

---

# FRAMEWORK PARA ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE DE FONTES DE ENERGIA

RICARDO MOREIRA DA SILVA  
e MARCOS ANDRÉ MENDES PRIMO

---

## RESUMO

As matrizes energéticas nos países são compostas por diversas fontes de energia. As possibilidades de escolhas e a decisão pelo uso e sobre investimentos energéticos causam vários tipos de respostas e danos econômicos, ecológicos e/ou sociais em diferentes níveis de sustentabilidade. Esse artigo propõe um framework baseado em perdas comparando a sustentabilidade, classificando-as por nível, considerando todo processo de captação, transformação e consumo da energia (e não apenas seu uso), de fontes de energia usadas em matrizes de energia elétrica. Em adição ao tradicional tripé econômico-ambiental-social, verificados através do

Triple Top Line, esse framework considera também, através da Teoria da Agência, danos adicionais aos atores e instituições associados com as políticas energéticas. A metodologia utilizada para sua construção foi: 1) construção de tabelas driving force - state - response de fontes energéticas com foco na sustentabilidade; 2) sistematização o modelo e 3) validação do framework através da ANOVA entre blocos causalizados. Uma aplicação desse framework é realizada no Brasil e se conclui que paradigmas consagrados pelo senso comum como 'hidroelétricas não emitem CO<sub>2</sub>' e a 'energia nuclear é insustentável' são quebrados.

 diferença entre os atuais níveis de produção e consumo de energia elétrica no mundo é preocupante (Yuksela e Kaygusuzb, 2011). Um cenário criado pela Energy Information Administration (EIA, 2011) mostra que o consumo mundial de energia entre 2003 e 2030, terá uma alta de 71%, com a maior demanda na Ásia, América Latina, África e Oriente Médio. Esta tendência de crescimento da demanda não mostra sinais de redução, pelo contrário, a expectativa é que ela continue a crescer no futuro (Muneer *et al.*, 2005).

Em 2005, a produção de eletricidade mundial foi da ordem de 17.450 TWh, sendo 40% a base do carvão, 20% do gás, 16% da energia

nuclear, 16% hidro, 7% do petróleo e apenas 2% de fontes renováveis (Varun *et al.*, 2009). Desta forma, pesquisas envolvendo gestão energética têm recebido destaque, pois, deseja-se que ações sejam implementadas em busca do atendimento pleno da demanda energética, mas sabe-se que a geração e o consumo de energia podem provocar danos ao meio ambiente e a sociedade além de sérios impactos econômicos (Pereira, 2001; Holmgren e Sternhufvud, 2008; Morrow *et al.*, 2010; Urbaniec, 2010; Khorshidi *et al.*, 2011).

No século XX, os cuidados eram apenas em ter condições econômica/técnicas de se produzir a energia demandada e ofertá-la ao consumidor a um preço acessível. Porém, a partir da década 90 isso já começa a

mudar, tanto que Wallner e Narodoslowsky (1994) verificam que valores como cultura, comportamento da sociedade e outros afetam o ecossistema, então as preocupações do uso da energia envolvem outras variáveis como a disponibilidade da fonte na natureza, cidadania, cultura, saúde e outros parâmetros envolvendo vários stakeholder de diferentes interesses (Matos e Silvestre, 2013), e por isso modelos sustentáveis de uso de energia devem ser estudados.

De fato, desde a Conferência de Estocolmo (1972) já se alertava para a necessidade de 'desenvolvimento sustentável', definido através do *Brundtland Report*, como o desenvolvimento que pode ocorrer hoje que não afete o uso dos recursos das

---

## PALAVRAS CHAVE / Energia Limpa / Fontes Energéticas /

Recebido:23/07/2012. Modificado: 16/11/2013. Aceito: 21/11/2013.

**Ricardo Moreira da Silva.** Ph.D. em Energia e Clima, Kungliga Tekniska Högskolan (KTH), Suécia. Docente, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. e-mail: ricardomoreira@hotmail.com

**Marcos André Mendes Primo.** Ph.D. em Administração Comercial, North Carolina State University, EEUU. Docente, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil. e-mail: marcos.primo@ufpe.br

---

gerações futuras (UN, 2007). Entretanto, ao trata-se especificamente de energia, o entendimento de 'sustentável' não é tão bem delimitado e há uma gama de conceitos próximos, por exemplo:

'Energia renovável' tem relação com a renovabilidade do meio combustível. Representa do ponto de vista ambiental, a habilidade de um sistema retornar ao ponto original (ou desejado) após sofrer perturbação, por exemplo, a água nas hidrelétricas através do ciclo de evaporação.

Já Mclellan (2012) relaciona energia renovável com o potencial de mitigação de emissão dos gases do efeito estufa, onde, na verdade, o melhor termo para essa definição seria 'energia limpa', que seriam energias geradas por fontes que agridem menos a natureza. nessa direção, 'energia alternativa' designa uma alternativa energética ao uso dos combustíveis fósseis como etanol ou biodiesel, mas também, o foco está apenas na dimensão ecológica.

Já 'energia sustentável' incorporara outras dimensões e não apenas a análise da dimensão ambiental. Por exemplo, a Aneel (2011) informa que na área rural do Estado do Amazonas-Brasil, apenas 0,7% são supridas com energia elétrica através das linhas (*Grid*) da Companhia Energética do Amazonas, sendo grande parte abastecida por pequenos geradores a diesel. Do ponto de vista ambiental, essa é uma das piores escolhas, tamanho é a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida na natureza, entretanto o não atendimento dessa população isolada seria excluí-la do século XXI.

No caso do biodiesel brasileiro, Matos e Silvestre (2013) afirmam que a estratégia da Petrobras foi envolver agricultura familiar como parceiros de negócios, mas houve problema de coordenação devido a dispersão de centenas de agricultores. Além disso, a baixa escolaridade e falta de competência adequada na gestão e na agricultura fizeram o programa não ser sustentável.

Por isso, 'energia sustentável' precisa de definição mais cuidadosa e ampla, que é o objetivo principal desse artigo: desenvolver um conceito para energia sustentável, apresentando um framework que compara e quantifica a sustentabilidade entre fontes de energia usadas na geração de energia elétrica.

Dessa forma contribui porque desenvolve um novo conceito e framework de medição/comparação da sustentabilidade ligado a perdas em

toda cadeia de valor (e não apenas no uso da energia) desde a captação do combustível, passando pela geração, chegando ao consumo e em nível de análise nas três dimensões tradicionais (social, ambiental e econômica) sendo adicionada ainda a dimensão político-institucional.

### **A Construção do Conceito de Energia Sustentável**

Energia tem um conceito abstrato. Não se pode ver ou medi-la diretamente, mas sabe-se que tem valor por causa do trabalho que ela pode fazer. Em uma perspectiva termodinâmica não pode ser consumida, apenas convertida de uma forma para outra e que tais conversões, inevitavelmente, geram uma perda de valor (Vikhorev *et al.*, 2013). Assim, a sustentabilidade de uma fonte de energia pode apresentar diversos parâmetros a serem analisados.

Por exemplo, uma fonte de energia pode, por vezes, ser limpa, mas se o meio territorial a qual sua produção está inserida não permitir o escoamento da produção, essa fonte não seria sustentável. De forma similar, quando da implantação de uma usina hidrelétrica, como Belo Monte, há vantagens econômicas considerando o custo final de energia elétrica, entretanto a perda de biodiversidade resultante da construção do reservatório é incalculável.

Por outro lado, a energia nuclear produz lixo atômico, logo não é limpa, mas pode se tornar sustentável se o país, como a Suécia, propuser condições de manejo do lixo atômico, ou seja, é uma fonte que apesar de produzir rejeitos, pode ser sustentável (Mattsson *et al.*, 2009).

Assim, para trabalhar a questão de sustentabilidade é preciso entender os conceitos sobre fontes energéticas primárias, secundárias, perdas e energia útil. Para Goldemberg(2000), as fontes 'primárias' são "produtos energéticos providos pela natureza na sua forma direta, que compreende a força dos ventos, da água, do sol, das marés, do lixo, do bagaço da cana, minério de urânio, lenha e outros" e as 'secundárias' são as fontes primárias convertidas em formas mais adequadas para os diferentes usos. Então, sempre há 'perdas' nos processos de transformação e a 'energia útil' seria a parcela da energia efetivamente utilizada pelo ser humano, ou seja, é a energia primária, menos todas as perdas de transformação.

Pensando nas inúmeras possibilidades existentes, o conceito de

sustentabilidade pode ser visto como uma medida comparativa entre perdas e danos, considerando as ações desde a captação da fonte primária até o consumo final da energia. Desta forma, pode-se esquematizar o conceito de energia sustentável da seguinte estrutura:

$$\text{Energia} = \text{Consumo} + \text{Perdas e Danos}$$

e se perdas e danos são minimizados, então,

$$\text{Energia} = \text{Consumo e}$$

e se obtem energia sustentável.

Em suma, a energia sustentável é a busca da minimização das perdas e danos, seja na quantidade do resíduo, no impacto ao meio ambiente, no representativo financeiro ou no impacto para a sociedade.

Esse conceito 'perdas e danos' significa muito mais que eficiência pois inclui subprodutos tangíveis e intangíveis. Então o framework proposto apresenta no bojo de sua criação e contribuição, a idéia que energia sustentável seria relativo a uma comparação entre perdas e danos relacionada com captação, produção, distribuição e consumo de várias fontes não apenas na perspectiva financeira, mas na perspectiva ambiental, social e política-institucional. Nessa ótica existem três tipos de perdas e danos, doravante chamados 'perdas': as perdas tipo 1 são aquelas geradas na primeira fase de coleta da matéria prima para geração da energia, aquelas em forma bruta na natureza; por exemplo, na água para a geração hidrelétrica, existem perdas ambientais, pois vários ecossistemas são inundados, fauna e flora são afetadas; as perdas tipo 2 são relativas ao processo de geração e transmissão da energia elétrica, como perdas por efeito joule, corona, rendimento e outras; e as perdas tipo 3 estão ligadas ao consumo da energia, como na implantação de malhas de fios na distribuição de energia, que poluem o visual das cidades e aumentam as perdas por efeito joule.

Dessa forma, o framework além de incorporar aspectos intangíveis de perdas, tem como contribuição a análise da sustentabilidade através das perdas e danos verificados em as fases do processo, desde a captação da fonte combustível até o consumo final da energia.

### **Os Instrumentos Teóricos que Sustentam o Framework Proposto**

Os instrumentos usados na construção do framework foram o

sistema de indicadores *Driving force-State-Response* (DSR), a ferramenta *Triple Top Line* (TTL) e a Teoria da Agência (TA).

O sistema de indicadores DSR foi desenvolvido pela OECD (2001). Esse sistema estabelece relações de causas e efeitos entre as variáveis que se deseja analisar. Neste caso relações entre a geração de energia (causas) e os efeitos na natureza, no ser humano, e no plano econômico, criando ações institucionais. Ou seja, ele captura os efeitos das ações humanas, dos processos naturais e sociais e os relaciona com as respostas consolidadas em alguma política de gestão. Ao trabalharmos com fontes de energia, teríamos:

**Driving Force.** É caracterizada pelas pressões das atividades humanas sobre o meio ambiente e a qualidade e a quantidade dos recursos naturais.

**State.** Relaciona como o observador recebe a driving-force e muda o ambiente.

**Response.** Mostra a reação da sociedade às alterações provocadas, incluindo-se implementação de medidas pelos diversos atores sociais. São medidas que mostram em que extensão a sociedade está respondendo a mudanças e preocupações ambientais

O sistema DSR pressupõe que atividades humanas exercem pressões sobre o ambiente, alterando a qualidade e a quantidade de recursos naturais. A sociedade responde a essas mudanças por meio de políticas ambientais, econômicas e setoriais. As respostas formam uma alça de retroalimentação (*feedback loop*) para o driving force.

A função das tabelas DSR na formulação do framework é criar um banco de dados, cientificamente confiável construído a partir da triangulação de dados e validado através da Anova em blocos causalizados.

A ferramenta TTL foi desenvolvido por McDonough e Braungart (2002) onde as dimensões clássicas (social, ambiental e econômica) são analisadas em pares conjunta e dinamicamente. Os autores se inspiraram no *Triple Bottom Line* bastante discutido por Elkington (2012) e no Tapete Triangular de Sierpinsky (Math 2033 Forum, 2010), decompondo as três dimensões clássicas em nove pares combinados.

O triângulo a (Figura 1) é uma representação do *Triple Bottom Line*, e o triângulo b do *Triple Top Line*. Assim, ao invés de apenas três

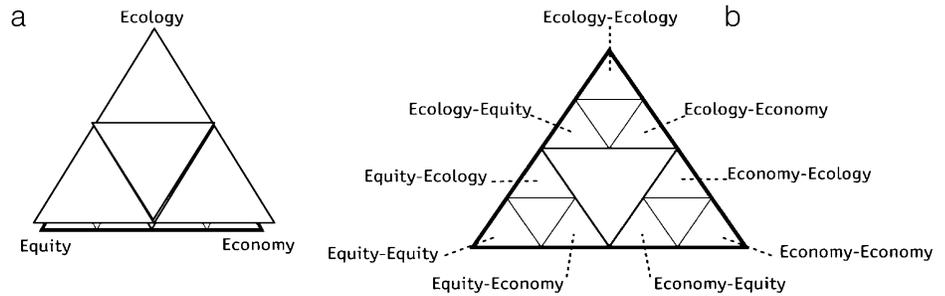


Figura 1. Triângulo de fractais. Ecology: ecologia, equity: equidade social, economy: economia. Fonte: McDonough e Braungart (2002).

unidades individuais de análise no triângulo a, são nove subunidade conjuntas triângulo b.

A função do TTL na formulação do framework é ajudar na categorização das variáveis. Por exemplo, 'o deslocamento de uma população devido a um acidente nuclear ou por causa de uma inundação causada por uma hidrelétrica deve ser categorizado como ambiental ou social?'

Quando se trabalha apenas com as dimensões do *Triple Bottom Line* sempre há esse problema de sobreposição, entretanto com a análise conjunta proporcionada TTL percebe-se que houve um problema ambiental que afetou o social, portanto variável ecology-equity. Além disso, a lógica de análise da TTL se coaduna com a concepção causa-efeito das tabelas DSR.

**A Teoria da Agência (TA).** Desde o artigo seminal de Jensen e Meckling (1976), uma vasta literatura analisa a Teoria da Agência (Pratt e Zeckhauser, 1985; Eisenhardt, 1989; Mann, 1998). Com o crescimento da complexidade das organizações, o proprietário foi forçado a assumir um papel mais abrangente, sendo obrigado a abandonar suas atribuições de gestão e delegá-las a um gestor profissional. Esta separação entre a propriedade e a gestão, introduz problemas de relacionamento. O gestor (denominado 'o agente'), dotado de interesses individuais, não quer e/ou não pode perseguir todos os objetivos colocados pelo proprietário (denominado 'o principal') que não consegue mais conduzir seu negócio. Essa delegação de atribuição implica na distribuição dos riscos entre esses atores, assim emerge a TA, onde o principal é aquele que detém a posse da organização, que delega suas atribuições a outrem que é o agente aquele que irá gerenciar o negócio.

Em setores elétricos o país representado pela população é dona

da energia que delega para empresas a concessão do gerenciamento elétrico. Segundo Eisenhardt (1989), a TA possui sete variáveis de análise: interesses próprios, objetivos em conflitos, racionalidade limitada, informações assimétrica, eficiência, riscos e informações como *comodities*.

Então, existem situações onde o componente político-institucional influí sobremaneira nos eventos e nesse caso, a TA é importante porque são situações onde a TTL não consegue explicar plenamente a sustentabilidade. Por exemplo, o simples ato de cozinhar alimentos no Brasil (uso do butano), na Colômbia (lenha natural) e na Suécia (eletricidade).

Na Colômbia já se tentou implantar o uso do gás natural, entretanto existe a crença popular que a comida fica mais saborosa com lenha e isso faz com que o povo abandone a opção do gás. Enquanto isso, na Suécia se usa a eletricidade por que foram implantadas políticas de uso de fontes não emissoras de CO<sub>2</sub>, e o Brasil fez a opção pelo butano por facilidades de sua distribuição em botijões com a geração de emprego e renda locais, evidenciando assim que as questões regulatórias também influem na sustentabilidade (Blumberga *et al.*, 2013). Então outros elementos além das subunidades da TTL são envolvidas, como crenças, valores, cultura, regulação do setor e decisões políticas governamentais. Dessa forma, nesse paper, a função da TA é incluir as questões político-institucionais que o TTL não consegue captar.

## A Modelagem do Framework

O framework (esquema na Figura 2) mensura a sustentabilidade relativa entre as fontes energéticas. Desenvolvido sob o conceito de perdas, apresenta uma contribuição, pois analisa a sustentabilidade nas diversas combinações possíveis entre as dimensões social, ambiental e econômica além de

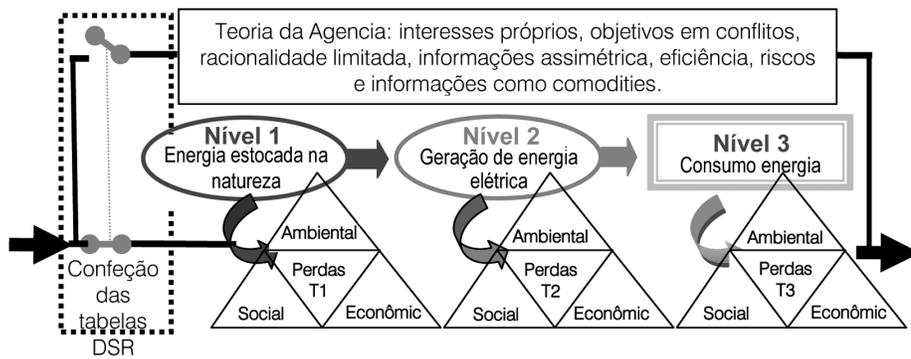


Figura 2. Esquema explicativo do framework.

incorporar na análise a componente institucional, em todo o processo (de captação, transformação e uso da energia) e não apenas na geração, pela comparação da quantidade de perdas que cada fonte de energia apresenta, já que não existe nenhum caso real de transformação com perda zero. Ele pode ser aplicado para análise de quaisquer fontes energéticas em uso em qualquer país, entretanto, nesse artigo, como efeito de demonstração será analisado a sustentabilidade de quatro fontes de energia elétrica no Brasil.

Para efetiva utilização do framework é necessário seguir uma sequência de passos, norteando seu uso. Uma vez que sustentabilidade plena não existe, já que não existem processos sem perdas e danos na natureza, de tal modo que a forma mais fácil de comparar a sustentabilidade entre fontes foi exatamente pela negação da sustentabilidade, ou seja, pontuar elementos insustentáveis, conforme demonstrado na Figura 3.

a) Construção das tabelas DSR. Tem-se um longo rastreamento bibliográfico para construção das tabelas DSR. Esta pesquisa bibliográfica e as tabelas DSR servem como instrumento alimentador

para framework. As categorias são o social, o ambiental, o econômico e o institucional.

Os indicadores de DSR para energia envolvem desde a caracterização da matriz energética, com informações sobre o uso de fontes renováveis de energia, reservas comprovadas, principais driving force (consumo anual de energia, consumo relacionado a transportes e a agricultura, emissões de gases poluentes, queima de combustíveis fósseis, geração de resíduos perigosos) e respostas como gastos com o tratamento de resíduos e a redução da poluição atmosférica.

b) Escolhas das variáveis que comporão a análise da sustentabilidade (TTL e TA). O pesquisador deve levantar quais são as características de cada fonte a ser analisada e escolher as variáveis considerando o uso da TTL e da TA através de uma extração dos dados nas tabelas DSR das características de sustentabilidade de cada fonte de energia a que se quer analisar.

c) Teste da triangulação dos dados (ANOVA em blocos causalizados). Para garantir que as tabelas DSR sejam munidas de informações que possibilitem a triangulação dos dados

sem vieses, é realizado a ANOVA em blocos causalizados (teste F). Esse teste permite estabelecer se houve uma quantidade de informação suficiente e equitativa em cada fonte e em cada dimensão. Se houver desequilíbrio estatístico entre a quantidade de informações, O teste F falha indicando que a tabela DSR não está pronta e teve que ser melhorada.

d) Quantificar os pesos de importância de cada variável. O modelo até essa etapa consegue testar a sustentabilidade das fontes desejadas sem levar em consideração qual variável é a mais importante, o que coloca, por exemplo, uma catástrofe nuclear no mesmo patamar de uma inundação em uma floresta. Por pior que seja a inundação de uma floresta, sabe-se que um acidente nuclear tem proporções bem maiores. Para suprir essa lacuna, o framework permite a inclusão de pesos nessas variáveis. Essa quantificação depende do analista que estiver usando o framework, entretanto sugere-se que essa quantificação obedeça alguns critérios e sejam usados especialistas da área. Nos casos testes foram construídos três grupos focais de especialistas, que serão apresentados a seguir.

e) Construção da tabela de insustentabilidade. A partir das tabelas DSR e da definição dos pesos de cada variável, é preenchida a tabela de sustentabilidade atribuindo os valores -1 se a variável for considerada sustentável e 1 caso a variável seja considerada não sustentável.

f) Ordenação da sustentabilidade através do teste Kruskal-Wallis. É o teste não paramétrico utilizado na comparação de três ou mais amostras independentes. Ele indica se há diferença entre pelo menos dois deles. A aplicação do teste utiliza os valores numéricos transformados em postos e agrupados num só conjunto de dados. O efeito esperado desse teste é que ele quantifica e ordena em de forma decrescente as variáveis testadas, no caso as fontes de energia (da fonte menos sustentável para fonte mais sustentável), objetivo do framework.

g) Emissão de relatório comparativo. Etapa final e descritiva do framework

### Aplicação do Framework para Verificar a Sustentabilidade de Fontes no Brasil

O Brasil foi escolhido pelo critério de facilidade da coleta de dados pelos pesquisadores,

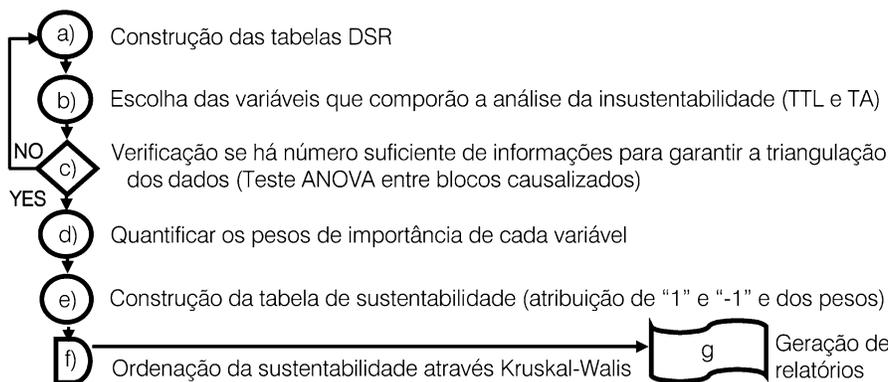


Figura 3. Esquema de uso do framework.

TABELA I  
ÁREA DE CONHECIMENTO E TEMA DE PESQUISA

Área de conhecimento: Energy	Tema de pesquisa: Fontes elétricas
Palavras combinadas	
Nuclear, hydropower, oil, ethanol	Damage, flood, burned, cost, sustainability, greenhouse effects, social issues, environmental issues, economic issues, waste, radiation, accidents, incentives, subsidies, forests, raw material, health, public policy, governance

TABELA II  
RESULTADOS DA BUSCA POR PALAVRAS CHAVE DEPOIS FILTRAGEM

	Nuclear				Oil				Ethanol																															
	Damage	Flood	Burned	Cost	Sustainability	Greenhouse effects	Social issues	Environmental	Economic issues	Waste	Radiation	Accidents	Incentives	Subsidies	Forests	Raw material	Health	Public policy	Governance	Subtotal																				
	20	5	10	43	35	16	13	40	41	35	21	25	24	14	9	10	39	26	5	431	37	25	17	68	24	28	19	27	17	6	18	17	26	12	24	6	12	11	422	
	3	10	0	53	18	8	10	20	14	10	0	0	12	5	6	0	11	10	1	191	8	0	26	35	43	33	6	39	27	11	14	0	26	26	28	15	21	16	1	375

mas o framework funcionaria em qualquer outro país, onde houvesse dados para preenchimento das tabelas DSR. Os dados do Brasil foram colhidos entre 2009 e 2011 utilizando-se principalmente documentos da Aneel (2011, 2013).

Quando a escolha das fontes energéticas buscou-se representantes das três principais categorias de sistemas de produção de eletricidade segundo a classificação de Varun *et al.* (2009) e Akella *et al.* (2009) que os separam como combustíveis fósseis (madeira, gás, carvão mineral e petróleo), energia nuclear e energias renováveis (hidrelétrica, eólica, solar). Assim escolhemos como fontes de energia elétrica o petróleo, o etanol, a hidroelétrica e a nuclear.

#### A construção das tabelas DSR

As tabelas DSR foram preenchidas a partir de publicações científicas. Embora esse sistema tenha a vantagem de destacar relações de causalidade, sua desvantagem é que o sistema DSR sugere que as interações entre atividades humanas e o meio ambiente sejam linearidade, e a realidade pode ser bem diferente, pois, na verdade, as relações são complexas nos ecossistemas. Ao pesquisador, é facultada a possibilidade de alocar certo evento como força motriz (driving force) ou resposta (response), por que na prática uma resposta, automaticamente se torna uma pressão para outra consequência (state).

A construção das tabelas DSR seguiu os passos seguintes. Foi usado o sistema de buscas Science Direct; a área de conhecimento foi 'Energy', o tema de pesquisa foi 'fontes de energia' e as palavras-chave a serem combinadas na busca são apresentadas na Tabela I. Essa busca por palavras-chave resulta em um grande volume de material exigindo o estabelecimento de critérios para selecionar o que há de mais relevante sobre o tema, assim foram colocados os seguintes filtros na pesquisa: a) periódicos internacionais; b) a partir de 2008; c) a palavra deveria aparecer nos Abstract, Title ou Keywords. O banco inicial contou com os elementos da Tabela II.

Assim, como resultado dessa fase 1 foram encontrados 1419 artigos. A fase 2 (Figura 4) iniciou-se com a depuração desses papers. Houve um processo de verificação de títulos duplicados e depois houve expurgo de trabalhos que diziam pouco a respeito do tema energy.

O próximo passo para chegar ao grupo de artigos escolhidos foi selecionar os artigos que tinham maior relação com o tema sustentabilidade separando-os por fonte. Como resultado obteve-se: nuclear (89); hidrelétrica (60); petróleo (101) e etanol (82). Alguns dados ilustrativos foram extraídos das tabelas DSR e são apresentados a seguir:

**Hidrelétrica.** Além de apresentar o KWh de produção de energia mais barata do mundo, Bakis (2006) revela que mais de 40% da eletricidade usada em países desenvolvidos advém das hidrelétricas e além disso, elas são responsáveis pelo fornecimento de 97% de toda eletricidade gerada por fontes renováveis. Em outra direção, a biodiversidade perdida na construção dos reservatórios, não tem sido verdadeiramente computada.

**Nuclear.** Pode ser gerada através da fusão ou fissão nuclear cujos processos e impactos possuem totalmente distintos. Desde seus primórdios, essa energia prometeu ser energia limpa, barata e inesgotável (Pereira, 2001) e ainda, por causa da magnitude de energia potencial acumulada, prometeu ser a fonte de energia mais importante para gerações futuras.

O acidente em Fukushima no Japão deixou visível a insegurança e o poder destrutivo da energia nuclear, tanto que Tanimoto *et al.* (2011) afirmam que essa indústria está enfrentando sua pior crise. Duffield e Woodall (2011) já colocam que as conse-

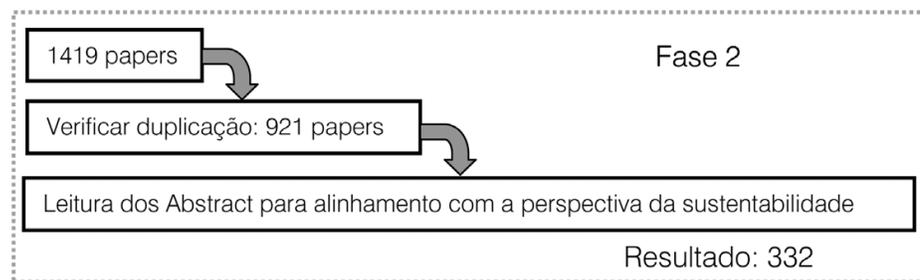


Figura 4.

TABELA III  
NÚMERO DE AUTORES QUE FAZEM REFERENCIA À VARIÁVEL

Quantidade de informações para triangulação dos dados		Nuclear	Hidro	Petróleo	Etanol	Total	
Equity	Equity-Economy	Provoca aumento de doenças (tipo Malária)	9	4	1	2	16
	Equity-Ecology	Provoca deslocamento da população	0	10	3	0	13
	Equity- Equity	Provoca perda da cidadania	1	6	0	3	10
Ecology	Ecology-Ecology	Emite CO <sub>2</sub> e outros gases efeito estufa	9	8	11	3	31
		Causa mudança climática	0	2	10	1	13
		Causa fim de espécies (fauna e flora)	0	4	15	2	21
		Gera de Lixo/Expurgos	11	8	1	2	22
		Provoca inundações de ecossistemas	0	7	0	0	7
	Ecology- Equity	Provoca diminuição florestas ou meio rural	6	15	0	5	26
Ecology-Economy	Impossibilidade de irrigação	0	1	0	2	3	
Economy	Economy- Economy	Há altos custos de produção	8	5	7	5	25
		Há alto custo de implantação	6	3	7	5	21
		Há demorado retorno de capital	2	4	0	1	7
		Há reduzida escala de produção	4	2	2	3	11
	Economy-Ecology	Há custo de reparos do meio-ambiente	3	10	7	5	25
		Não existência de matéria prima	4	8	4	3	19
	Economy-Equity	Há custos de deslocamento da população	0	10	0	0	10
		Há diminuição da economia local (tipo pesca)	4	9	4	4	21
Institucional	Preeminence Efficiency	Há ineficiência da transformação energética	2	2	3	1	8
	Bounded Rationality	Existe possibilidade de catástrofe	10	2	14	0	26
	Risk Aversion	Há necessidade de incentivos	5	7	5	3	20
		Há gastos públicos decorrente do uso da fonte	7	9	5	1	22
		Não há fornecedores nacionais	3	1	0	2	6
Total		94	137	99	53	383	

qüências desse acidente podem ser comparadas com Three Mile Island e Chernobyl. Lepecki (2011), Goldemberg (2011) e Costa (2011) afirmam que a energia nuclear é perigosa e tem custos elevados, porém possui uma expectativa de matéria prima para 500 anos.

**Petróleo.** É ainda a fonte mais utilizada no mundo por permitir a geração distribuída, e em qualquer local, próximo a carga. A OPEP anunciou nos anos 70, uma estimativa de apenas mais 30 anos de prospecção, há grande especulação no preço do petróleo. Não se sabe ao certo quanto são as reservas mundiais, mas Kjærstad e Johnsson (2009) apontam a previsão de sua extinção por volta de 2030. O principal problema da utilização do petróleo é a emissão de CO<sub>2</sub>. (Holmgren e Sternhufvud, 2008; Morrow *et al.*, 2010; Khorshidi *et al.*, 2011).

**Etanol.** Caracteriza-se como sendo um biocombustível renovável, o qual utiliza a bioenergia, que pode ser produzido por diversas culturas agrícolas como: cana-de-açúcar e beterraba, as quais são ri-

cas em sulcrose, e também de alguns polissacarídeos (Cardona e Sánchez, 2007). Essas fontes podem ser alternativas para reduzir emissões de CO<sub>2</sub> resultante da utilização de combustíveis fósseis.

#### A definição das variáveis a partir da TTL e da AT

A Tabela III relaciona a TTL e a TA com a escolha das variáveis. Foi feita uma pesquisa piloto com 10 especialistas e 70 possíveis variáveis (as variáveis apresentadas nos casos testes foram as mais pontuadas). A tabela respeitou a triangulação dos dados, sendo evidenciado que existem 383 informações coletadas em 155 artigos.

Também estavam na pesquisa as outras quatro variáveis li-

TABELA IV  
COMPARAÇÃO F

Causas de variação (teste F)	GL	SQ	QM	F <sub>calculado</sub>	F <sub>crítico</sub>
Fontes	3	295,23	36,82	8,02	6,59
Dimensões (Soc, Amb,Econ,Inst)	3	328,23	36,82	8,91	
Resíduo	2				

GL: graus de liberdade, SQ: soma dos quadrados, QM: quadrados médio.

gadas a TA, entretanto foi visto que a ação delas apresentavam uma visão geral, porém igual entre fontes, servindo de dados gerais para pesquisa, mas não na diferenciação entre fontes e foram expurgadas.

#### Testes na triangulação dos dados

Foi conduzida uma análise de experimentos em blocos causalizados (teste F) que verifica se existem quantidade de dados estatisticamente semelhantes e testa a independência entre fontes e dimensões, validando e verificando se houve a triangulação de dados de forma equilibrada. Ao nível das fontes, na Tabela IV, ao nível de significância de 5% e com 3 graus de liberdade, encontra-se  $F_{crítico} = 6,59$ , sendo o  $F_{calculado} = 8,02$  que é significativo. Ao nível das dimensões, encontra-se  $F_{crítico} = 6,59$  e  $F_{calculado} = 8,91$  também significativo ao nível de 5%. Dessa forma, pode-se concluir que as fontes e as dimensões têm quantidade de informações equilibradas e são independentes umas das outras, portanto, a triangulação de dados foi equilibrada.

#### Atribuição dos pesos as variáveis

Como estratégia de pesquisa, foram criados três grupos de especialistas do setor e nas entrevistas solicitado que o entrevistado colocasse um valor de 0 a 100 em cada variável, segundo sua visão de importância. Depois se expurgou os maiores e menores valores e foi feita uma média (o uso de grupos focais é uma opção do pesquisador, que pode ser o próprio arbitro dos pesos). Os grupos de especialistas foram formados por: a) funcionários da Agência Reguladora de Energia Elétrica, b) deputados federais, e c) coordenadores de concessionárias.

#### Construção e aplicação das tabelas da sustentabilidade

A Tabela V apresentada foi preenchida com os binários -1 (se a fonte é sustentável) ou 1 (indicando insustentabilidade) e o peso atribuído. Assim, quanto mais positivo for cada tabela, menos sustentável é a fonte de energia analisada. O teste Kruskal-Wallis possibilita a ordenação e a análise comparativa da sustentabilidade. Após o preenchimento das tabelas e sua análise estatística, o

TABELA V  
ANÁLISE DA INSUSTENTABILIDADE BRASIL

Tabela da sustentabilidade Brasil			Nuclear	Hydro	Petroleo	Etanol	Peso	DPad
Equity	Equity-Economy	Provoca aumento de doenças (tipo Malária)	1	1	1	-1	48,70	34,96
	Equity-Ecology	Provoca deslocamento da população	-1	1	1	-1	47,41	20,86
	Equity- Equity	Provoca perda da cidadania	-1	1	-1	-1	31,85	21,49
Ecology	Ecology-Ecology	Emite CO <sub>2</sub> e outros gases efeito estufa	1	-1	1	-1	80,56	21,59
		Causa mudança climática	1	1	1	-1	72,04	30,01
		Causa fim de espécies (fauna e flora)	-1	1	1	-1	64,44	29,40
		Gera de Lixo/Expurgos	1	-1	-1	-1	59,44	25,20
	Ecology- Equity	Provoca inundações de ecossistemas	-1	1	-1	-1	46,67	24,34
		Provoca diminuição florestas ou meio rural	-1	1	-1	-1	53,52	28,75
Ecology-Economy	Impossibilidade de irrigação	-1	1	-1	-1	28,52	19,75	
Economy	Economy- Economy	Há altos custos de produção	1	-1	1	1	76,30	27,30
		Há alto custo de implantação	1	1	1	-1	75,19	14,51
		Há demorado retorno de capital	1	1	1	-1	70,00	25,12
		Há reduzida escala de produção	-1	-1	-1	1	79,81	17,29
	Economy-Ecology	Há custo de reparos do meio-ambiente	1	1	1	1	70,56	25,43
		Não existência de matéria prima	1	-1	-1	-1	81,70	25,78
	Economy-Equity	Há custos de deslocamento da população	-1	1	-1	-1	52,78	27,68
Há diminuição da economia local		-1	-1	1	-1	34,81	19,04	
Institutional	Preeminence Efficiency	Há ineficiência da transformação energética	1	-1	1	1	81,67	21,44
	Bounded Rationality	Existe possibilidade de catástrofe	1	1	1	-1	79,07	26,39
	Risk Aversion	Há necessidade de incentivos	-1	-1	-1	1	79,07	23,16
		Há gastos públicos pelo do uso da fonte	1	1	1	-1	59,44	28,57
		Não há fornecedores nacionais	1	-1	-1	-1	31,67	25,68

modelo forneceu uma visão da sustentabilidade das fontes.

A Tabela VI descreve os resultados quanto a insustentabilidade das fontes no Brasil. Mostram que para o Brasil, a fonte mais insustentável é a nuclear seguida do petróleo, das hidrelétricas e finalmente do etanol. Uma explicação para esses resultados seria que a energia nuclear gera o risco de acidentes que podem causar danos incalculáveis. Além disso, no Brasil não existe matéria prima suficiente (urânio enriquecido), os custos de produção são muito altos, e não há abrigo para o lixo nuclear.

Logo na seqüência, o petróleo aparece como segunda fonte mais insustentável porque emite grande quantidade de CO<sub>2</sub> na natureza. Além disso, seu preço é o de uma commodity sujeito a flutuações internacionais. Mesmo sendo auto-suficiente na produção de petróleo, o Brasil não o é na produção de derivados como o óleo diesel que alimenta termoeletricas.

Como mais sustentáveis aparecem a hidroeletricidade e o etanol, ambos relacionados ao baixo custo e a facilidades

devido ao relevo, rios e quantidade de terra possível de ser usada no Brasil.

### Conclusões

Apresentou-se um novo framework para medir e comparar a sustentabilidade de fontes de energia baseado na confecção de tabelas DSR, na ferramenta *Triple Top Line* e na Teoria da Agência. O framework foi aplicado na matriz de energia elétrica do Brasil como estudos de caso para validação do mesmo. Com o framework foi possível inferir que o nível de sustentabilidade de fontes de energia deve considerar as respectivas fases de produção, distribuição e consumo, assim

–A sustentabilidade da energia à base de hidroeletricidade em relação a outras fontes seria questionável. Ao contrário do que se pensa, essa fonte emite CO<sub>2</sub> quando da instalação das barragens, devido ao acúmulo de material orgânico em suas bacias, que entram em processo de decomposição. Além disso, necessita da implantação de linhas de transmissão e possui um passivo ambiental e social sobremaneira grande causado pelas inundações.

–A termoelétricidade a base de petróleo teria baixo índice de sustentabilidade, pois embora seja uma forma energética que emite CO<sub>2</sub> e possui uma baixíssima taxa de eficiência de transformação, entretanto há comunidades isoladas que necessitam de energia e uma termelétrica pode ser implantada junto da carga, eliminando a construção de linhas. Se o combustível usado for à base de biocombustíveis, o problema da emissão de CO<sub>2</sub> seria minimizado, pois no processo de crescimento, a planta (matéria prima do combustível) consumiria o gás emitido no processo de geração. Entretanto, nesse caso haverá um impacto na agricultura pela

TABELA VI  
RESULTADO DO TESTE KRUSKAL-WALIS PARA O BRASIL

Kruskal-Wallis Test on C					
B	N	Median	Ave	Rank Z	
1	23	0.4870	83.8	1.88	83,8 Nuclear
2	23	0.4667	70.2	0.09	80,3 Oil
3	23	0.4741	80.3	1.41	70,2 Hydro
4	23	-0.4870	59.3	-1.35	59,3 Ethanol
Overall	138		69.5		
H=8.89	DF=3	P=0.094			
H=8.90	DF=3	P=0.091 (adjusted for ties)			

diminuição da área disponível para o cultivo de alimentos.

–A sustentabilidade da energia nuclear não seria tão ruim como pode parecer. De fato, não emite CO<sub>2</sub>, há abundância de matéria prima e há capacidade de produção em larga escala, em plantas elétricas reduzidas. Por isso, Weisser *et al.* (2008) defende que a energia nuclear será a única capaz de atender a demanda mundial. Então como dizer que ela é insustentável se há estudos baseados no crescimento exponencial da demanda mostrando que esse tipo de energia será a energia do futuro?

Porém, há sérios problemas da energia nuclear ainda não elucidado como a insegurança tecnológica, riscos de catástrofes e os altos custos de produção. A questão do lixo atômico pode ser resolvida através da construção de abrigos confiáveis onde programas de políticas públicas (como na Suécia) garantem os recursos necessários. No Brasil ela apresenta o maior custo produtivo e não existe nenhuma medida mitigadora atrelada ao lixo nuclear. Logo, pode-se dizer que o programa nuclear brasileiro teria dificuldade de produzir energia sustentável. Por isso, Carvalho *et al.* (2009) e Goldenberg (2007) dizem que, no Brasil, o investimento nuclear é desnecessário, ainda mais porque ainda há um grande potencial de energia hidrelétrica.

Assim concluímos afirmando que sustentabilidade é um campo fértil a ser explorado. Estudos buscando soluções em fóruns globais buscam meios mais amigáveis, ambientalmente melhores para o uso da energia, mas as dificuldades de encontrar uma solução universal aparecem quando cada país apresenta suas particularidades (o político-institucional).

Com o framework proposto pode-se diminuir essa lacuna e explicar, por exemplo, que não é possível instalar uma hidrelétrica na Amazônia simplesmente por que gera o KW mais barato do mundo. Seria necessário avaliar o impacto nas pessoas afetadas pela malária ou mesmo o impacto no meio-ambiente como a perda de biodiversidade, quando áreas de florestas fossem inundadas e fauna e flora podem ser extintas.

Por fim, através do framework é possível colocar que não existe uma única solução energética mundial. O mundo ainda é dependente da energia proveniente das fontes fósseis e da nuclear. Por isso, Matsui *et al.* (2008) e Vaillancourt *et al.* (2008)

não sugerem o uso em uma única forma energética. Ao contrário disso, sugerem planejamento de longo prazo e o olhar amplo para as diversas fontes.

Pensando assim é que não se pode ingenuamente idealizar uma matriz energética baseada apenas na geração através de energias alternativas como a eólica, solar, PCH. Essas fontes teriam escala de produção inferior até mesmo a do etanol, e teriam limitações para atender as novas demandas. Assim para decidir sobre as fontes energéticas é necessário o aporte e o processamento de muitas informações, e o framework pode ajudar nessa modelagem.

A limitação do framework seria relativo a construção das tabelas DSR. Elas são dinâmicas, ou seja, os dados podem mudar a cada descoberta tecnológica de forma que seu preenchimento seria um retrato estático da força motriz, estado e resposta das fontes escolhidas para análise. Em um médio espaço de tempo essas tabelas necessitarão de atualização, podendo apresentar outra realidade diferente em alguns anos.

#### REFERENCIAS

- Akella AK, Saini RP, Sharma MP (2009) Social, economical and environmental impacts of renewable energy systems. *Renew. Energy* 34: 390-396.
- Aneel (2011) *Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos: Soluções Energéticas para a Amazônia*. Barreto EJF, Tiago Filho GL (Coords). Agência Nacional de Energia Elétrica Brasília, Brasil.
- Aneel (2013) Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, Brasil. [www.aneel.gov.br](http://www.aneel.gov.br)
- Bakis R (2006) Electricity production opportunities from multipurpose dams (case study). *Renew. Energy* 32: 1723-1738.
- Blumberga A, Blumberga D, Bazbauers G, Zogla G, Laicane I (2013) Sustainable development modelling for the energy sector. *J. Cleaner Prod.* 63: 134-142.
- Cardona CA, Sánchez OJ (2007) Fuel ethanol production: process design trends and integration opportunities. *Bioresour. Technol.* 98: 2415-2457.
- Carvalho JF; Sauer IL (2009) Does Brasil need new nuclear power plants? *Energy Policy* 37: 1580-1584.
- Costa HS (2011) *Eletricidade Nuclear e as Tarifas. Acerto de Contas*. Universidade Federal de Pernambuco. Brasil.
- Duffield JS, Woodall B (2011) Japan's new basic energy plan. *Energy Policy* 39: 3741-3749.
- EIA (2011) *Annual Energy Outlook 2011 with Projections to 2035*. DOE/EIA-0383. Energy Information Administration. Depart-

ment of Energy. Washington, DC, EEUU. 246 pp.

- Eisenhardt KM (1989) Agency theory: an assessment and review. *Acad. Manag. Rev.* 14: 57-74.
- Elkington J (2012) *Canibais com Garfo e Faca*. Makron. São Paulo, Brasil. 472 pp.
- Goldemberg J (2011) O acidente nuclear no Japão. *Exame*. <http://exame.abril.com.br/economia/meio-ambiente-e-energia/noticias/seguranca-da-energia-nuclear-e-ilusoria-diz-jose-goldemberg>
- Goldemberg J (2000) Pesquisa e desenvolvimento na área de energia. *São Paulo Perspec.* 14: 91-97.
- Goldemberg J, Lucon O (2008) Energy and environment in Brasil. *Biomass* 21: 7-20.
- Holmgren K, Sternhufvud C (2008) CO<sub>2</sub> emission reduction costs for petroleum refineries in Sweden. *J. Cleaner Prod.* 16: 385-394.
- Khorshidi Z, Soltanieh M, Saboohi Y, Araba M (2011) Economic feasibility of CO<sub>2</sub> capture from Oxy-fuel power plants considering enhanced oil recovery revenues. *Energy Proc.* 4: 1886-1892.
- Kjärstad J, Johnsson F (2009) Resources and future supply of oil. *Energy Policy* 37: 441-464.
- Lepeck W (2011) A energia nuclear e a economia do hidrogênio. *Rev. INEE.* 26/01/2011.
- Mann SV (1998) Agency Theory (verbete). Em Cooper CL, Argyris C. (Eds.) *The Concise Blackwell Encyclopedia of Management*. Blackwell. Malden, MA, EEUU.
- Matos S, Silvestre BS (2013) Managing stakeholder relations when developing sustainable business models: the case of the Brazilian energy sector. *J. Cleaner Prod.* 45: 61-73.
- Math 2033 Forum (2010) Sierpinski Triangle. University of Arkansas. [http://math2033.uark.edu/wiki/index.php/Sierpinski\\_Triangle](http://math2033.uark.edu/wiki/index.php/Sierpinski_Triangle) 2010.
- Matsui K, Ujita H, Tashino M (2008) Role of nuclear energy in environment, economy and energy issues of the 21st century green house gas emission constraint effects. *Progr. Nucl. Energy* 50: 97-102.
- Mattsson P, Eriksson ML, Aström T (2009) *ErawatchCountry Report - Sweden*. Joint Research Centre. European Commission. 38 pp.
- McDonough W, Braungart M (2002) Design for the Triple Top Line: New tools for the sustainable commerce. *Corp. Env. Strat.* 9: 251-258.
- McLellan BC, Corder GD, Giurco DP, Ishihara KN (2012) Renewable energy in the minerals industry: a review of global potential. *J. Cleaner Prod.* 32: 32-44.
- Morrow WR, Gallagher KS, Collantes G, Lee H (2010) Analysis of policies to reduce oil consumption and greenhouse-gas emissions from the US transportation sector. *Energy Policy* 38: 1305-1320.
- Muneer T, Asif M, Munawwar S (2005) Sustainable production of solar electricity with

- particular reference to the Indian economy. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 9: 444-473.
- OECD (2001) *Key Environmental Indicators*. Organisation for Economic Co-operation and Development Paris, Francia. [www.oecd.org/dataoecd/7/47/24993546.pdf](http://www.oecd.org/dataoecd/7/47/24993546.pdf) (Cons. 10/09/2010).
- Takimoto T, Uchida N, Kodama Y, Twshima T, Taniguchi S (2011) Safety of workers at the Fukushima Daiichi nuclear power plant. *Lancet* 377: 1489-1490.
- UN (1987) *Our Common Future. Report of the World Commission on Environment and Development*. United Nations. [www.un-documents.net/ocf-02.htm#I](http://www.un-documents.net/ocf-02.htm#I) (Cons. 11/09/2010).
- Pereira NM (2001) Energia nuclear: Da energia inesgotável à energia limpa. *Rev. Bras Energia* 8.
- Pratt JW, Zeckhauser RJ (1995) Principals and agents: on overview. Em Pratt JW, Zeckhauser RJ (Eds.) *Principals and Agents: the Structure of Business*. Harvard Business School Press. Boston, MA, EEUU. pp. 1-36.
- Silva, RMda (2011) *Um Modelo para Análise da Sustentabilidade de Fontes Eléctricas*. Tese. Universidade Federal de Pernambuco. Brasil.
- Yuksela I, Kaygusuzb K (2011) Renewable energy sources for clean and sustainable energy policies in Turkey. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15: 4132-4144.
- Urbaniec K, Friedl A, Huisinghc D, Claassen P (2010) Hydrogen for a sustainable global economy. *J. Cleaner Prod.* 18: S1-S3.
- Vaillancourt KV, Labriet M, Loulou R, Waub JKP (2008) The role of nuclear energy in long-term climate scenarios: An analysis with the World-TIMES model. *Energy Policy* 36: 2296-2307.
- Varun A, Prakash R, Bhat IK (2009) Energy, economics and environmental impacts of renewable energy systems. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13 :2716-2721..
- Vikhorev K, Greenough R, Brown N (2013) An advanced energy management framework to promote energy awareness. *J. Cleaner Prod.* 43: 103-112.
- Weisser D (2007) *A Guide to Life-Cycle Greenhouse Gas (GHG) Emissions from Electric Supply Technologies*. PESS/International Energy Agency. Viena, Austria. 27 pp.
- Wallner HP, Narodoslawsky M (1994) The concept of sustainable islands: cleaner production, industrial ecology and the network paradigm as preconditions for regional sustainable development. *J. Cleaner Prod.* 2: 167-171.

## FRAMEWORK FOR MEASURING SUSTAINABILITY BETWEEN ENERGY SOURCES

Ricardo Moreira da Silva and Marcos André Mendes Primo

### SUMMARY

*The energy matrix in countries is composed by different energy sources. The possibilities of choices and the decisions for energy use and about investments have many answers and can lead to economic, ecologic and/or social damages at different levels of sustainability. This article proposes a framework based on losses and damages that compares sustainability, classifying it by levels, considering the whole process of capture, transformation and consumption of energy (and not only the use) of energy sources used in a national electrical matrix. In addition to the traditional economic, environmental and social issues, verified by the Triple Top Line, the framework considers*

*also, through the Agency Theory, additional damages to authors and institutions related with energy policies. The methodology used for its construction was: 1) construction of tables of driving force-state-response of energy sources with focus in sustainability, 2) systematization of the model, and 3) validation of the framework through ANOVA among randomized blocks. An application of this framework is made in Brazil and it is concluded that established paradigms by common sense like 'hydropower doesn't issues CO2' and 'nuclear energy is unsustainable' are broken.*

## MARCO CONCEPTUAL PARA MEDIR LA SOSTENIBILIDAD DE FUENTES DE ENERGÍA

Ricardo Moreira da Silva y Marcos André Mendes Primo

### RESUMEN

*La matriz energética está compuesta de diferentes fuentes de energía en los diferentes países. Las posibilidades de elección y la decisión para el uso e inversiones en energía pueden llevar a muchas respuestas y daños económicos, ecológicos y/o sociales en diferentes niveles de sostenibilidad. En este artículo se propone un marco conceptual basado en los daños y perjuicios producidos y que compara sostenibilidad, clasificándola por su nivel, teniendo en cuenta todo el proceso de captura, transformación y consumo de energía (y no sólo su uso) de las fuentes de energía utilizadas en la matriz eléctrica nacional. Además de las cuestiones económicas, ambientales y sociales tradicionales, verificadas a través de la Triple Top Line, el marco*

*considera también, por medio de la Teoría de la Agencia, los daños adicionales a los actores e instituciones relacionadas con las políticas energéticas. La metodología utilizada para su construcción fue: 1) la construcción de tablas fuerza de conducción - estado - respuesta de las fuentes de energía, con enfoque en la sostenibilidad; 2) sistematización del modelo y 3) validación del marco de referencia a través de ANOVA entre bloques al azar. Se realizó una aplicación de este marco en el contexto de Brasil y se concluye que paradigmas establecidos por el sentido común, tales como 'las hidroeléctricas no emiten CO2' y 'la energía nuclear es insostenible' no se mantienen.*