (ha)	Wind-turbines [a] (units)	Electricity generated [b] (GWh/yr)
Ventos de Santa Joana IX	278	16	70.08
Ventos de Santa Joana X	353	16	70.08
Ventos de Santa Joana XI	187	16	70.08
Ventos de Santa Joana XII	593	17	74.46
Ventos de Santa Joana XIII	245	16	70.08
Ventos de Santa Joana XV	489	17	74.46
Ventos de Santa Joana XVI	443	17	74.46
Total:	2588	115	503.70

[a] Model GE 1.7-100MW hh80m with 1.7MW of nominal power.
[b] Average of generated electricity per each wind-turbine = 1 MWh/h or 8.76 GWh/yr. Considering 50% for conversion efficiency, each turbine provides about 4.38 GWh/yr of electricity.

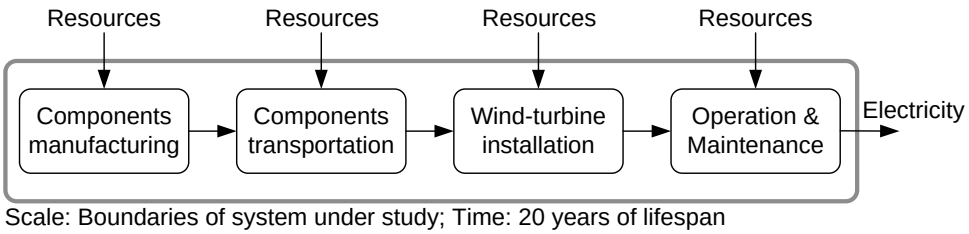


Figure 2. Process considered within wind-electricity generation as evaluated in this work.

A single reference for all primary data used in this work was not found. The wind farms studied depend on different industries that are focused on specific aspects regarding wind-turbine production (rotor, nacelle, and tower) by demanding different materials and technological levels for their production. Thus, primary data were obtained from a number of different sources (including Yang and Chen (2013) and *in situ*) and validated by engineers that work in the wind-turbine industry suppliers in Brazil including for the energy complex evaluated.

All unit emergy values (UEVs) used in this work were updated on the emergy baseline of 15.83E24 seJ/yr (Odum, 2000) and do not account for labor and services. UEVs were taken from scientific literature and referenced accordingly. All calculation procedures are provided when assumptions and corrections were judged necessary to better represent the evaluated system or the Brazilian regional specificities. Appendix A contains primary calculations and the UEVs used in this work.

Uncertainty analysis was not addressed in this study at this time, but further effort will be considered in this direction through a Monte Carlo analysis for the parameters source of uncertainty regarding primary data and UEVs used. Similar approach was

considered by Agostinho et al. (2014) to evaluate parameters uncertainty on the energetic-environmental performance of enzyme industrial production. Additionally, the renewability fraction of each input used by the studied wind-electricity complex will be considered to assess its sustainability and help in the discussion about considering it as an alternative in replacing totally or partially the hydro-electricity as currently used in Brazil.

2.2. Emergy Yield Ratio (EYR)

Emergy is defined as the available energy of one kind of previously used up directly and indirectly to make a service or product (Odum, 1996). Its broader scale of analysis accounts for all resources from a larger economic system and from the natural environment which is usually disregarded by other methodological approaches because no monetary flow circulates on them (Agostinho and Pereira, 2013). Additionally, emergy approach recognizes the energy hierarchy in the universe, which implies in different quality for resources and could reflects more appropriately the effort done by the biosphere in providing a resource for the human economy (i.e. a donor side perspective is considered rather than a receiver one in valuing resources.)

The traditional emergy performance indices provided by Odum (1996) and other emergy analysts along with the last two decades of emergy publications are available to be used in emergy synthesis. However, according to Odum (1996), the Emergy Yield Ratio (EYR) could be considered as the most appropriated when assessing net emergy for fuels and electricity. EYR is a measure of its net contribution to the economy beyond its own operation. H.T. Odum states that if the sources of these goods deliver much more emergy than is required to obtain them, then the economy is abundant and the standards of living are high; this is because prosperity of society depends on the net emergy of its primary sources.

According to Tilley (2015), what differentiates the choice of a method rather than other in calculating the EYR (and also for transformities) is related to objectives of study and mainly to understand if system is maximizing empower (i.e. if the output emergy flow per time is maximized). According do Elliot Campbell (personal communication), maximum empower is relative: (i) no human system (or most natural systems) are functioning at maximum empower because systems are constantly being subjected to pulses and changing; (ii) a counter-argument could be made that all systems are functioning at maximum empower when considering a large enough spatial and temporal scale. Tilley (2015) also identified the difficult in identifying if the system is working at maximum empower, however, the author emphasizes that since EYR is usually calculated to analyze if system is delivering more emergy to economy than divert from it, “it is crucial that proper yield be estimated”. Recognizing that main goal of this study is to verify the net emergy contribution of wind-electricity to the current electricity grid in Brazil, both approaches were here considered in calculating EYR:

(a) Assuming that complex analyzed is at maximum empower. The justification is that system is operating at large geographical scale at multiple places in the world, it has

multiple generations of innovation, and it is economically connected to society. In this case, the system yield (Y) is calculated by summing all indigenous and feedback from economy emergy resources demanded by system, Y=R+N+F (Figure 3).

(b) Assuming that complex is not working at maximum empower, thus the yield (Y*) is estimated by multiplying the energy generated by system (electricity output) by an equivalent unit emergy value ($UEV_{eq.}$) representative of the Brazilian electricity matrix, $Y^*=E_{out}*UEV_{eq.}$ (Figure 3). The used $UEV_{eq.}$ was previously estimated by Giannetti et al. (2015) as 1.47 E5 seJ/J considering the different sources for Brazilian electricity matrix (77% hydraulic, 8% natural gas, 7% biomass, 3% fossil oil, 3% nuclear 1% coal, and 1% wind). This second approach could be considered most representative for this work because it is relating the efficiency of current Brazilian electricity matrix in demanding emergy to generate electricity against the wind-electricity energy complex evaluated. In other words, it indicates how far is the efficiency of wind-electricity energy complex compared to the current Brazilian electricity mix.

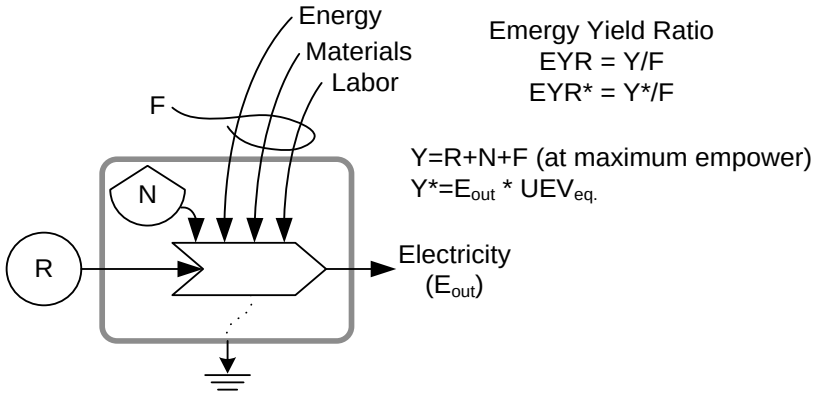


Figure 3. Generic energy diagram showing two methods in calculating emergy yield ratio (EYR). Legend: R = renewable resources from nature; N = non-renewable resources from nature; F = feedback from economy; Y = yield; Eout = energy output; UEVeq. = Equivalent unit emergy value.

3. RESULTS AND DISCUSSION

The energy diagram of Figure 4 shows the main input and output flows, as well as internal relationship of the evaluated wind-electricity energy complex. The external energy sources include wind as the renewable natural resource used by the system. Other external sources come from the larger economy, including materials (i.e. steel, cooper, glass, concrete, etc.), energy (diesel), labor, and services. All of them are necessary resources for the system implementation and operation during its 20 yrs of lifespan. Internal subsystems include components manufacturing and transportation until wind farms, concrete-based foundation to support wind turbines at farm, and energy demanded for maintenance. The output is the electricity available to the Brazilian national grid. The wind-electricity generated has a market cost agreed between the wind energy company with the government through previous public auction. The different layers in the energy diagram represent the seven existing wind farms that belong to the wind-electricity energy complex evaluated. Monetary flow of

electricity sold to market goes into the system boundaries, then it charges the money storage, and finally it is used to pay external sources of labor & services. The approach described in Ulgiati and Brown (2014) to accounted for services is considered here, in which services associated with materials and energy inputs to a process (i.e. background, indirect labor) are accounted for by their monetary market costs.

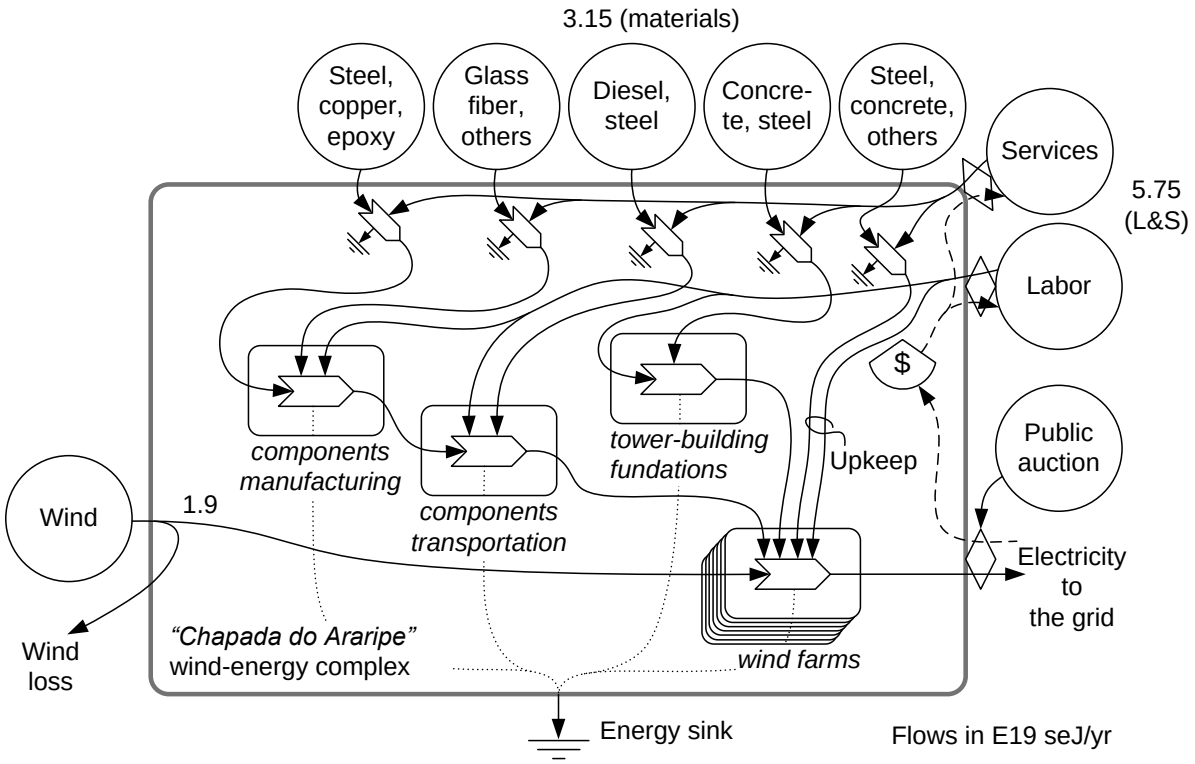


Figure 4. Energy diagram of "*Chapada do Araripe*" wind-electricity energy complex. It comprises seven similar and independent wind-farms. Numbers come from Table 2.

The present study disregarded the non-renewable resources from nature (N), however, as identified and considered by Riposo (2008) and Dolan (2007), the wildlife impact (i.e. birds, bats, and bugs killed by wind-turbines) and land appropriation could be accounted for better representation of emergy performance for the generated wind electricity. Although potentially reducing the renewability (%R) and sustainability (ESI) emergy indices, the inclusion of those N resources would result in better performance for the emergy yield index (EYR=(R+N+F)/F); for the second approach in calculating EYR*, including N resources will have no influence on final numbers. The propositions of new emergy indices as suggested by Ortega and Bastianoni (2015) could be useful to assess, critically, different aspects of system under study as its sustainability. The EYR issue is also discussed by Ulgiati et al. (2005) and Raugei et al. (2005), in which authors argue, "short-term competitiveness may turn into medium or long-term self-destructiveness". In short, high EYR should not be the goal when natural non-renewable resources are considered in its calculation algebra, if not, the

system will be at the same time a good supplier of net emergy to society and unsustainable at medium to long terms.

According to Odum and Odum (2001), indicators have different meanings and importance in the different stages of a production-consumption pulse (growth, climax, descent, and restoration), thus the policies that are good in times of abundant resources (renewable or non-renewable) may not be good in times of or scarce resources. Assuming that emergy related to N resources in the wind-electricity energy complex is smaller to the renewable emergy obtained from wind (i.e. R>>N), then the EYR index becomes R+F/F. In this case, it can be said that higher EYR means better performance because the system is increasing its dependence on natural renewable resources that results in higher net emergy provided to society through a renewable way. Maybe, a system who does not use non-renewable resources could not be considered competitive during the society's growth phase, but in accordance with current availability reduction of cheap fossil-based energy, tendencies indicates that society is facing climax or descent phase; this means that both are important, net emergy and renewability.

Table 2 shows those items that have higher influence on total emergy demanded by system. Labor & services related to wind-turbine manufacturing correspond to 48% of total emergy, followed by wind (17%), concrete used to make foundations (13%), total steel (9%) and copper (4%) used in the wind-turbines; all other items correspond to 9%. The high influence of Labor & Services can be explained by the high market cost of wind-turbine – because it was accounted for in currency units in the emergy evaluation –, which includes not only the subjective willingness-to-pay for that good, but also, it includes indirectly all research and development applied to provide such high-tech good for society. The influence of all other items in Table 2 was previously expected, mainly for steel, which correspond to a huge part of structural weight of wind-turbines, and because there is not such a "special material" with high UEV being used. Fiberglass, copper, aluminum, and glass materials have the highest UEVs and could change this interpretation, but they are used in small amounts and do not have influence on final numbers.

The UEV for wind-electricity obtained for the wind-electricity energy complex correspond to 59,600 seJ/J (including Labor & Services; Table 2). For comparison, this value correspond to a higher efficiency in generating electricity than other energy sources published by several authors and summarized in Giannetti et al. (2015): hydraulic (104,664 seJ/J), sugarcane biomass (231,000 seJ/J), natural gas (290,640 seJ/J), nuclear (320,000 seJ/J), coal (342,720 seJ/J), and fossil oil (391,440 seJ/J). The obtained UEV for wind-electricity in this work has also higher efficiency compared to other studies that assessed wind-electricity generation, for instance, the works of Ulgiati and Brown (2002; 104,328 seJ/J) and Riposo (2008; 159,000 seJ/J). On the other hand, Dolan (2007; 10,300 seJ/J) and Yang et al. (2013; 17,400 seJ/J) have found better efficiency for wind-electricity than this present work.

Table 2. Emergy evaluation table of wind electricity generated by "*Chapada do Araripe*" wind-electricity energy complex, Piaui State, Brazil.

#	Description	Amount[a]	Unit/yr	UEV[b] (seJ/Unit)	Emergy (seJ/yr)	Emergy (%)
NATURAL RESOURCES (I)						
1	Wind (R)	7.55E+15	J	2.51E+03	1.90E+19	17.5
2	Birds loss (N)	-	-	-	-	-
3	Bats loss (N)	-	-	-	-	-
4	Bugs loss (N)	-	-	-	-	-
5	Aesthet. value loss (N)	-	-	-	-	-
6	Noise (N)	-	-	-	-	-
RESOURCES FROM ECONOMY (F)						
Components manufacturing						
7	Steel (F)	1.05E+03	ton	7.81E+15	8.20E+18	7.6
8	Fiber glass (F)	1.29E+02	ton	1.32E+16	1.70E+18	1.6
9	Epoxy (F)	1.50E+01	ton	5.51E+15	8.27E+16	0.1
10	Copper (F)	4.97E+01	ton	9.80E+16	4.87E+18	4.5
11	Aluminum (F)	2.88E+00	ton	2.13E+16	6.13E+16	0.1
12	Glass (F)	2.01E+00	ton	1.29E+16	2.59E+16	<0.0
13	Polyester (F)	1.73E+00	ton	5.51E+15	9.53E+15	<0.0
14	Lab.&Serv. (F)	1.22E+07	USD	4.24E+12	5.17E+19	47.8
Components transportation						
15	Diesel (F)	4.37E+11	J	1.81E+05	7.91E+16	0.1
16	Steel (F)	3.67E-02	ton	7.81E+15	2.87E+14	<0.0
17	Lab.&Serv. (F)	1.24E+06	USD	4.24E+12	5.26E+18	4.9
Wind-turbine installation &maintenance						
18	Concrete (F)	5.98E+03	ton	2.42E+15	1.45E+19	13.4
19	Steel (F)	2.19E+02	ton	7.81E+15	1.71E+18	1.6
20	Diesel (F)	3.32E+11	J	1.81E+05	6.01E+16	0.1
21	Water (F)	1.74E+03	ton	3.27E+11	5.69E+14	<0.0
22	Electricity (F)	1.04E+12	J	1.47E+05	1.53E+17	0.1
23	Gasoline (F)	1.01E+12	J	1.87E+05	1.89E+17	0.2
24	Lab.&Serv. (F)	1.24E+05	USD	4.24E+12	5.26E+17	0.5
	Emergy without Lab.&Serv.	-	-	-	5.06E+19	-
	Emergy with Lab.&Serv.	-	-	-	1.08E+20	-
	Electric. without Lab.&Serv.	1.81E+15	J	2.79E+04	-	-
	Electric. with Lab.&Serv.	1.81E+15	J	5.96E+04	-	-

(R) = renewable resource from nature; (N) = non-renewable resource from nature; (F) = feedback from economy; Aesthet. Loss = aesthetic loss; Lab.&Serv. = Labor & Services; All UEVs are updated to baseline of 15.83 E24 seJ/yr (Odum, 2000) and do not include labor & services.

[a] Calculation details in Appendix A.

[b] References for UEV are presented in Appendix A.

Regarding the net emergy, the EYR and EYR* emergy indices obtained for the evaluated wind-electricity energy complex are 1.21 and 2.99 respectively (Table 3). Although recognizing the existence of differences among methodological approaches considered by referenced authors, Table 3 provides EYRs for different energy sources for a rough comparison. According to previously defined meaning of EYR as used in this work, the 1.21 value means that for each emergy unit from economy demanded by

the complex evaluated, the resultant emergy net value of 0.21 is being provided for societal development. This value is considered as a positive aspect, mainly because 100% of those 0.21 seJ/seJ comes from renewable energy source – exclusively from wind. Focusing now on the EYR*, a value of 2.99 seJ/seJ indicates better performance than EYR, which means that higher amount of net emergy is being provided to societal development by the wind-electricity energy complex. This number indicates that, when comparing it with the average current electricity mix in Brazil, the wind-electricity energy complex evaluated can provide 2.99 emergy to society per each emergy invested. Disregarding other variables that must be considered for a decision about what kind of electricity source should be used to allow the Brazilian societal development (for instance, economic costs, socio cultural issues, climatic conditions, systems stability and resilience, etc.), the evaluated wind-electricity energy complex appears as a good alternative since it provides net emergy to society.

Table 3. EYR comparison of electricity generation from solar radiation, wind, hydro and oil energy sources.

EYR[a]	Energy Source	Reference	Observations
1	Solar	Brown et al., 2012	1m^2 ground-mounted CdTe PV; EYR updated
1.21 [b]	Wind	This work	195MW wind farm in Brazilian Northeast region
1.25	Wind	Yang et al., 2013	30MW wind farm in Guagxi Zhuang region, Chin
2.99 [c]	Wind	This work	195MW wind farm in Brazilian Northeast region
5.41	Hydro	Brown & Ulgiati, 2004	85MW plant in southern Italy
5.59	Wind	Brown & Ulgiati, 2004	2.5MW plant in southern Italy
6.3	Oil	Brown et al., 2012	500MW oil fired plant; EYR updated
10.34	Wind	Riposo, 2008	322MW offshore Maple Ridge Facility, NY, USA
11.6	Wind	Dolan, 2007	180MW theoretical offshore in Jacksonville, USA

[a] EYR' digits for referenced values were kept in their original form as found in literature; [b] EYR = (1.08E20 seJ/yr) / (8.9E19 seJ/yr); [c] EYR* = (1.81E15 J/yr) * (1.47E5 seJ/J) / (8.9E19 seJ/yr).

Although reaching a positive net emergy value, Table 3 shows that both EYRs for the evaluated wind-electricity energy complex are lower than other electricity energy sources. This can be interpreted under two different perspectives:

(i) The better performance values of EYR for wind-electricity found by Dolan (2007; EYR=11.6) and Brown and Ulgiati (2004; EYR=5.59) – disregarding Riposo (2008) because it is an offshore wind-energy system –, could be useful as a target in guiding a strategic planning aiming to reach those high performance values.

(ii) The EYR value of 5.41 for hydroelectricity found by Brown and Ulgiati (2004) – Odum (1996) also estimated a EYR of 10 for hydroelectricity – indicates that using electricity from this source results in higher benefits to society than using wind-electricity as evaluated. This is especially true considering the growing phase of societal development under a pulsing paradigm view, in which higher yields could be considered as more beneficial than sustainability.

It is worth to say that EYR values considered as reference in this work still demands a deeper assessment to verify its usefulness and compatibility with the methodological approach used here. The present work includes the preliminary results found by a larger project under development, thus authors recognize that more efforts towards its improvement is needed, for instance: (i) the inclusion of potential non-renewable natural resources contributing for wind-electricity generation (see Table 2); (ii) the inclusion of an uncertainty analysis on parameters (primary data and UEVs); (iii) the inclusion of decommissioning stage after materials lifetime; (iv) a study of the electricity transmission stage (this is important especially due to largeness of Brazilian territory); (v) the inclusion for other emergy indices to support a better-based discussion about the sustainability of wind-electricity.

4. CONCLUSIONS

(a) The unit emergy value (UEV) for the electricity generated by the wind-electricity energy complex evaluated (59,600 seJ/J) indicates better efficiency compared to other usual electricity sources as hydropower, fossil oil, coal, natural gas, nuclear and biomass (from 104,664 seJ/J to 391,440 seJ/J). This means that wind-electricity has higher global efficiency in converting resources into electricity, which is strengthened by other published values on wind-electricity generation (10,300 seJ/J and 17,400 seJ/J).

(b) The EYRs indices of 1.21 and 2.99 seJ/seJ show that evaluated wind-electricity energy system is able to explore and make available to society a net emergy of 0.21 and 1.99 seJ, respectively, per 1 seJ invested from economy. Specifically for the EYR* of 2.99 seJ/seJ, it indicates that wind-electricity energy complex evaluated provides net emergy to the Brazilian society when compared to the current average of Brazilian electricity energy matrix, thus wind-energy should be supported in strategic political decisions concerning energy.

Acknowledgements

Authors are grateful for the financial support from Vice-Reitoria de Pós-graduação da Universidade Paulista (UNIP). Thanks to CNPq Brazil (proc. no. 307422/2015-1) for the fellowship provided to second author.

References

Agostinho, F., Pereira, L., 2013. Support area as an indicator of environmental load: comparison between embodied energy, ecological footprint, and emergy accounting methods. Ecological Indicators, 24, 494-503.

Agostinho, F., Bertaglia, A.B.B., Almeida, C.M.V.B., Giannetti, B.F., 2014. Influence of cellulase enzyme production on the energetic-environmental performance of lignocellulosic ethanol. Ecological Modelling (2014), http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.09.005.

Agostinho, F., Siche, R., 2014. Hidden costs of a typical embodied energy analysis: Brazilian sugarcane ethanol as case study. Biomass and Bioenergy 71, 69-83.

BEN, 2015. Brazilian Energy Balance 2015, year 2014. Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Rio de Janeiro. Available at <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>. Accessed on August 25th 2015.

BRASIL, 2007. Matriz Energética Nacional 2030, Ministério de Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Brasília. Available at <http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/matriz-energetica-nacional-2030>. Accessed on August 25th 2015.

BRASIL, 2014. Plano decenal de expansão de energia 2023, Ministério de Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Brasília. Available at <http://www.epe.gov.br/ Estudos/Documents/PDE2023.pdf>. Accessed on August 27th 2015.

Brown, M.T., Raugei, M., Ulgiati, S., 2012. On boundaries and investments in emergy synthesis and LCA: A case study on thermal vs. photovoltaic electricity. Ecological Indicators 15, 227-235.

Brown, M.T., Protano, G., Ulgiati, S., 2011. Assessing geobiosphere work of generating global reserves of coal, crude oil, and natural gas. Ecological Modelling 222, 879-887.

Brown, M.T., Ulgiati, S., 2004. Emergy analysis and environmental accounting. Encyclopedia of Energy 2, 329-353.

Buenfil, A.A., 2001. Emergy evaluation of water. PhD Thesis, University of Florida, USA, Gainesville.

Buranakarn, V., 1998. Evaluation of recycling and reuse of building materials using the emergy analysis method. PhD. thesis, University of Florida, Gainesville, USA.

Campbell, E.T., 2014. Emergy analysis of emerging methods of fossil fuel production. Ecological Modelling (2014), http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.10.036.

Cohen, M.J., Sweeney, S., Brown, M.T., 2007. Computing the unit emergy value of crustal elements. In: Emergy syntheis 4, theory and applications of the emergy methodology. Proceedings of the 4th Biennial Emergy Research Conference, Gainesville, University of Florida. Available at <http://www.cep.ees.ufl.edu/emergy/conferences/index.shtml>. Accessed on August 24th 2015.

Dolan, S., 2007. Life cycle assessment and emergy synthesis of a theoretical offshore wind farm for Jacksonville, Florida. M.Sc. thesis, University of Florida. Available at <http://www.cep.ees.ufl.edu/ emergy/documents/dissertations_theses/Dolan_2007_LCAandEmergySynthWindFarmJax_FL _Thesis-UF.pdf>. Accessed on June 19th 2015.

Giannetti, B.F., Agostinho, F., Moraes, L.C., Almeida, C.M.V.B., Ulgiati, S., 2015. Multicriteria cost-benefit assessment of tannery production: the need for breakthrough process alternatives beyond conventional technology optimization. Environmental Impact Assessment Review 54, 22-38.

N3E, 2014. Energia eólica no Brasil e no mundo. Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia, SPE/MME, edição 22/12/2014. Available at <www.mme.gov.br>. Accessed on August 26th 2015.

Ortega, E., Bastianoni, S., 2015. Open issues in emergy methodology. In: Brown et al. (editors), Emergy Synthesis 8: Theory and Applications of the Emergy Methodology. Proceedings of the 8th Biennial Emergy Conference. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville.

Odum, H.T. 1996. Environmental Accounting: Emergy and Environmental Decision Making John Wiley and Sons. New York.

Odum, H.T. 2000. Folio #2: Emergy of Global Processes. Handbook of Emergy Evaluation. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL. Available at <http://www.emergy systems.org/folios.php>. Accessed on 6th August 2015.

Odum, H.T., Odum, E.C., 2001. A prosperous way down: principles and policies. Boulder, University Press of Colorado, 326pp.

Riposo, D., 2008. Integrated energy and environmental analysis of utility-scale wind power production. M.Sc. thesis, University of Maryland. Available at <http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/8598/ 1/umi-umd-5707.pdf>. Accessed on June 19th 2015.

Tilley, D., 2015. Transformity dynamics related to maximum power for improved emergy yield estimations. Ecological Modelling 315, 96-107.

Ulgiati, S., Brown, M.T., 2002. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions: the case of electricity production. Journal of Cleaner Production 10, 335-348.

Ulgiati, S., Bargigli, S., Raugei, M., 2005. Dotting the I's and crossing the T's emergy synthesis: Material flows, information and memory aspects, and performance indicators. In: Brown et al. (editors), Proceedings from the 3rd Biennial Emergy Conference, Gainesville, University of Florida, USA.

Ulgiati, S., Brown, M.T., 2014. Labor and services as information carriers in emergy-LCA accounting. Journal of Environmental Accounting and Management 2, 160-167.

Yang, J., Chen, B., 2013. Integrated evaluation of embodied energy, greenhouse gas emission and economic performance of a typical wind farm in China. Renewable and Sustainable Energy Reviews 27, 559-568.

Yang, Q., Chen, G.Q., Liao, S., Zhao, Y.H., Peng, H.W., Chen, H.P., 2013. Environmental sustainability of wind power: An emergy analysis of a Chinese wind farm. Renewable and Sustainable Energy Reviews 25, 229-239.

Appendix A. Calculation procedure for primary data and UEVs

"I" - NATURAL RESOURCES

#1 Wind – average of annual wind power available = 250 W/m^2 (http://www.cresesb.cepel.br/index.php?section=atlas_eolico&); effective diameter for each wind turbine = 103 m (https://renewables.gepower.com/wind-energy/turbines/1-7-100-103.html); amount of wind turbines = 115 units; Conversion = (W/m^2) (π*(103)^2/4) (115 turbines) (31,536,000 s/yr); Flow = 7.55E15 J/yr; UEV = 2.51E3 seJ/J (Odum, 1996).

#2 Bird loss – not considered

#3 Bat loss – not considered

#4 Bug loss – not considered

#5 Aesthetic landscape value loss – not considered

#6 Noise – not considered

"F" - RESOURCES FROM ECONOMY

Components manufacturing

#7 Steel – rotor 6.2 ton/turbine, nacelle 48.06 ton/turbine, tower 129 ton/turbine (Yang & Chen, 2013) = 183.26 ton/turbine; total of 115 turbines; 20 yrs of lifespan; Conversion = (ton/turbine) (turbines) / (yrs); Flow = 1.05E3 ton/yr; UEV = 7.81E9 seJ/g (Brown and Ulgiati, 2004).

#8 Fiber glass – 3.9 ton/turbine (Yang & Chen, 2013); total of 115 turbines; 20 yrs of lifespan; Conversion = (ton/turbine) (turbines) / (yrs); Flow = 1.29E2 ton/yr; UEV = 1.32E10 seJ/g (Buranakarn, 1998).

#9 Epoxy – 2.6 ton/turbine (Yang & Chen, 2013); total of 115 turbines; 20 yrs of lifespan; Conversion = (ton/turbine) (turbines) / (yrs); Flow = 1.50E1 ton/yr; UEV = 5.51E9 seJ/g (Buranakarn, 1998; considered as plastic).

#10 Copper – 8.64 ton/turbine (Yang & Chen, 2013); total of 115 turbines; 20 yrs of lifespan; Conversion = (ton/turbine) (turbines) / (yrs); Flow = 4.97E1 ton/yr; UEV = 9.80E10 seJ/g (Cohen et al., 2007).

#11 Aluminum – 0.5 ton/turbine (Yang & Chen, 2013); total of 115 turbines; 20 yrs of lifespan; Conversion = (ton/turbine) (turbines) / (yrs); Flow = 2.88E0 ton/yr; UEV = 2.13E10 seJ/g (Buranakarn, 1998; conventional aluminum sheet production).

#12 Glass – 0.35 ton/turbine (Yang & Chen, 2013); total of 115 turbines; 20 yrs of lifespan; Conversion = (ton/turbine) (turbines) / (yrs); Flow = 2.01E0 ton/yr; UEV = 1.29E10 seJ/g (Buranakarn, 1998; float glass production).

#13 Polyester – 0.3 ton/turbine (Yang & Chen, 2013); total of 115 turbines; 20 yrs of lifespan; Conversion = (ton/turbine) (turbines) / (yrs); Flow = 1.73E0 ton/yr; UEV = 5.51E9 seJ/g (Buranakarn, 1998; considered as plastic).

#14 Labor & Services – 7,000,000 R$/turbine; total of 115 turbines; 20 yrs of lifespan; 3.3 R$/USD; Conversion = (R$/turbine) (turbines) / (R$/USD) (yrs); Flow = 1.22E7 USD/yr; UEV = 4.24E12 seJ/USD (Giannetti et al., 2015).

Components transportation

#15 Diesel – sum of #15.1, #15.2, and #15.3; Flow = 4.37E11 J/yr; UEV = 1.81E5 seJ/J (Brown et al., 2011).

#16 Steel – sum of #16.1, #16.2, and #16.3; Flow = 3.67E-2 ton/yr; UEV = 7.81E9 seJ/g (Brown and Ulgiati, 2004).

#17 Labor & Services – About 10% of generated electricity cost is due to transport; Cost for the wind-complex evaluated is estimated as 4,200,000 R$/MW or 1,273,000 USD/MW of power capacity (considering a ratio of 3.3 R$/USD); the evaluated wind-energy complex has 195 MW of power capacity; 20 yrs of lifespan; Conversion = (10%) (USD/MW) (MW) / (yrs); Flow = 1.24E6 USD/yr; UEV = 4.24E12 seJ/USD (Giannetti et al., 2015).

***** Rotor *****

#15.1 Diesel – Rotor is currently produced at Sorocaba city (São Paulo state) located about 2530 km far away from the wind-energy complex in Piauí state; Wind-blades are produced 582 km away at Fortaleza city (Ceará state); Distance of 3112 km/rotor; 1 wind turbine contain 1 rotor; total of 115 turbines; 20yrs of lifespan; average for diesel consumption of 3 km/L; Conversion = (km/turbine) (turbines) (0.85 kg/L) (10,000 kcal/kg) (4,186 J/kcal) / (km/L) (yrs); Flow = 2.12E11 J/yr.

#16.1 Steel – Truck weight for Rotor transporting = 23.5 ton; 42h/rotor demanded to transport each rotor + 10h/wind-propeller; total of 115 turbines; 1 wind turbine contain 1 rotor and 1 wind-propeller; 52h is equivalent to 0.0197% of 30 yrs, then 115 turbines are equivalent to 2.27% of 30 yrs truck lifetime; Conversion = (ton) (2.27%) / (30yrs); Flow = 1.78E-2 ton/yr; UEV = 7.81E9 seJ/g (Brown and Ulgiati, 2004).

***** Nacelle *****

#15.2 Diesel – Nacelle is currently produced at Camaçari city (Bahia state) located about 798 km far away from the wind-energy complex in Piauí state; Distance of 798 km/nacelle; 1 wind turbine contain 1 nacelle; total of 115 turbines; 20yrs of lifespan; average for diesel consumption of 3 km/L; Conversion = (km/turbine) (turbines) (0.85 kg/L) (10,000 kcal/kg) (4,186 J/kcal) / (km/L) (yrs); Flow = 5.44E10 J/yr; UEV = 1.81E5 seJ/J (Brown et al., 2011).

#16.2 Steel – Truck weight for Nacelle transporting = 23.5 ton; 13h/nacelle demanded to transport each nacelle; total of 115 turbines; 1 wind turbine contain 1 nacelle; 13h is equivalent to 0.005% of 30 yrs, then 115 turbines are equivalent to 0.57% of 30 yrs truck lifetime; Conversion = (ton) (0.57%) / (30yrs); Flow = 4.46E-3 ton/yr; UEV = 7.81E9 seJ/g (Brown and Ulgiati, 2004).

***** Tower *****

#15.3 Diesel – Tower is currently produced at Cubatão city (São Paulo state) located about 2503 km far away from the wind-energy complex in Piauí state; Distance of 2503 km/rotor; 1 wind turbine contain 1 rotor; total of 115 turbines; 20yrs of lifespan; average for diesel consumption of 3 km/L; Conversion

= (km/turbine) (turbines) (0.85 kg/L) (10,000 kcal/kg) (4,186 J/kcal) / (km/L) (yrs); Flow = 1.71E11 J/yr; UEV = 1.81E5 seJ/J (Brown et al., 2011).

#16.3 Steel – Truck weight for Rotor transporting = 23.5 ton; 42h/rotor demanded to transport each rotor; total of 115 turbines; 1 wind turbine contain 1 rotor; 42h is equivalent to 0.016% of 30 yrs, then 115 turbines are equivalent to 1.84% of 30 yrs truck lifetime; Conversion = (ton) (1.84%) / (30yrs); Flow = 1.44E-2 ton/yr; UEV = 7.81E9 seJ/g (Brown and Ulgiati, 2004).

Wind-turbine installation & maintenance

#18 Concrete – 433 m^3/turbine (Yang & Chen, 2013); 2.4 ton/m^3; total of 115 turbines; 20 yrs of lifespan; Conversion = (m^3/turbine) (ton/m^3) (turbines) / (yrs); Flow = 5.98E3 ton/yr; UEV = 2.42E9 seJ/g (Buranakarn, 1998).

#19 Steel – 38.1 ton/turbine (Yang & Chen, 2013); total of 115 turbines; 20 yrs of lifespan; Conversion = (ton/turbine) (turbines) / (yrs); Flow = 2.19E2 ton/yr; UEV = 7.81E9 seJ/g (Brown and Ulgiati, 2004).

#20 Diesel – 16,242L/turbine (Yang & Chen, 2013); total of 115 turbines; 20 yrs of lifespan; Conversion = (L/turbine) (turbines) (0.85 kg/L) (1,000 kcal/kg) (4186 J/kcal) / (yrs); Flow = 3.32E11 J/yr; UEV = 1.81E5 seJ/J (Brown et al., 2011).

#21 Water – 303.03ton/turbine (Yang & Chen, 2013); total of 115 turbines; 20 yrs of lifespan; Conversion = (ton/turbine) (turbines) / (yrs); Flow = 1.74E3ton/yr; UEV = 3.27E5 seJ/g (Buenfil, 2001).

#22 Electricity – 50,000kWh/turbine (Yang & Chen, 2013); total of 115 turbines; 20 yrs of lifespan; Conversion = (kWh/turbine) (turbines) (3.6E6 J/kWh) / (yrs); Flow = 1.04E12J/yr; UEV = 1.47E5 seJ/J (Giannetti et al., 2015).

#23 Gasoline – 5,061L/turbine (Yang & Chen, 2013); total of 115 turbines; 20 yrs of lifespan; Conversion = (L/turbine) (turbines) (8,325 kcal/L) (4186 J/kcal) / (yrs); Flow = 1.01E12 J/yr; UEV = 1.87E5 seJ/J (Brown et al., 2011).

#24 Labor & Services – About 1% of generated electricity cost is due to installation and maintenance; Cost for the wind-complex evaluated is estimated as 4,200,000 R$/MW or 1,273,000 USD/MW of power capacity (considering a ratio of 3.3 R$/USD); the evaluated wind-energy complex has 195 MW of power capacity; 20 yrs of lifespan; Conversion = (1%) (USD/MW) (MW) / (yrs); Flow = 1.24E5 USD/yr; UEV = 4.24E12 seJ/USD (Giannetti et al., 2015).

4.2 Resultados (2º artigo)

Este segundo trabalho foi apresentado no International Conference Advances in Production Management Systems[2] (APMS), em setembro 1-7, 2016, Foz do Iguaçu, Brasil.

O objetivo deste trabalho foi calcular o potencial de aquecimento global (GWP), em kgCO2 eq./MW e a energia fóssil incorporada em (MJeq./MW) da geração de energia elétrica pelo complexo de energia eólica no Piauí. Com estes indicadores é possível realizar uma discussão sobre o desempenho energético e ambiental da energia eólica gerada através de comparações com outras fontes de energia elétrica no Brasil e no mundo. Especificamente no Brasil, discutiu-se sobre seu planejamento energético estratégico, que promove a implantação das chamadas energias renováveis como hidráulica, biomassa e eólica.

[2] http://www.apms-conference.org/

Energy Efficiency and Global Warming Potential of a Wind-Energy Complex at Brazilian Piauí State

Márcio Costa, Feni Agostinho, Cecília M.V.B. Almeida and Biagio F. Giannetti

Post-graduation Program on Production Engineering, Paulista University (UNIP), São Paulo, Brazil, Rua Dr. Bacelar 1212 CEP 04026-002
{Feni Agostinho, feni@unip.br}

Abstract. Concerned with global warming issues and recognizing all problems related to human fossil energy addiction, the search for alternative energy sources is increasing worldwide. Specifically for Brazil, its electricity sector is dependent on water resources with about 71% of total electricity generated and used internally. Notwithstanding, Brazilian government intends to increase its dependence on the so-called renewable energy, including hydropower, biomass, and wind-energy. Many political and economic efforts have been directed to wind-energy, however, there is a lack of case-specific information regarding its performance for CO_2 emissions and dependence on fossil fuels, which affects reliability of decisions towards sustainability. The aim of this work is to calculate the global warming potential (GWP) and the fossil energy embodied in an important wind-energy complex located at Piauí State, Brazil. Results show that evaluated wind-complex has better performance than other published studies world-wide, because it demands lower amount of fossil energy (0.0404 MJ) and releases lower amount of carbon dioxide (4.13 $gCO_{2\text{-eq.}}$) per kWh of electricity generated. Wind-electricity showed better performance than hydroelectricity (0.1516 MJ/kWh and 11.84 $gCO_{2\text{-eq.}}$/kWh), which supports wind-electricity as an important alternative towards the economy decarbonization as envisioned by the Brazilian government.

Key-words: embodied energy; global warming; wind-electricity.

1 Introduction

According to Wind Energy Brazilian Association (www.portalabeeolica.org.br), Brazil has the world's first position in the generation of clean and renewable electricity – i.e. it releases low amount of fossil carbon – mainly derived from hydro energy resources. Forty-five percent of Brazil's energy matrix comes from these so-called clean energy sources, which can be considered as a positive aspect when considering the global average of twenty percent. In addition, Brazil has several options to expand its clean and competitive electricity generation, including more hydropower, cogeneration, biomass, and wind energy.

The current worldwide concerns about climate change and the consequent efforts to reduce greenhouse gas emissions (GHG) led to the search for alternative systems of power generation that could reach high economic performance and, at the same time, generate less environmental impacts. Among others, an important political attitude comes as the growing economical investments in renewable energy sources such as

distributed unevenly among countries, wind-energy potential is greater than the current total world electricity generation. Taking into account the political, economic and technological barriers, it is estimated that wind-energy could supply up to 20% of global electricity demand by 2050 [1]. In Brazil, the development of renewable energy sources is supported by the Incentive Program for Alternative Sources of Electric Energy (PROINFA), created by the Ministry of Mines and Energy (MME) by law no.10438/2002. The aim is to boost economies of scale, allow technological learning, increase the industrial competitiveness in domestic and foreign markets, and especially in assisting decision-making for future projects of electricity generation using cleaner and sustainable sources.

PROINFA aims to reach up to 2030 an amount of 3,300 MW installed capacity to be incorporated into the national integrated electricity system. Of this amount, 1,100 MW are planned to come from wind, 1,100 MW from small hydropower plants, and 1,100 MW from biomass projects. From this strategic planning, it is expected an amount of avoided emissions of 2.5 million tCO_2/yr, which could generate an environmental carbon emission certification under the Kyoto Protocol [2].

In addition to greenhouse gases, the reduction on fossil energy dependence also plays an important role in scientific and political discussions. The long term goals is to allow a societal development independent (or at least to a lesser extent) of fossil resources, which are considered non-renewable because their availability at low energy cost is being reduced over years [3]. According to the Brazilian Energy Plan for 2030 [2], the strategic planning is focused on energy efficiency increasing that could lead to a lower load on environment by demanding a reduced amount of resources, increase jobs opportunities, and increase market competitiveness. Energy efficiency addresses the energy consumption reduction, but also the opportunities for energy sources replacement towards a systemic efficiency gains.

In this scenario with reduced CO_2 emissions and fossil energy dependence, wind energy has been considered as a potential alternative towards a cleaner Brazilian energy matrix. Although cleaner, wind energy necessarily generates environmental impacts. For example, although the wind farms do not use fossil energy sources to generate electricity and do not releases fossil carbon to atmosphere during functioning phase, they require a lot of energy resources and materials for construction, operation and maintenance phases that could cause even greater impact on the environment. Thus, before labeling an energy source as “clean”, “green”, “renewable” or other adjective related to sustainability, a quantitative diagnosis must be performed to support such label; careful attention must be driven to the entropic trap (term used by Ulgiati et al. [4]), i.e. the whole life cycle of the good or service must be considered in the evaluation. Thus, before claim that wind-electricity is a clean or green energy source, what is its global warming potential and fossil energy demand?

This work aims to calculate the global warming potential and the fossil embodied energy in generating electricity from wind-energy at “*Chapada do Araripe*” wind-energy complex located at Piauí state, Brazil.

2 Methodology

2.1 Case Study Description and Data Source

This work evaluates the wind-energy complex called *"Chapada do Araripe"*, located at Piaui state, Brazil (Figure 1). It was chosen as case study due to its socio-economic importance in generating wind-energy at Piauí state, as well as due to availability and updated data. This region is identified as the most appropriated place to install wind farms in Piaui state, due to landscape (accessibility and availability) and wind conditions. Within this complex, seven wind farms are being implemented and will generate about 500 GWh/yr of wind electricity (Table 1).

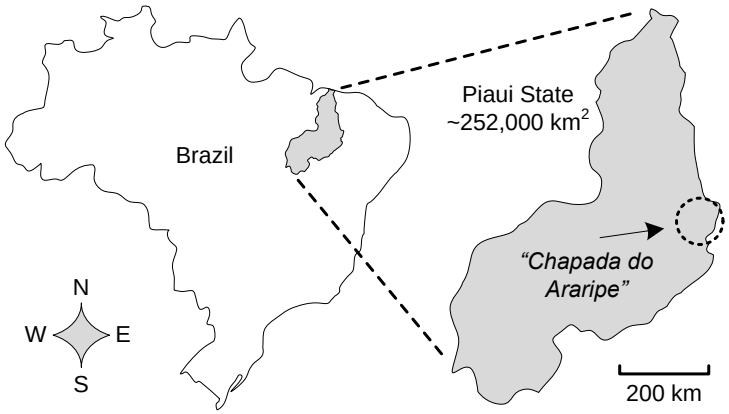


Fig. 1. Localization of *"Chapada do Araripe"* wind-energy complex in the Piaui State, Brazil.

Table 1. Main characteristics of the "*Chapada do Araripe*" wind-energy complex evaluated (195MW).

Wind farms	Land use (ha)	Wind-turbines [a] (units)	Electricity generated [b] (GWh/yr)
Ventos de Santa Joana IX	278	16	70.08
Ventos de Santa Joana X	353	16	70.08
Ventos de Santa Joana XI	187	16	70.08
Ventos de Santa Joana XII	593	17	74.46
Ventos de Santa Joana XIII	245	16	70.08
Ventos de Santa Joana XV	489	17	74.46
Ventos de Santa Joana XVI	443	17	74.46

interview with experts in the field. All raw data were carefully verified together with specialists who are currently in charge of several wind-farms projects being installed at Piauí state; including the wind energy complex assessed in this work. Detailed calculations on primary data are provided by Costa and Agostinho [8]. All energy intensity and CO_2 equivalent factors were obtained from Ecoinvent Database v.3.1-2014 (the life cycle assessment database available at www.ecoinvent.ch) and available in Appendix A. Uncertainty analysis was not addressed in this work because single values of raw data for each system's input were considered, which implies that findings can be exclusively used to discuss about the analyzed system, and focusing on the previously established primary objectives of this study. For a future work it is intended to obtain raw data from other different wind-energy complexes and then run the Monte Carlo simulation for uncertainty analysis.

2.2 Energy Efficiency and Global Warming Potential

Sustainability is the goal for societal development – and maybe for its survival – by considering all potential problems related to overconsumption of energy and materials, as well as the increase amount of waste disposal. Based on a well-recognized sustainability indicator of ecological footprint, the Ecological Footprint Network (www.footprintnetwork.org) states that current society is living beyond the Earth's biocapacity. This claim for efforts towards a reduction of pressure that human is causing on nature. Among several indicators available on scientific literature that can subsidize decisions to achieve sustainability, the embodied energy demand and global warming potential are currently receiving special attention by society and worldwide scientific community. Due to this, and also because the evaluated system is an energy plant, the energy efficiency and global warming potential are considered as sustainability indicators in this work.

The load on environment affecting sustainability can, in general, be divided in "upstream" and "downstream"; deeper information regarding this approach can be found mainly in Ulgiati et al. [4]. "Upstream" load are related to all impacts caused far away from where the wind-farm is located, i.e. all emissions and fossil-energy demanded to make available all components existing in the wind turbines are considered. These loads are not caused by wind-farm locally, but they are caused in somewhere within the Earth and result in a load under a global perspective. For instance, Figure 2 shows that CO_2 emissions are caused by the upstream process rather than the wind-farm itself. Differently, the "downstream" loads are those ones caused locally, during system installation, operation and maintenance. In this work, as the evaluated system is a wind-energy complex that converts wind energy into electricity, the local load on environment can be considered as insignificant compared to "upstream" loads and thus it was disregarded. The methodological approaches in calculating energy efficiency and global warming potential under the "upstream" approach are following described.

Embodied Energy Analysis [9]: This method aims to evaluate the direct and indirect gross energy requirement by the system. It offers a useful indicator about the energy efficiency of the produced good or service under a large scale view, i.e. it considers all "commercial" energy embodied. Commercial energy here is related to fossil

energy. Energy intensity factors representing all fossil energy previously demanded to make available a good or service (usually in units of MJ/product) are used to convert all the systems input of matter and energy into fossil equivalent energy. In this work, the energy intensity factors provided by Ecoinvent Dataset v.3.1-2014 (www.ecoinvent.ch) are used. By adding the fossil energy equivalent of all system inputs will result in the gross energy required to generate wind-electricity, in units of MJ/kWh.

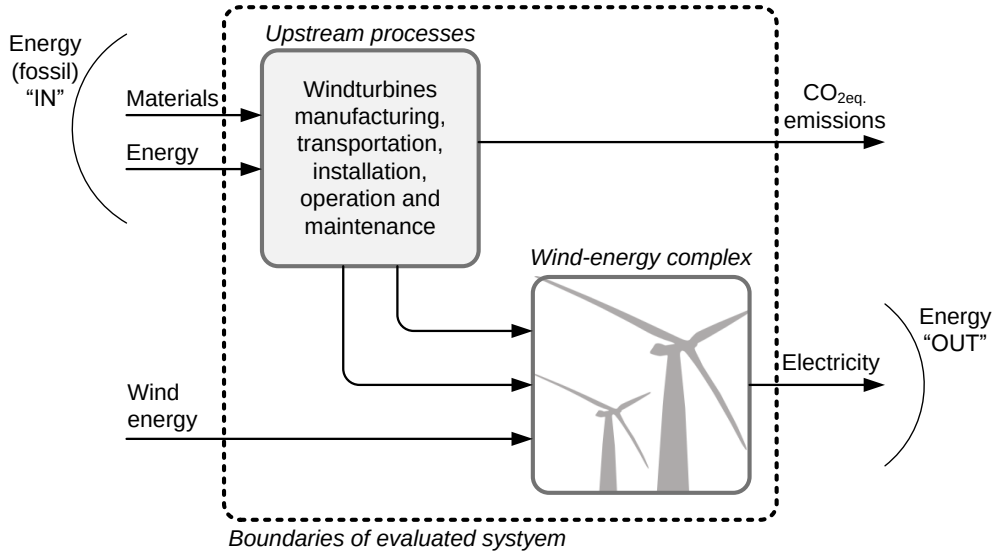


Fig. 2. Macro view of the evaluated system (dashed line) including two internal processes, the demand for materials and energy, and the outputs generated.

Global Warming Potential: Considering that evaluated wind-energy complex do not use fossil fuel or even burn any carbon-based energy resource locally to generate electricity, its emissions are located far away from where the wind-farms are installed. This "upstream" approach take into account all the indirect emissions released to make available all materials and energy used for components manufacturing, transportation, installation, operation and maintenance. For this, appropriated intensity factors provided by Ecoinvent Dataset v.3.1-2014 (www.ecoinvent.ch) that reflects the amount of CO_2 equivalent released to atmosphere were used and are available in Appendix A; those intensity factors represents all emissions that can contribute to global warming potential. Additionally, all emissions due to diesel burned during transportation phase are also accounted by considering the emission factors provided by Sheehan et al. [10] as available in Appendix B. For this, the following CO_2 equivalent factors published by Jensen et al. [11] are used: $CO_2 = 1$; $CH_4 = 62$; $N_2O = 290$; $CO = 1.6$; Hydrocarbons = 3.1. Both emission sources (indirect and direct, that occurred during transportation phase) when added provides the global warming potential in generating wind-electricity, in units of $kgCO_{2eq.}/kWh$.

3 Results and discussion

Table 2 shows the results of embodied energy and CO_2 emissions for the evaluated wind-energy complex as a whole, and to generate 1kWh of electricity as functional unit. Focusing on energy demand, fiber glass corresponds to 23% of total embodied energy, closer followed by steel (20%) and concrete (19%). While fiber glass and steel are mainly used during components manufacturing, concrete are used for wind-turbines installation. Copper and epoxy used during components manufacturing also reached a moderated importance on energy demand with 10 and 9% respectively. This indicates that aiming a reduction on fossil energy demand for the evaluated wind-energy complex, efforts should be directed to reduce the usage of fiber glass, steel and concrete mainly. The total energy embodied by the evaluated wind-energy complex is 2.04E7 MJ/yr or 0.0404 MJ/kWh.

Table 2. Fossil fuel energy rquirement and global warming potential (GWP) for the "*Chapada do Araripe*" wind-energy complex considering a 20 yrs lifespam.

Item	Amount [a]	Unit /yr	Embodied energy		GWP	
			MJ/ yr	MJ (%)	$kgCO_{2eq.}$ /yr	$kgCO_{2eq.}$ (%)
Components manufacturing						
Steel	1.05E+03	ton	4.25E+06	20.88	3.61E+05	17.32
Fiber glass	1.29E+02	ton	4.73E+06	23.24	4.03E+05	19.36
Epoxy	1.50E+01	ton	1.83E+06	9.01	1.25E+05	6.00
Copper	4.97E+01	ton	2.21E+06	10.87	2.29E+05	11.01
Aluminum	2.88E+00	ton	2.54E+04	0.12	2.42E+03	0.12
Glass	2.01E+00	ton	2.43E+04	0.12	2.22E+03	0.11
Polyester	1.73E+00	ton	1.63E+05	0.80	1.24E+04	0.60
Labor & services	1.22E+07	USD	-	-	-	-
Components transportation						
Diesel (production) [b]	4.37E+11	J	6.25E+05	3.07	4.29E+04	2.06
Diesel (usage) [b]	4.37E+11	J	-	-	4.52E+04	2.17
Steel	3.67E-02	ton	1.49E+02	<0.00	1.26E+01	<0.00
Labor & services	1.24E+06	USD	-	-	-	-
Wind-turbine installation, operation & maintenance						
Wind	7.55E+15	J	-	-	-	-
Concrete	5.98E+03	ton	3.87E+06	19.01	6.29E+05	30.21
Steel	2.19E+02	ton	8.86E+05	4.35	7.52E+04	3.61
Diesel (production) [b]	3.32E+11	J	4.75E+05	2.33	3.26E+04	1.56
Diesel (usage) [b]	3.32E+11	J	-	-	3.44E+04	1.65
Water	1.74E+03	ton	-	-	-	-
Electricity	1.04E+12	J	1.67E+04	0.08	7.32E+04	3.52
Gasoline	1.01E+12	J	1.24E+06	6.10	1.45E+04	0.70
Labor & services	1.24E+05	USD	-	-	-	-
Output electricity	5.03E+08	kWh				
Total			2.04E+07		2.08E+06	

[a] Most of raw data were obtained from Yang et al. [7], then complemented and verified by Brazilian experts which work on the wind-energy complex evaluated. [b] Diesel (production) represents the energy demand and emissions related to diesel production, while diesel (usage) represents the emissions due to diesel burning during transportation phase. Emissions from diesel burning were estimated based on the emission factors available at Appendix B and the CO_2 equivalent factors of section 2.2.

Focusing on CO_2 emissions, a different figure was obtained. Concrete is the first emitter reaching 30% of total CO_2 released to atmosphere by the evaluated wind-energy complex, followed by fiber glass (19%), steel (17%) and copper (11%). Thus, in a scenario in which CO_2 emission deserves higher attention than fossil energy demand, efforts should be done in reducing these materials. The total global warming potential for the evaluated wind-energy complex is 2.08E6 $kgCO_{2\text{-eq.}}$/yr or 4.13 $gCO_{2\text{-eq.}}$/kWh. Interesting to note that, although more than 2,500 km of covered distance by components transportation (e.g. rotor and tower are produced in the southeast region of Brazil) which demands high amount of diesel and steel for trucks, this phase can be considered as insignificant compared to components manufacturing and installation phases.

Figure 3 shows the results obtained in this work compared to others obtained from scientific literature. For both indicators, embodied energy and global warming potential, the values obtained in this work are lower than referenced values, i.e. they represent better performance. The highest value obtained from literature for energy demand was 0.4680 MJ/kWh [12], a value about 11 times higher than obtained in this work (0.0404 MJ/kWh). Similar behavior can be seen by the GWP, in which the highest value found in literature (41.2 $gCO_{2\text{-eq.}}$/kWh; Ecoinvent Database) correspond to about 10 times higher the GWP of 4.13 $gCO_{2\text{-eq.}}$/kWh obtained in this work. These comparisons are an attempt to visualize, under a macroscopic view, an order of hierarchy among the assessed wind-energy systems. However, it must be emphasized that for a deeper comparison some changes should be done to standardize the coefficient factors used and scale considered for all referenced values. For instance, most works analyzed by Lenzen and Munksgaard [13] and Ecoinvent Database have considered the equipment's decommissioning phase while the present work disregarded this phase. Anyhow, the numbers obtained in this work could be considered as promising because they show better performance than those obtained by Yang and Chen [5] and Riposo [14] who have evaluated similar systems to this present work.

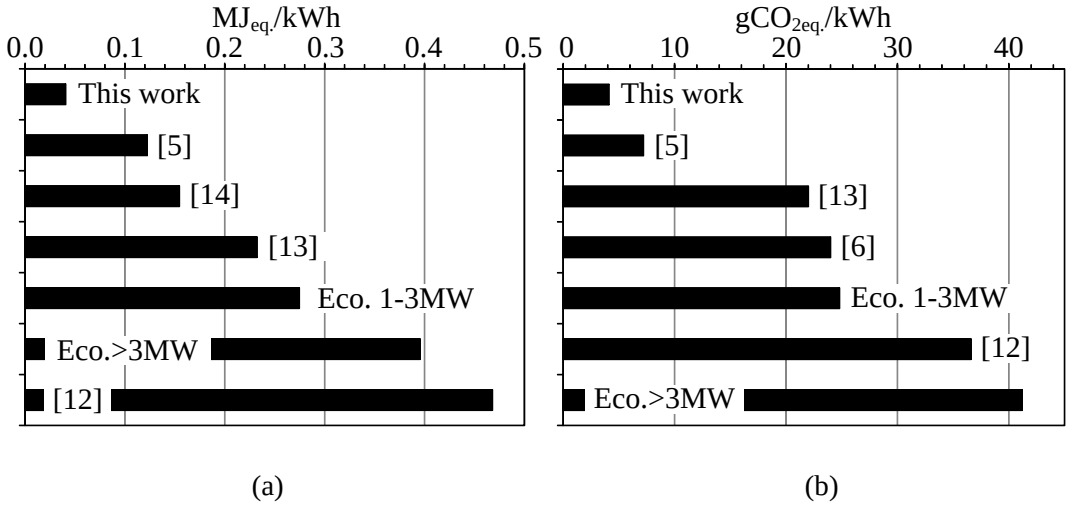


Fig. 3. Comparison of fossil embodied energy (a) and global warming potential (b) for different wind-electricity generation systems. Observations: for reference [13] a median value from 69 (embodied energy) and 29 (global warming) case studies was used; 1-3MW and >3MW indicates the installed power of systems – data Ecoinvent Database.

After calculating the GWP and embodied energy for each kWh of electricity generated by the wind-energy complex evaluated, it is important a comparison of these indicators against the largest energy source for electricity produced and used in Brazil: hydropower (reaching 71% of total). According to Brown and Ulgiati [12], hydropower releases 11.84 $gCO_{2\text{-eq.}}$ per kWh of generated electricity, a value about three times higher than for wind-electricity obtained in this work (4.13 $gCO_{2\text{-eq.}}$/kWh). Regarding the embodied energy, the same authors provides a value of 0.1516 MJ/kWh, which corresponds to about 3.7 times higher than the 0.0404 MJ/kWh obtained in this work. In short, both indicators show better performance for the wind-electricity than hydro-electricity.

It is recognized that a political decision on such important issue for the Brazilian society (energy) should consider several other indicators than exclusively GWP and energy demand. For instance, differently from hydropower, wind is a seasonal energy source that varies along year, it is impossible to storage this energy source for better management, the proper functioning of wind turbines depends on weather conditions, storms can damage wind turbines and electricity generation can become interrupted, economical aspects, social aspects, etc. Anyhow, this work presents that, considering the evaluated wind energy complex, generating electricity from wind energy results in lower global warming potential, (i.e. it releases lower amount of fossil carbon to atmosphere) and it demands lower amount of fossil energy than hydroelectricity.

4 Conclusions

The embodied energy and global warming potential for the *"Chapada do Araripe"* wind-energy complex evaluated are 2.04E7 MJ/yr and 2.08E6 $kgCO_{2\text{-eq.}}$/yr respectively. Considering the functional unit of electricity generated, values obtained were 0.0404 MJ/kWh and 4.13 $gCO_{2\text{-eq.}}$/kWh. Both numbers are lower (i.e. higher performance) than other found in scientific literature, which implies that generating electricity from wind-energy by the evaluated system demands lower amount of fossil energy and releases lower amount of greenhouse gases to atmosphere compared to referenced systems.

Comparing hydroelectricity – the highest energy source for electricity generation in Brazil, 71% – against wind-electricity, indicators show that generating electricity from hydropower demands higher amount of fossil fuel (0.1516 MJ/kWh) and releases higher amount greenhouse gases to atmosphere (11.84 $gCO_{2\text{-eq.}}$/kWh), indicating that wind-energy is an important alternative towards an economy decarbonization as envisioned by the Brazilian government for the next 30 years.

Acknowledgements. This work received financial support from the Vice-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa of Universidade Paulista (UNIP). Thanks also to CNPq Brazil (proc. no. 307422/2015-1) for the fellowship provided to second author.

References

1. Intergovernmental Panel on Climate Changes (2011), http://www.ipcc.ch.pt.mk.gd/activities/activitie s.shtml
2. Plano Nacional de Energia 2030 (Brazilian Energy Plan for 2030) (2007), http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/matriz-energetica-nacional-2030
3. Odum, H.T., Odum, E.: A prosperous way down: principles and policies. Boulder, University Press of Colorado, 326pp. (2001)
4. Ulgiati, S., Raugei, M., Bargigli, S.: Overcoming the inadequacy of single-criterion approaches to Life Cycle Assessment. Eco. Mod. 190, 432-442 (2006)
5. Yang, J., Chen, B.,: Integrated evaluation of embodied energy, greenhouse gas emission and economic performance of a typical wind farm in China. Ren. Sus. Ener. Rev. 27, 559-568 (2013)
6. Dolan, S.: Life cycle assessment and emergy synthesis of a theoretical offshore wind farm for Jacksonville, Florida. M.Sc. thesis, University of Florida (2007), http://www.cep.ees.ufl.edu/emergy/documents/dissertations_theses/Dolan_2007_LCAandEmergySynth WindFarmJax_FL_Thesis-UF.pdf
7. Yang, Q., Chen, G.Q., Liao, S., Zhao, Y.H., Peng, H.W., Chen, H.P.: Environmental sustainability of wind power: An emergy analysis of a Chinese wind farm. Ren. Sus. Ener. Rev. 25, 229-239 (2013)
8. Costa, M., Agostinho, F.: Net emergy assessment of wind-electricity generation in the Brazilian northeast region. In: Brown, M.T. et al. (eds.), Proceedings of the 9th Biennial Emergy Conference (2016), Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, USA.
9. Slesser, M. (ed.): Energy analysis Workshop on methodology and Conventions. Stockholm, Sweden, IFIAS 89pp. (1974)
10. Sheehan, J., Camobreco, V., Duffield, J., Graboski, M., Shapouri, H.: Life cycle inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus. Final Report, National Renewable Energy Laboratory, USA, NREL/SR-580-24089 (1998), http://www.nrel.gov/docs/legosti/fy98/24089.pdf
11. Jensen, A.A., Hoffman, L., Moller, B.T., Schmidt, A., Christiansen, K., Elkington, J., van Dijk, F. (eds): Life cycle assessment: a guide to approaches, experiences and information sources. European Environmental Agency (1997)
12. Brown, M.T., Ulgiati, S.: Emergy analysis and environmental accounting. Enc. Ener. 2, 329-353 (2004)
13. Lenzen, M., Munksgaard, J.: Energy and CO2 life-cycle analysis of wind turbines – review and applications. Ren. Ener. 26, 339-362 (2002)
14. Riposo, D.: Integrated energy and environmental analysis of utility-scale wind power production. M.Sc. thesis, University of Maryland (2008), http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/8598/1/umi-umd-5707.pdf

Appendix

Appendix A. Intensity factors used in this work.

Item	Unit	Intensity factors [a]		Observation
		$MJ_{eq.}$/ Unit	$kgCO_{2eq.}$/ Unit	
Wind	[b]	[b]	[b]	[b]
Steel	kg	4.05E+00	3.44E-01	Market for hot rolling, steel, GLO
Fiber glass	kg	3.67E+01	3.12E+00	Market for glass fibre, GLO
Epoxy	kg	1.22E+02	8.33E+00	Market for epoxy resin, liquid, GLO
Copper	kg	4.45E+01	4.61E+00	Market for copper, GLO
Aluminum	kg	8.82E+00	8.42E-01	Market for sheet rolling, aluminum, GLO
Glass	kg	1.21E+01	1.11E+00	Market for flat glass, uncoated, GLO
Polyester	kg	9.43E+01	7.19E+00	Market for polyester resin, unsaturated, GLO
Diesel	J	1.43E-06	9.81E-08	Diesel, burned in building machine, GLO
Concrete	kg	6.47E-01	1.05E-01	Market for concrete, 50MPa, GLO (density of 3800 kg/m^3)
Water	[b]	[b]	[b]	[b]
Electricity	kWh	5.79E-02	2.53E-01	Electricity production, hydro, reservoir, tropical region, BR
Gasoline	kg	5.53E+01	6.48E-01	Market for light fuel oil, CH (HHV of 45 MJ/kg)
L&S	[b]	[b]	[b]	[b]

[a] All intensity factors were obtained from Ecoinvent Database v.3.1-2014 (www.ecoinvent.ch); [b] Wind, Water and L&S (Labor & Services) are not accounted for both methodologies considered in this work (energy analysis and emission inventory).

Appendix B. Emission factors (in kg/MJ) affecting global warming potential from diesel oil combustion in an industrial boiler.

CO_2	CH_4	N_2O	CO	Hydrocarbons
0.0762	8.3E-8	3.7E-7	0.017	6.7E-7

Source: Sheehan et al. [10]

5 RESULTADOS COMPLEMENTARES

5.1 Contabilidade Ambiental em emergia: indicadores

A Tabela 2 do Artigo 1, que apresenta os cálculos da avaliação em emergia da geração de eletricidade foi apresentada previamente e utilizada naquele trabalho para avaliar, especificamente, o índice razão de rendimento em emergia (EYR) do complexo eólico considerado como estudo de caso. Agora, a mesma Tabela 2 é considerada para calcular os fluxos de emergia como descritos na Tabela 7 abaixo, o que possibilitou em seguida calcular os índices em emergia como apresentados na Tabela 8. Estes índices são importantes para embasar as discussões sobre o desempenho em emergia do complexo eólico avaliado.

Tabela 7 – Fluxos de emergia Parque Eólico

Sigla	Significado	Valor em E19 sej/ano
R	Recursos renováveis locais	1,90
N	Recursos não-renováveis locais	2,90
F	Recursos da economia	8,91
F*	Recursos da economia	3,16

* Recursos da economia (F) sem contabilizar Mão-de-obra e Serviços (Labor & Services)
Fonte: Elaborada pelo autor.

Tabela 8 – Índices em Emergia do complexo eólico Chapada do Piauí.

Indicador	Valor	Unidade
EYR	1,54	adimensional
EYR*	2,99	adimensional
ELR	6,23	adimensional
%R	14%	%
ESI	0,25	adimensional
EIR	1,86	adimensional

EYR * Considerado abordagem alternativa em potência máxima como apresentado na seção 3 do Artigo 1.
Álgebra e significado dos índices são encontrados na Tabela 5 da seção 3.
Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 9, apresenta os índices de alguns sistemas usados na geração de energia que foram comparados com o parque eólico o que possibilitou em seguida fazer algumas analises desses índices em emergia.

Tabela 9 – Índices de emergia para alguns sistemas usados na geração de energia

Item	%R	EYR	ELR	EIR	ESI	Referência
Eólica	**14,00**	**1,54**	**6,23**	**1,86**	**0,25**	**Esse estudo**
Biogás	66,00	2,93	0,52	0,52	5,67	Ciotola et al., 2011
Bioetanol (cana de açúcar)	31,00	1,57	2,23	1,44	0,71	Pereira e Ortega, 2010
Eólica	20,00	1,25	4,0	4,0	0,31	Yang et al., 2013
Solar Térmica	15,00	1,19	5,54	5,54	0,21	Zhang et al., 2012
Biodiesel (óleo vegetal)	6,00	3,68	3,55	3,57	1,04	Sheng et al., 2007
Biocombustível (refinaria)	2,5	1,05	3,02	0,95	0,35	Lin et al., 2012
Fotovoltaica	2,00	1,03	48,93	37,27	0,02	Paoli et al., 2008
Hidrelétrica	68,84	5,41	0,45	0,52	16,90	Brown & Ulgiati, 2004
Hidrelétrica	4,01	36,93	23,79	0,03	1,55	Wittmann, 2010
Hidrelétrica	62,26	13,59	0,61	0,08	22,28	Wittmann, 2010
Hidrelétrica	0,56	5,87	0,79	0,21	7,43	Tassinari, 2014
Hidrelétrica	0,69	6,31	0,46	0,33	13,71	Tassinari, 2014

Fonte: Elaborada pelo autor.

O índice de rendimento em emergia (EYR) obtido para o complexo chapada do Piauí de 1,54, pode ser considerado como tradicional pois aborda a mesma metodologia apresentada por Odum (1996), onde o rendimento em emergia (EYR) é dividido por toda emergia dos feedbacks da economia. Portanto nenhuma razão de rendimento de emergia liquida pode ser menor do que 1 usando esse método, essa relação de rendimento em emergia (EYR) pode ser interpretada como uma medida da contribuição do empreendimento para a economia, de acordo com Odum (1996).

O EYR considerado nesse trabalho mostra que o sistema de energia eólico avaliado consegue explorar e tornar emergia disponível para a sociedade. A mesma abordagem foi utilizada para avaliar a geração de eletricidade de parque eólica na China EYR=1.25 (YANG et al., 2013), e na Itália EYR= 5,59 (BROWN; ULGIATI, 2004), o que permite fazer comparações.

Altos valores de EYR pode significar uma situação ideal, isso quando se refere aos recursos naturais renováveis, como pode ser observado no estudo de Wittmann (2010), para UEH de Tucuruí-PA, que apresentou EYR=13,59. Na Itália Brown e Ulgiati (2004), encontraram EYR=5,41, para Usina Hidrelétrica, indicando que o uso dessas fontes tem benefícios para a sociedade. Entretanto quando essa relação é feita comparando com os trabalhos de Brown; McClanaham (1996) sobre as Hidrelétricas no Rio Mekong (considerando os sedimentos), foram encontrados

valores de 1,4 e 1,3. Tassinari (2014) usando essa mesma relação para EYR de duas hidrelétricas (tradicional e fio d´água) encontrou 1,26 e 2,17.

O índice de Carga Ambiental (ELR) de 6,23 mostra que o processo é considerado de moderado impacto ambiental, pois, segundo Brown & Ulgiati (2004), valores dentro do intervalo entre três e dez são considerados de moderado impacto e valores acima de dez são considerados de significativo impacto ambiental.

A razão de carga ambiental mede o potencial do impacto ambiental no sistema, comparando com a geração de energia eólica (ELR=6,23) com a energia solar térmica (ELR=5,54) (ZHANG et al., 2001), e energia solar fotovoltaica (ELR=48.93) (PAOLI et al., 2008), mostram que a energia eólica causa maior carga sobre o meio ambiente para produzir eletricidade do que energia solar térmica e uma menor carga que a energia solar fotovoltaica. Essa mesma relação pode ser observada, quando comparado com a energia hidráulica estuda por Wittmann (2010), onde para UEH – Balbina/AM, obteve índice de carga ambiental de 23,79.

O índice de Renovabilidade (%R) mostra que para o parque avaliado no estudo com percentual de 14%, significa baixa renovabilidade. Em longo prazo, apenas processos com alta renovabilidade são sustentáveis. O perceptual de renovabilidade de (%R=14,00%), do parque eólico é considerado baixo se comparado com (68,84%) para Hidrelétrica estuda por Brown e Ulgiati, (2004), mas apresenta uma maior renovabilidade para energia eólica em comparação com a energia solar (Térmica e fotovoltaica) que apresenta valores de 0.15 % (ZHANG et al., 2012) e 0.02% (PAOLI et al., 2008).

O índice de Investimento em emergia (EIR) de 1,86 mostra que, no parque eólico, para cada seJ de recursos naturais aplicados, 1,86 seJ de F são demandados. O valor de EIR=1,86 demonstra um alto grau de dependência do sistema na utilização de recursos externos, o mesmo resultado é observado no parque eólico da China que apresentou índice de (EIR=4,00; YANG et al., 2013), valor muito próximo do parque em estudo, o que reforça esse alto grau de dependência do sistema sobre F. Hidrelétricas o EIR mostra menor desempenho que os índices de (EIR=0.52), Brown e Ulgiati, (2004), (EIR=0.08), para UEH de Tucuruí-PA, Wittmann (2010). Mas, cabe ressaltar que energia eólica apresenta um melhor desempenho quando comparado com energia Solar Térmica (EIR=5,54) Zhang et al., (2012) e fotovoltaica (EIR=37,27), Paoli et al., (2008).

O índice de Sustentabilidade Ambiental (ESI) de 0,25 mostra um baixo desempenho para o parque eólico em estudo, pois valores de ESI entre 1 e 5 são considerados sustentáveis a médio prazo, acima de 5 são considerados de sustentabilidade de longo prazo. Como acontece para hidrelétricas, que apresentam índices de 16,90 (BROWN; ULGIATI, 2002), 7,43 e 13,71, (TASSINARI, 2014).

Na avaliação da sustentabilidade da energia eólica, os índices resultantes são comparados com a energia eólica estuda por Yang et al., (2013), que obteve resultados semelhantes, por ter adotado o mesmo método para avaliação da emergia. Outras fontes como solar térmica, fotovoltaica e Biocombustíveis também foram comparados com os resultados aqui obtidos (Tabela 8).

O índice de sustentabilidade (ESI = 0,25), da energia eólica, é menor do que a hidrelétrica, mesmo assim esse índice mostra que a energia eólica possui um melhor desempenho do que a energia solar fotovoltaica, por ter maior rendimento de emergia (YER) e menor carga ambiental (ELR).

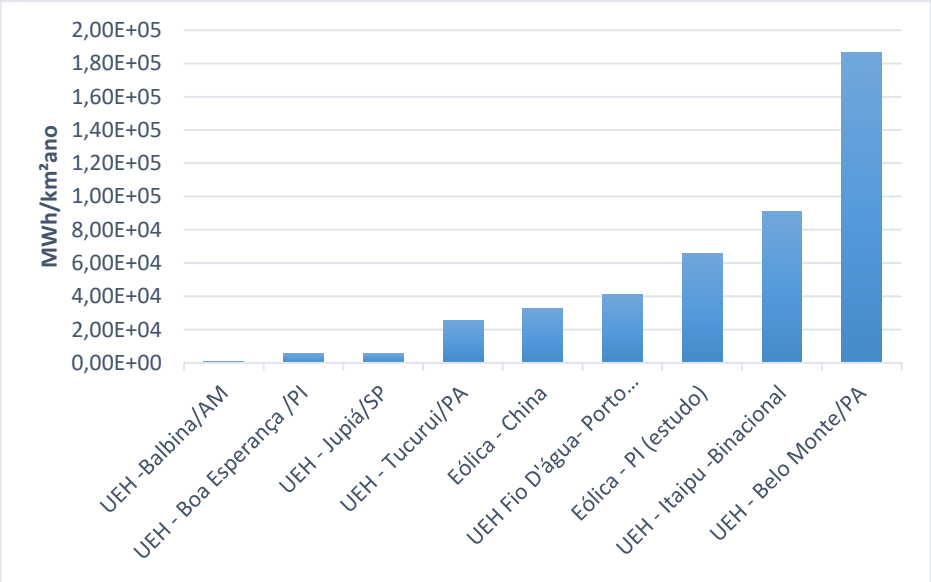
5.2 Relação entre área e eletricidade gerada

A relação entre eletricidade gerada e área ocupada é considerada como um importante indicador para comparar a eficiência energética da geração de energia eólica, hidrelétricas e outras fontes.

Na avaliação do complexo eólico e comparado com a energia de hidrelétricas gerada no Brasil, os índices mostram que, mesmo exigindo uma maior quantidade de combustível fóssil e liberando maior quantidade de gases de efeito estufa para a atmosfera, ainda assim, todos ou a maioria dos índices em emergia são melhores para a hidrelétrica, apresentando um melhor desempenho do que a energia eólica.

Para melhor explicar essa relação energia eólica e energia hidráulica para geração de eletricidade, esse presente estudo faz a relação da energia gerada em MWh/ano pela área ocupada em km². O que chamamos de indicador de área (IA), com está representado na figura 21.

Figura 21 – Indicador de área (MWh/Km²ano)



Fonte: Autor.

O gráfico mostra a relação da energia gerada pela área ocupada, o que permite fazer a relação do parque eólico estudado com as maiores fontes de geração de energia no Brasil que são as Hidrelétricas de Itaipu e Belo Monte, que apresenta uma melhor eficiência. As demais UHE, tem menor eficiência que o parque eólico, quando comparado o MWh/ano com a área ocupada.

O indicador de área (IA) mostra que os parques eólicos ocupam uma menor área que as hidrelétricas, mas menor desempenho quando comparado com o MWh/ano gerado. A Usina de Itaipu que ocupa área de 1350 km² e gera 1.23E+08 MWh/ano, para 1.76E+06 do Parque eólico Chapada do Piauí que ocupa uma área de 25.88 km²/ano. O que mostra que para esse indicador a energia gerada pela hidrelétrica ainda é melhor que a energia eólica estudada.

6 CONCLUSÕES

O uso da contabilidade ambiental em emergia, energia incorpora e o indicador potencial de aquecimento global permitiu avaliar o desempenho energético-ambiental de um sistema de energia eólica para geração de eletricidade. Foram feitas comparações com outros estudos, que consideraram diferentes fontes de geração de energia, principalmente a hidráulica. Com os resultados obtidos pode-se concluir:

(a) A energia incorporada e potencial de aquecimento global do complexo eólico avaliado são 2,04E7 MJ/ano e 2,08E6 kg$CO2_{-eq.}$/ano respectivamente. Considerando a unidade funcional de eletricidade gerada, os valores obtidos foram 0,0404 MJ/kWh e 4,13 g$CO2_{-eq.}$/kWh. Ambos os números são mais baixos, ou seja, possuem melhor desempenho, do que outros encontrados na literatura científica para energia eólica, variando de 0,1224 MJ/kWh (YANG; CHEN, 2013), e 0,4680 MJ / kWh (Brown e Ulgiati, 2004). O mesmo desempenho pode ser visto no potencial de aquecimento global, com o menor valor encontrado (7.2 gCO2-eq./kWh; YANG; CHEN, 2013), e (41,2 gCO2-eq./kWh; Ecoinvent Banco de Dados), um valor que correspondente a cerca de 10 vezes o encontrado nesse estudo. Comparando o complexo eólico avaliado com energia de hidroelétricas gerada no Brasil, os indicadores mostram que as hidrelétricas exigem maior quantidade de combustível fóssil (0,1516 MJ/kWh) e liberam maior quantidade de gases de efeito estufa para a atmosfera (11,84 gCO2-eq./kWh) o que implica dizer que a geração de eletricidade a partir de energia eólica pelo sistema avaliado exige menor quantidade de energia fóssil e libera menor quantidade de gases de efeito estufa para a atmosfera por kwh gerado em comparação com sistemas referenciados.

(b) A UEV obtida para a energia eólica gerada pelo complexo chapada do Piauí de 60.000 sej/J indica maior eficiência global na conversão de recursos em eletricidade em comparação com outras fontes usuais como as energias renováveis (hidrelétrica e biomassa), e não renováveis de combustíveis fóssil (óleo, carvão, gás natural, nuclear), que variam de 100.000 a 400.000 sej/J. Isso indica que em termos de eficiência global a

energia eólica se torna uma alternativa para o planejamento energético do Brasil, e para o crescimento da matriz energética de maneira eficiente focando na demanda e disponibilidade de recursos globais.

(c) A energia eólica possui energia liquida positiva, logo ela consegue disponibilizar emergia liquida para a sociedade por emergia investida da economia (EYR = 1,54), por outro lado, o índice de rendimento em emergia das hidrelétricas (EYR= 5,4) mostram melhor desempenho do que a energia eólica. Isso reforça a importância da abordagem multicritério na avaliação energético-ambiental destes tipos de sistemas de geração de energia, pois dificilmente haverá um sistema que possua melhor desempenho para todos os índices (sistema win-win).

Conclui-se que a geração de eletricidade através da energia eólica deve ser incentivada, porque possui bom desempenho na redução de emissões, aumento da eficiência energética e em emergia quando comparada à outras fontes de geração de eletricidade. Desta forma, a energia eólica poderia ser considerada como uma alternativa importante no sentido de reduzir os gases do efeito estufa (GEE), e para a economia como previsto pelo governo brasileiro para os próximos 30 anos.

No entanto, recomenda-se que essa importante fonte de geração de energia deve ser usada como complemento da matriz energética atual, pois a hidrelétrica obteve alguns indicadores melhores como o MW/área.

7 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Durante o desenvolvimento deste trabalho algumas ideias surgiram com o objetivo de expandir o alcance dos resultados aqui obtidos. Enquanto algumas ideias foram incorporadas, outras não foram devido à falta de tempo (pois sugere-se que o mestrado possui como tempo limite dois anos) e/ou devido à falta de dados primários que permitissem, até este momento, inserir e desenvolver estas ideias. Neste sentido, pensando em uma continuidade desta pesquisa, sugere-se aqui algumas propostas para serem fortuitamente desenvolvidas em outros trabalhos:

(a) Em relação à escala ou fronteiras do sistema estudado, poder-se-ia ampliar suas fronteiras para considerar também a subestação de eletricidade e linhas de transmissão. Talvez esta ampliação estaria mais alinhada aos estudos de ciclo de vida como usualmente realizados e encontrados em literatura científica.

(b) Com auxílio de dados de literatura, aprofundar o estudo da relação entre os indicadores aqui considerados com a área necessária para a geração de eletricidade, considerada como um importante indicador para a tomada de decisão. Para isso, maior quantidade de dados de literatura são necessários para elaborar gráficos e fazer comparações estatísticas.

(c) Utilizar outras ferramentas de tomada de decisão para estudar o melhor local para instalar as fazendas eólicas. Talvez, diferentes localidades geográficas resultem em diferentes indicadores de desempenho energético-ambiental comparados aos obtidos neste trabalho.

(d) Talvez a implantação das indústrias de máquinas e equipamentos utilizados nos parques eólicos próximas ao local de geração, seja uma alternativa para diminuir os custos econômicos e energéticos, principalmente pela dificuldade com transporte de equipamento de grande porte o que reduziria o consumo do diesel e outros custos utilizado nessa fase.

(e) Considerar os recursos não renováveis da natureza (N) da Tabela 2 do artigo 1 (seção 4.1) que não foram contabilizados neste momento, como morcegos, pássaros, etc.

REFERÊNCIAS

AGOSTINHO, F.; BERTAGLIA, A. B. B.; ALMEIDA, C. M. V. B.; GIANNETTI, B. F., 2014. **Influence of cellulase enzyme production on the energetic-environmental performance of lignocellulosic ethanol.** Ecological Modelling, 2014, http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.09.005.

AGOSTINHO, F.; PEREIRA, L. Support area as an indicator of environmental load: comparison between embodied energy, ecological footprint, and emergy accounting methods. **Ecological Indicators,** v. 24, p. 494-503, 2013.

AGOSTINHO, F.; SICHE, R. Hidden costs of a typical embodied energy analysis: Brazilian sugarcane ethanol as case study. **BiomassandBioenergy,** v. 71, p. 69-83, 2014.

AGOSTINHO, Feni Dalano Roosevelt. **Estudo da sustentabilidade dos sistemas de produção agropecuários da bacia hidrográfica dos rios Mogi-Guaçú e Pardo através da análise emergética.** Diss. Tese de doutorado. Unicamp, Campinas, 2009.

AGOSTINHO, FENI; ORTEGA, ENRIQUE; ROMEIRO, ADEMAR. Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente & sociedade,** v. 10, n. 2, p. 137-148, 2007.

ALVES, Jose Jakson Amancio. Análise regional da energia eólica no Brasil. **Revista Brasileira de Gestão e Desenvolvimento Regional,** v. 6, n. 1, 2010.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica,** 2ª edição - Energia Eólica, 2002. Disponível em <http://www.aneel.gov.br/arquivos/pdf/livro_atlas.pdf>. Acesso em: 16 mar. 2016.

BARBOSA, Ana Carolina Lourenzi. **Avaliação ambiental do uso de energia eólica para usuários de pequeno porte**, 2008.

BARRELLA, F. A.; ALMEIDA, C. M. V. B.; GIANETI, B. F. Ferramenta para a tomada de decisão. **Revista Produção,** v. 15, n. 1, p. 087-101, Jan./Abr. 2005.

BEN. **Brazilian Energy Balance 2015, year 2014.** Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Rio de Janeiro, 2015. Disponível em: <https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf>. Acesso em: 25 ago. 2015.

BITTENCOURT, C. M. A. **A informação e os indicadores de sustentabilidade: um estudo de caso no observatório regional base de indicadores da sustentabilidade metropolitana de Curitiba** – ORBIS MC. 2006. 235f. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

BRASIL. **Balanço Energético Nacional,** 2014: ano base 2013. Empresa de Pesquisa Energética, EPE–Empresa. Ministério de Minas e Energia, 2014.

BRASIL. **Matriz Energética Nacional 2030,** Ministério de Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Brasília, 2007. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/web/guest/publicacoes-e-indicadores/matriz-energetica-nacional-2030>. Acesso em: 25 ago. 2015.

BRASIL. **Plano decenal de expansão de energia 2023**, Ministério de Minas e Energia (MME), Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Brasília, 2014. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/ Estudos/Documents/PDE2023.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2015.

BROWN, M. T.; PROTANO, G.; ULGIATI, S. Assessing geobiosphere work of generating global reserves of coal, crude oil, and natural gas. **Ecological Modelling,** v. 222, p. 879-887, 2011.

BROWN, M. T.; RAUGEI, M.; ULGIATI, S. On boundaries and investments in emergy synthesis and LCA: A case study on thermal vs. photovoltaic electricity. **Ecological Indicators,** v. 15, p. 227-235, 2012..

BROWN, M. T.; ULGIATI, S. **Emergy analysis and environmental accounting. Encyclopedia of Energy 2**, p. 329-353, 2004.

BROWN, M. T.; ULGIATI, S. Emergy-based indices and ratios to evaluate sustainability: monitoring economies and technology toward environmentally sound innovation. **Ecologicalengineering,** v. 9, n. 1, p. 51-69, 1997.

BUENFIL, A. A. **Emergy evaluation of water.** PhD Thesis, University of Florida, USA, Gainesville, 2001.

BURANAKARN, V. Evaluation of recycling and reuse of building materials using the emergy analysis method. PhD. thesis, University of Florida, Gainesville, USA, 1998.

BURGENMEIER, B.; JANUSZ DOMINIK; JOSEF ZEYER. Topics of presentations for Sino-Swiss Workshop on Environment/Sustainability November, 2005.

CÂMARA, CARLOS FERNANDO. **Sistemas Fotovoltaicos conectados à rede elétrica**. Universidade Federal de Lavras, UFLA, MG, 2011.

CAMPBELL, E. T.Emergy analysis of emerging methods of fossil fuel production. **Ecological Modelling,** 2014, http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.10.036.

CARDOSO, Gustavo Dias. **Análise da influência da variação do vento na qualidade da energia elétrica em uma unidade eólica empregando-se o ATP,** 2016.

CEPEL, Eletrobras. **Manual de referencia-modelo NEWAVE.** Technical report, Centro de Pesquisas de Energia Eletrica, 2001.

CEPEL. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro,** 2001. Disponível em: <http://www.cresesb. cepel.br/publicações/index.php?task=livro&cid=1>. Acesso em: 18 maio. 2016.

CHEN, G. Q., Q.; YANG, Y. H. ZHAO. Renewability of wind power in China: a case study of nonrenewable energy cost and greenhouse gas emission by a plant in Guangxi. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 15, n. 5, p. 2322-2329, 2011.

CIOTOLA, Richard J.; LANSING, Stephanie; MARTIN, Jay F. Emergy analysis of biogas production and electricity generation from small-scale agricultural digesters. **Ecological engineering,** v. 37, n. 11, p. 1681-1691, 2001.

CLEVELAND C. Net Energy From The Extraction of Oil and Gas in The United States. **Energy,** v. 30, p. 769-778, 2005.

COHEN, M. J.; SWEENEY, S.; BROWN, M. T. **Computing the unit emergy value of crustal elements.** In: Emergysyntheis 4, theory and applications of the emergy methodology. Proceedings of the 4th Biennial Emergy Research Conference, Gainesville, University of Florida, 2007. Available at <http://www.cep.ees.ufl.edu/emergy/conferences/index.shtml>. Accessed on August 24th 2015.

CRESESB. **Centro de referência para energia solar e eólica** Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/content.php?catid=3#cap__8>. Acesso em: 16 mar. 2016.

CUSTÓDIO, R. S. **Energia Eólica para produção de energia elétrica.** 1ªed. Ed.Eletrobrás. 2009.

DA SILVA PEREIRA, Raquel. Reseña de “Energia e desenvolvimento sustentável" de GOLDEMBERG, José. **Gestão & Regionalidade,** v. 27, n. 79, p. 124-126, 2011.

DALY, H. E. **Steady-State Economics,** Freeman, São Francisco, 1977.

DAROS, Higor Brusch. **Integração de fontes de energia renováveis,** 2013.

DE OLIVEIRA, Leandro Dias. **Da ECO-92 à RIO+ 20:** uma breve avaliação de duas décadas. Boletim Campineiro de Geografia, v. 2, n. 3, p. 479-499, 2013.

DEMETRIO, Fernando Jorge Cutrim. **Avaliação de sustentabilidade ambiental do Brasil com a contabilidade em emergia.** Diss. Universidade Paulista, 2011.

ELS, Rudi Henri Van. **Sustentabilidade de projetos de implementação de aproveitamentos hidroenergéticos em comunidades tradicionais na Amazônia: Casos no Suriname e Amapá,** 2010.

FERRAZ, J. M. G. **As dimensões da Sustentabilidade e seus indicadores.** In: Indicadores de Sustentabilidade em Agroecossistemas. Editores: MARQUES, J. F.; SKORUPA, L. A.; FERRAZ, J. M. G. EMBRAPA, Jaguariúna, SP. p 17-35, 2003.

GEO 5. **Environment for the future we want.** Neeyati Patel, 2014.

GIANETTI, B. F.; NEIS, A. M.; BONILLA, S. H.; ALMEIDA, C. M. V. B. **Decisões e Sustentabilidade Ambiental,** cap. 19, p. 315-336. Qualidade e Competência nas decisões. Pedro Luiz de Oliveira Costa Neto, coordenador. São Paulo: Editora Blucher, 2007.

GIANNETTI, B. F.; AGOSTINHO, F.; MORAES, L. C.; ALMEIDA, C. M. V. B.; ULGIATI, S. Multicriteria cost-benefit assessment of tannery production: the need for breakthrough process alternatives beyond conventional technology optimization. **Environmental ImpactAssessmentReview,** v. 54, p. 22-38, 2015.

GLOBAL, WIND ENERGY COUNCIL-GWEC. **Global wind report: annual market update 2010.** *GWEC, Brussels,* 2010.

GOLDEMBERG, J. (Coord.). **Energia e desenvolvimento sustentável.** Série sustentabilidade. São Paulo: Blucher, 2010. v. 4.

GOLDEMBERG, J.; LUCON, O. **Energia, meio ambiente e desenvolvimento.** 3. ed.(revista e ampliada). São Paulo: EDUSP, 2011.

GOLDEMBERG, J.; Villanueva, L. D. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento.** Edusp. São Paulo, 2003.

GOLDEMBERG, José. Energia e Sustentabilidade. **Revista de Cultura e Extensão USP,** v. 14, p. 33-43, 2015.

GOLDEMBERG, José. O estado atual do setor elétrico brasileiro. **Revista USP,** n. 104, p. 37-44, 2015.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. **Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento. Editora da Universidade de São Paulo.** São Paulo, 2007.

GUZZI, Anderson, et al. Composição e dinâmica da avifauna da usina eólica da praia da Pedra do Sal, Delta do Parnaíba, Piauí, Brasil. **Iheringia Série Zoologia,** v. 105, n. 2, 2015.

GWEC, Global Wind Energy Council. **Global wind report, annual market update,** 2011.

HERENDEEN, R. Embodied energy, embodied everything... now what. *Advances in Energy Studies. **Energy Flows in Ecology and Economy*****,** p. 13-48, 1998.

HEUN, M.; WIT, M. Energy Return on (Energy) Invested (EROI), Oil Prices, and Energy Transition, **Energy policy,** v. 40, p. 147-158, 2012.

HU, Y.; HALL, C.; WANG, J.; FENG, L.; POISSON, A. Energy Return On Investment (EROI) of China´s Conventional Fossil Fuels: Historical and Future Trends, **Energy,** p. 1-13, 2013.

HU, Y.; HALL, C.; WANG, J.; FENG, L.; POISSON, A. Energy Return On Investment (EROI) of China´s Conventional Fossil Fuels: Historical and Future Trends, **Energy,** p. 1-13, 2013.

HUANG, Yu-Fong; XING-JIA, Gan; PEI-TE, Chiueh. Life cycle assessment and net energy analysis of offshore wind power systems. **Renewable Energy,** v. 102, p. 98-106, 2016.

IGNATIOS, Miguel. **Um governo auto-suficiente. Gazeta Mercantil,** 11 maio 2006, p.-3.

JENSEN, I. S. et al. Soil surface CO2 flux as na index of soil respiration in situ: a comparison of two chamber methods. **Soil Biology and Biochemistry,** v. 28, p. 1297-1306, 1996.

LCA. **Life Cycle Assessment:** a guide to approaches, experiences and information sources European Environment Agency. JENSEN, A. A.; HOFFMAN, L.; MOLLER, B. T.; SCHMIDT, A.; CHRISTIANSEN, K.; ELKINGTON, J.; VAN DIJK, F. (Editores), 1997

LIN, Bin-Le; MASAYUKI SAGISAKA. Sustainability assessment of bioethanol and petroleum fuel production in Japan based on emergy analysis. **Energy policy**, v. 44, p. 23-33, 2012.

LIRA, Marcos Antonio Tavares; MOITA NETO, José Machado. Energia para o desenvolvimento: o cenário piauiense. **RDE-Revista de Desenvolvimento Econômico,** v. 15, n. 27, 2013.

LIRA-BARRAGAN, L. F.; PONCE-ORTEGA, J.; SERNA, M. et al. Optimal design of process energy systems integrating sustainable considerations. **Energy,** v. 76, p. 139-160, 2014.

MARRANGHELLO, M.; CONSUL, R. A. Uso da Energia Eólica no Estado do Rio Grande do Sul. Revista do Centro de Tecnologia da Ulbra. Rio Grande do Sul: **ULBRA,** vol. 5, nº1, 2004.

MARTINS, F. R.; GUARNIERI, R. A.; PEREIRA, E. B. O aproveitamento da energia eólica. **Revista Brasileira de Ensino de Física,** v. 30, n. 1, p. 1304, 2008.

MATHIAS, M. C. P. P. **A Formação da Indústria Global de Gás Natural: Definição, Condicionantes e Desafios,** Tese de D. Sc., COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 2008

MONZONI, Mario. **Diretrizes para formulação de políticas públicas em mudanças climáticas no Brasil,** 2009.

MOSTAFAEIPOUR, Ali. **Productivity and development issues of global wind turbine industry.** INTECH Open Access Publisher, 2011.

N3E. **Energia eólica no Brasil e no mundo.** Núcleo de Estudos Estratégicos de Energia, SPE/MME, edição 22/12/2014. Disponível em: <www.mme.gov.br>. Accesso em: 26 ago. 2015.

OCÁCIA, G. C. Energia Eólica - Estado da Arte e Algumas Projeções. **Revista do Centro de Tecnologia da Ulbra.** Rio Grande do Sul: ULBRA, vol. 3, nº2, 2002.

ODUM, Eugene P. **Input management of production systems.** *Science (Washington),* v. 243, n. 4888, p. 177-182, 1988.

ODUM, H. T. 2000. **Folio #2:** Emergy of Global Processes. Handbook of Emergy Evaluation. Center for Environmental Policy, University of Florida, Gainesville, FL., 2000. Disponível em: <http://www.emergy systems.org/folios.php>. Acesso em: 06 ago. 2015.

ODUM, H. T. **Environmental Accounting:** Emergy and Environmental Decision Making John Wiley and Sons. New York, 1996.

ODUM, H. T.; ODUM, E. C. **A prosperous way down: principles and policies. Boulder,** University Press of Colorado, 326p., 2001.

OLIVEIRA, L. D. Da Eco 92 à Rio+20: uma breve avaliação de duas décadas. **Boletim Campineiro de Geografia,** vol 2, n. 3, p. 479-499, 2012.

OLIVEIRA, M.; Agostinho, F. **Avaliação Energético-Ambiental de Sistemas de Produção de Leite na Região Sul de Minas Gerais:** Extensivo Versus “Minas Leite”. *Proceedings of 4th International Workshop Advances in Cleaner Production, São Paulo, Brasil*. 2013.

ORTEGA, E. **Análise Emergética: Uma ferramenta para quantificar a Sustentabilidade dos agroecossistemas.** In: Engenharia Ecológica e Agricultura Sustentável. Organizador: Ortega, E., 2003. Disponível em: http://www.fea.unicamp.br/docentes/ortega/livro/index.htm. Acesso em: 12 set. 2015.

ORTEGA, E.; BASTIANONI, S. **Under review. Open issues in emergy methodology.** In: Brown et al. (editors), Proceedings from the 8th Biennial Emergy Conference, Gainesville, University of Florida, USA, 2014.

PAOLI, Chiara; VASSALLO, Paolo; FABIANO, M. Solar power: an approach to transformity evaluation. **Ecological engineering,** v. 34, n. 3, p. 191-206, 2008.

PEREIRA, Consuelo L. F.; ORTEGA, Enrique. Sustainability assessment of large-scale ethanol production from sugarcane. **Journal of Cleaner Production,** v. 18, n. 1, p. 77-82, 2010.

RAUGEI, M.; BARGIGLI, S.; ULGIATI, S. **Emergy “yield” ratio:** Problems and misapplications. In: Brown et al. (editors), Proceedings from the 3rd Biennial Emergy Conference, Gainesville, University of Florida, USA, 2005.

RAUGEI, Marco; Pere Fullana-i-Palmer; Vasilis Fthenakis. The energy return on energy investment (EROI) of photovoltaics: Methodology and comparisons with fossil fuel life cycles. **Energy Policy,** v. 45, p. 576-582, 2012.

RIBEIRO, Henrique César Melo; PIEROT, Roselane Moita; CORRÊA, Rosany. Projeto de mecanismo de desenvolvimento limpo: um estudo de caso na empresa de energia eólica do estado do Piauí. REUNIR: **Revista de Administração,** Contabilidade e Sustentabilidade, v. 2, n. 2, p. 61-75, 2012.

RIOS, Alexandre de Souza. **Estudo do envelhecimento acelerado em materiais compósitos revestidos com poliuretano aplicados em aerogeradores,** 2012.

RIPOSO, D.**Integrated energy and environmental analysis of utility-scale wind power production.** M.Sc. thesis, University of Maryland, 2008. Disponível em: <http://drum.lib.umd.edu/bitstream/1903/8598/ 1/umi-umd-5707.pdf>. Accesso em: 19 Jun. 2015.

RÜNCOS, F.; CARLSON, R.; KUO-PENG, P.; VOLTOLINI, H.; BATISTELA, N. J. **Características, vantagens e desvantagens das atuais tecnologias.** Eletricidade Moderna. São Paulo: Aranda, 2005.

SCHULTZ, D. J.; AMARANTE, O. A. C.; ROCHA, N. A.; BITTENCOURT, R. M.; SUGAI, M. R. V. B. Sistemas Complementares de Energia Eólica e Hidráulica no Brasil. **Revista Técnico Científica da Área de Energia.** Paraná: COPEL, nº3, 2005.

SÉRGIO DE SALVO BRITO. **Tutorial de Energia Eólica.** 2008.

SHEEHAN, John et al. **Life cycle inventory of biodiesel and petroleum diesel for use in an urban bus.** Final report. No. NREL/SR--580-24089. National Renewable Energy Lab., Golden, CO (US), 1998.

SHENG, Liu, et al. Emergy Evaluation of a Kind of Biodiesel Production System and Construction of New Emergy Indices [J]. **Journal of Nanjing University** (Natural Sciences) 2 P. 000, 2007.

SICHE, R.; AGOSTINHO, F.; ORTEGA, E.; ROMEIRO, A. Índices versus indicadores: precisões conceituais na discussão da sustentabilidade de países. **Ambiente & Sociedade,** X, p.137-148. 2007.

SILVA, N. F. da et al., **Expansion of Wind Energy in Brazil:** Perceptions of Communities. In DEWEK Bremen International Technical Wind Energy Conference, 2012. Disponível em: <http://www.researchgate.net/publication/266731539 _Expansion_of_Wind_Energy_in_Br azil_Perceptions_of_Communities>. Acesso em: 5 de junho 2015.

SLESSER, Malcom. Energy analysis in technology assessment. ***Technology Assessment* 2**.3, p. 201-208, 1974.

SZARGUT, J.; MORRIS, D. R., 1998. In: STEWARD, F. R. (Ed.), **Exergy Analysis of Thermal, Chemical, and Metallurgical Processes.** Hemisphere, New York, NY, USA, 332p., 1998.

TASSINARI, Celso Aurélio. Avaliação em emergia da geração de hidreletricidade em usinas convencionais. Tese de Doutorado. Universidade Paulista, 2014.

TOLMASQUIM, Maurício T. et al. **Alternativas Energéticas Sustentáveis no Brasil.** Editora Relume Dumará. Rio de Janeiro, 2004.

ULGIATI, S.; BARGIGLI, S.; RAUGEI, M. **Dotting the I's and crossing the T's emergy synthesis:** Material flows, information and memory aspects, and performance indicators. In: Brown et al. (editors), Proceedings from the 3rd Biennial Emergy Conference, Gainesville, University of Florida, USA, 2005.

ULGIATI, S.; BROWN, M. T. Labor and services as information carriers in emergy-LCA accounting. J. Environ. **Account. Manag,** v. 2, n. 2, p. 163-170, 2014.

ULGIATI, S.; BROWN, M. T. Quantifying the environmental support for dilution and abatement of process emissions: the case of electricity production. **Journal of Cleaner Production,** v. 10, 335-348, 2002.

ULGIATI, S.; BROWN, M. T., Labor and services as information carriers in emergy-LCA accounting. **Journal of Environmental Accountingand Management 2**, p. 160-167, 2014.

ULGIATI, Sergio; RAUGEI, Marco; BARGIGLI, Silvia. Overcoming the inadequacy of single-criterion approaches to Life Cycle Assessment. **Ecological Modelling**, v. 190, n. 3, p. 432-442, 2006.

UNEP. **Unep Annual Report. 1972-2012 - Serving people and the planet.** 2012. Disponível em: <http://www.unep.org/gc/gc27/docs/UNEP_ANNUAL_REPORT_2012.pdf>. Acesso: 25Out. 2014.

VILLALOBOS, J.; FELIPE, A. Fundaciones para turbinas eólicas costa afuera. **Rev. Ing. Constr.,** v. 24, n. 1, p. 33-38, 2009.

WITTMANN, Douglas. **Contribuição para avaliação de impactos ambientais causados pela geração de hidroeletricidade na Amazônia.** Diss. Universidade Paulista, 2010.

WWF-Brasil. **Agenda elétrica sustentável 2020:** estudo de cenários para um setor elétrico brasileiro eficiente, seguro e competitivo, vol. 12, 2ª Ed., Brasília, 2007.

YANG, Jin, CHEN,Bin. Emergy-based sustainability evaluation of wind power generation systems. **Applied Energy**, v. 177, p. 239-246, 2016.

YANG, Jin; CHEN, Bin. Integrated evaluation of embodied energy, greenhouse gas emission and economic performance of a typical wind farm in China. **Renewable and Sustainable Energy Reviews,** v. 27, p. 559-568, 2013.

YANG, Q.; CHEN, G. Q.; LIAO, S.; ZHAO, Y. H.; PENG, H. W.; CHEN, H. P. Environmental sustainability of wind power: An emergy analysis of a Chinese wind farm. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 229-239, 2013.

ZHANG, Meimei et al. Embodied energy and emergy analyses of a concentrating solar power (CSP) system. Energy Policy, v. 42, p. 232-238, 2012.

ZHOU, J. B. et al. Emergy evaluations for constructed wetland and conventional wastewater treatments. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation,** v. 14, n. 4, p. 1781-1789, 2009.

APENDICE

Apêndice A – Memorial de cálculo dos fluxos de emergia para perda do solo

Perda de solo (matéria orgânica)

Perda de solo= (kg solo).ha-1.ano-1

Matéria orgânica= 0,04 (kg m.o.).(kg solo) -1 (4%) (Odum,1996)

Energia da m.o.= 5400 kcal.(kgm.o.) -1 (Odum, 1996)

Conversão= (kg solo/ha.ano) *(kg m.o./kg solo) *(kcal/kg m.o.) *(4186 J. kcal-1)

Fluxo de energia= J.ha-1.ano-1

Área Chapada do Piauí = 25.88km² = 25880000m²

Profundidade do solo fértil = 2,0cm = 0,2m

Volume de terra adquirida = 25.880.000 * 0,2 = 5.176.000m³

Fluxo de energia referente ao recurso não renovável (solo)

Fluxo N=5176000m³ = (1000/kg/m/³)*(0.04kgm.o./kgsolo)*(5400kcal/kgm.o.)*(4186J/kcal)

Fluxo N=4,68.10^{15} J/20 anos vida útil = 2,34.10^{14} J/ano

Fluxo de emergia referente a N=2,34.10^{14} * 1,24.10^{5} sej/J = 2,90.10^{19} seJ/ano.

Apêndice B – Tabela de dados utilizados para analise em emergia

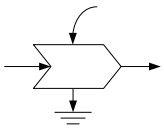
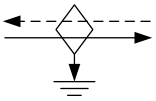
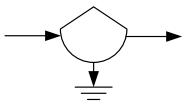
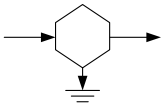
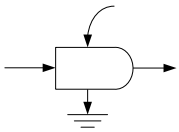
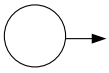
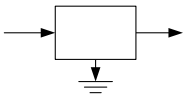
Note	Description	Amount	Unit/yr	UEV (seJ/Unit)	Emergy (seJ/yr)	Emergy (%)
"I" - NATURAL RESOURCES						
1	wind	7.55E+15	J	2.51E+03	**1.90E+19**	13.84
"II" - NATURAL RESOURCES NÃO RENOVAVEIS						
2	Erosão do Solo	2.34E+14	J	1.24E+05	**2.90E+19**	21.16
"F" - RESOURCES FROM ECONOMY						
Components manufacturing						
2	steel	1.05E+03	ton	7.81E+15	8.20E+18	5.98
3	fiber glass	1.29E+02	ton	1.32E+16	1.70E+18	1.24
4	epoxy	1.50E+01	ton	5.51E+15	8.27E+16	0.06
5	copper	4.97E+01	ton	9.80E+16	4.87E+18	3.55
6	aluminum	2.88E+00	ton	2.13E+16	6.13E+16	0.04
7	glass	2.01E+00	ton	1.29E+16	2.59E+16	0.02
8	polyester	1.73E+00	ton	5.51E+15	9.53E+15	0.01
9	labor & services	1.22E+07	USD	4.24E+12	5.17E+19	37.72
Components transportation						
10	diesel	4.37E+11	J	1.81E+05	7.91E+16	0.06
11	steel	3.67E-02	ton	7.81E+15	2.87E+14	0.00
12	labor & services	1.24E+06	USD	4.24E+12	5.26E+18	3.83
Wind-turbine installation & maintenance						
13	concrete	5.98E+03	ton	2.42E+15	1.45E+19	10.55
14	steel	2.19E+02	ton	7.81E+15	1.71E+18	1.25
15	diesel	3.32E+11	J	1.81E+05	6.01E+16	0.04
16	water	1.74E+03	ton	3.27E+11	5.69E+14	0.00
17	electricity	1.04E+12	J	1.47E+05	1.53E+17	0.11
18	gasoline	1.01E+12	J	1.87E+05	1.89E+17	0.14
19	labor & services	1.24E+05	USD	4.24E+12	5.26E+17	0.38
	output electricity	1.81E+15	J			
	total emergy (with labor & services)				1.37E+20	
	total emergy (without labor & services)				7.96E+19	
	wind electricity (with labor & services)			7.56E+04		
	wind electricity (without labor & services)			4.39E+04		

It was assumed a 20 yrs of lifespam according to Yang and Chen (2013)

All UEVs are update for a 15.83E24 seJ/yr emergy budget and do not account for labor & services

ANEXOS

Anexo A. Símbolos utilizados para elaborar diagramas de energia

Símbolo	Significado
	Fluxo de Energia: Um fluxo cuja vazão é proporcional ao volume do estoque ou à qualidade da fonte que o produz.
	Interação: Intersecção de dois fluxos para produzir uma saída em proporção a uma função de ambos ou controle de ação de um fluxo sobre outro.
	Transação: Uma unidade que indica a venda de bens ou serviços (linha contínua) em troca de um pagamento em dinheiro (linha tracejada).
	Depósito: Uma reserva energética dentro do sistema, que guarda uma quantidade de energia de acordo com o balanço de entrada e saída.
	Consumidor: Unidade que transforma a qualidade da energia, armazena e retro-alimenta energia à etapa anterior (sistema autocatalítico) para melhorar o fluxo de energia que recebe.
	Produtor: Unidade que coleta e transforma energia de baixa qualidade (baixa intensidade) em energia com qualidade superior.
	Fonte: Fonte de energia externa.
	Sumidouro de energia: Dispersão de energia potencial empregada no sistema. A energia potencial é utilizada para produzir trabalho e o custo dessa transformação é a degradação da energia, a qual deixa o sistema como energia de baixa intensidade (2ª Lei da Termodinâmica).
	Caixa: Símbolo de uso múltiplo que pode ser usado para representar uma unidade de consumo e produção dentro de um sistema maior, representando assim, um subsistema.

Fonte: Adaptado de Odum (1996)