INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGÉTICAS E NUCLEARES

Autarquia associada à Universidade de São Paulo

Desenvolvimento e Análise de um Índice de Sustentabilidade Energética
utilizando Lógica Fuzzy

Francisco Carlos Barbosa dos Santos

Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de Tecnologia
Nuclear – Reatores.

Orientador:

Prof. Dr. Álvaro Luiz Guimarães Carneiro

SÃO PAULO

2010

DEDICATÓRIA

Dedico esta minha dissertação a algumas pessoas que direta ou indiretamente participaram de sua criação, me inspirando, apoiando ou mesmo me questionando quando era oportuno.

E finalmente, à pessoa mais importante de minha vida, Mônica Heloisa Braga Vasques, sem a qual muitas coisas para mim não teriam sentido de ser, a minha alma imortal e companheira de muitos percursos que com sua paciência agüentou e agüenta até hoje minhas idiossincrasias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço especialmente ao meu orientador, professor Dr. Álvaro Luiz Guimarães Carneiro, “*meu colimador*”, e pela sua infinita paciência para com as minhas limitações de tempo.

Agradeço também aos professores Marco Antônio Sandoval de Vasconcellos e ao professor Heron Carlos E. do Carmo pelo incentivo e pelas conversas edificantes que tenho com eles.

***“Nemo mortalium omnibus horis sapit
Nenhum homem é sábio em todas as ocasiões”
Sêneca (4 a.C. – 65 d.C.)***

RESUMO

A questão do Desenvolvimento Sustentável é um dos temas mais falados na atualidade, e a busca do seu entendimento um grande desafio aos pesquisadores. Mas buscar seu entendimento e as relações das dimensões que o compõe (dimensão econômica, social, ambiental e institucional) não é o único desafio. Mensurar o caminho do desenvolvimento de uma sociedade é um desafio igualmente grande, principalmente devido as intrincadas relações entre meio ambiente, sociedade e economia. Este trabalho apresenta uma nova abordagem na construção de um índice sintético de desenvolvimento sustentável do ponto de vista da sustentabilidade energética. Esta metodologia se baseou em arquétipos matemáticos estruturados na Lógica Fuzzy, permitindo assim incorporar novas bases de conhecimento, mesmo que com definições vagas. O resultado final é a criação de um Índice de Sustentabilidade Energética que pode ser acompanhado no tempo, e que permite comparações entre países, já que na sua construção utiliza-se a base de dados do Guia de Indicadores Energéticos de Desenvolvimento Sustentável da Agência Internacional de Energia Atômica, que apresenta uma metodologia mundialmente aceita de indicadores energéticos. Este índice foi concebido para se parecer com outros indicadores como Índice de Desenvolvimento Humano (IDH) elaborado pela Organização das Nações Unidas, o que permite um fácil entendimento, por ser um número entre zero e um.

Palavras-chave: Indicadores de Desenvolvimento Sustentável, Sustentabilidade, Indicadores, Indicadores de Sustentabilidade Energética.

ABSTRACT

Sustainable Development is one the most frequently addressed issues nowadays and the search for its comprehension is a major challenge for researchers. Nevertheless, to reach its understanding and the relations comprised (economic, social, environmental and institutional dimensions) is not the only challenge. To measure the route for a society development is an equally important matter, mainly due to intrinsic relations among environment, society and economy. This work presents a new approach in the construction of a synthetic index for sustainable development, under the point of view of energy sustainability. This methodology was based on mathematical archetypes structured in Fuzzy Logics, thus allowing the incorporation of new knowledge bases, even with vague definitions. The final result is the creation of an Energy Sustainability Index that may be accompanied along the time, allowing comparisons among countries, since it uses a database from the “Guia de Indicadores Energéticos de Desenvolvimento Sustentável” (Guide of Energy Indicators for Sustainable Development) from the IAEA. This guide presents an energy indicator methodology worldwide accepted and it was conceived to be similar to other indicators, such as the “Índice de Desenvolvimento Humano (IDH)” (Human Development Index), developed by The United Nations Organization and which is of easy comprehension, since it is represented by a number between zero and one.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVO E ASPECTOS RELEVANTES DO TRABALHO	16
3. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	18
3.1 Histórico	18
3.2 A importância do conceito de DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL	22
3.3 Os vários conceitos de Desenvolvimento Sustentável.....	26
3.3.1 Desenvolvimento Sustentável: Perspectiva Econômica	29
3.3.2 Desenvolvimento Sustentável: Perspectiva Social.....	32
3.3.3 Desenvolvimento Sustentável: Perspectiva Ecológica	32
3.3.4 Desenvolvimento Sustentável: Perspectiva Cultural e Geográfica	33
3.3.5 Desenvolvimento Sustentável: Perspectiva Política e Tecnológica	33
3.4 Principais indicadores de Desenvolvimento Sustentável.....	34
3.4.1 IDH – Índice de Desenvolvimento Humano	35
3.4.2 IPH – Índice de Pobreza Humana	35
3.4.3 IDG – Índice de Desenvolvimento Ajustado ao Gênero.....	36
3.4.4 MPG - Medida de Participação Segundo o Gênero	36
3.4.5 BCN - Balanço Contábil das Nações	37
3.4.6 BS - Barometer of Sustainability	38
3.4.7 DNA Brasil.....	38
3.4.8 DS - Dashboard of Sustainability	39
3.4.9 EF - Ecological Footprint.....	40
3.4.10 EPI - Environmental Performance Index	41
3.4.11 ESI - Environmental Sustainability Index.....	41
3.4.12 EVI - Environmental Vulnerability Index	43
3.4.13 IPG – Índice de Progresso Genuíno.....	43
3.4.14 HPI - Happy Planet Index.....	44
3.4.15 IDS - Indicadores de Desenvolvimento Sustentável do IBGE	44
3.4.16 Isew - Index of Sustainable Economic Welfare	45
3.4.17 LPI - Living Planet Index (Índice Planeta Vivo)	46
3.5 O crescimento econômico e a demanda por energia	49
4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS	53

4.1 Indicadores de Desenvolvimento Sustentável	53
4.2 Dimensões da Sustentabilidade	60
4.2.1 Dimensão econômica	62
4.2.2 Dimensão social	63
4.2.3 Dimensão ambiental	63
4.2.4 Dimensão Institucional.....	64
4.3 Os princípios de Bellággio na construção de indicadores de DS.....	64
4.4 Base de Indicadores Energéticos na Mensuração do Desenvolvimento Sustentável.....	67
4.4.1 <i>Guideline</i> da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA)	69
4.5 Ferramentas de Avaliação de Indicadores de Sustentabilidade	73
5. MATERIAIS E MÉTODOS	77
5.1 Base de Dados	77
5.2 Descrição da base de dados segundo as dimensões	79
5.2.1 Dimensão Social	79
5.2.2 Dimensão Ambiental.....	84
5.2.3 Dimensão Econômica	90
5.3 Metodologia de construção dos indicadores.....	95
6. LÓGICA FUZZY	97
6.1 Introdução / Base teórica.....	97
6.2 Vantagens da aplicação de lógica fuzzy na solução de problemas não lineares	98
6.3 Conjuntos Fuzzy	101
6.3.1 Operações com conjuntos fuzzy (união, intersecção e complementação)	104
6.3.2 O conceito de α -nível.....	105
6.4 Principais funções de pertinência	106
6.4.1 Funções triangulares.....	107
6.4.2 Funções trapezoidais.....	108
6.4.3 Funções gaussianas.....	109
6.5 A base de regras.....	110
6.6 Arquiteturas fuzzy – etapas	112
6.6.1 Fuzzificação	112
6.6.2 Base de Regras	112
6.6.3 Inferência Fuzzy.....	113
6.6.3.1 Método de Inferência de Mamdani	113
6.6.4 Defuzzificação	114

6.6.4.1 Métodos de defuzzificação	114
6.7 Aplicação da Arquitetura Fuzzy nos Indicadores Seleccionados	116
6.7.1 Etapas na Arquitetura Fuzzy do Índice de Sustentabilidade Energética (ISE).....	117
7. RESULTADOS	123
7.1 Análise dos resultados	124
8. CONCLUSÕES.....	128
8.1 Recomendações para trabalhos futuros	130
ANEXO I – BASE DE DADOS “IN NATURA”	131
ANEXO II – BASE DE DADOS NORMALIZADA PELO MÁXIMO - MÍNIMO.....	132
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	133

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Dimensões do ambientalismo e dos graus de sustentabilidade.....	25
TABELA 2: Comparação dos principais índices selecionados.....	48
TABELA 3: Vantagens e limitações dos indicadores e índices de Desenvolvimento Sustentável.....	55
TABELA 4: Indicadores energéticos para o Desenvolvimento Sustentável.....	67
TABELA 5: Comparação entre as três principais ferramentas de avaliação da sustentabilidade.....	71
TABELA 6: Indicadores de Sustentabilidade Selecionados.....	74
TABELA 7: consumo residencial de energia por região (%).....	80
TABELA 8: Gases de efeito estufa emitidos por termelétricas (2007 – 2016).....	84
TABELA 9: Emissão de gases de efeito estufa na geração de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis (1996).....	86
TABELA 10: Critérios adotados para o estabelecimento dos estados.....	119
TABELA 11: Conjunto de Regras Fuzzy Utilizadas.....	119
TABELA 12: Indicadores de sustentabilidade separados por dimensões e Indicador de Sustentabilidade Energética.....	122
TABELA 13: Matriz de correlação dos Indicadores de Sustentabilidade Energética.....	124

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Elementos chave do desenvolvimento sustentável e interconexões.....	23
FIGURA 2 – Fluxo circular completo das relações economia-meio ambiente.....	31
FIGURA 3: Cálculos dos Índices de Desenvolvimento Humano.....	37
FIGURA 4: Índice DNA Brasil: resultados e projeção	39
FIGURA 5: Uma das saídas do DS.....	40
FIGURA 6: Modelo esquemático da construção do ESI.....	42
FIGURA 7: Modelo de agregação do Live Index Planet.....	47
FIGURA 8: Demanda de energia e IDH.....	49
FIGURA 9: Pirâmide de informação.....	50
FIGURA 10: Pirâmide de informação associada ao tipo de utilizador.....	51
FIGURA 11: Etapas na construção de um indicador sintético.....	53
FIGURA 12: Dimensões do Desenvolvimento Sustentável	59
FIGURA 13: Evolução do Índice de Gini.....	77
FIGURA 14: fração da renda gasta com consumo de energia.....	79
FIGURA 15: Participação das diversas fontes geradoras na matriz elétrica brasileira.....	82
FIGURA 16: Emissão das termelétricas e das hidrelétricas no período de 2007 a 2016.....	84
FIGURA 17: Evolução do PIB per capita 1995 – 2008 (R\$ deflacionados).....	87
FIGURA 18: Nível de Investimento no Brasil (R\$ milhões).....	89
FIGURA 19: Desenvolvimento e demanda energética por habitante.....	90
FIGURA 20: Consumo de Energia Comércio e Transportes (10^3 tep).....	92
FIGURA 21: Etapas do Raciocínio Fuzzy.....	97
FIGURA 22: conjunto fuzzy dos números naturais “pequenos”	100
FIGURA 23: Operações com subconjuntos fuzzy: (a) intersecção; (b) união; (c) complemento.....	102
FIGURA 24: α -níveis $[A]^\alpha$ e $[A]^0 \neq U$	103

FIGURA 25: Função de pertinência triangular.....	105
Figura 26: Função de pertinência trapezoidal.....	106
FIGURA 26: Função de pertinência gaussiana.....	107
FIGURA 28: Base de regras fuzzy em sua forma geral.....	108
FIGURA 29: etapas do raciocínio fuzzy.....	109
FIGURA 30: Método do centro de gravidade.....	113
Figura 31: Defuzzificação por centro de gravidade.....	114
FIGURA 32: Arquitetura aplicada na base de indicadores selecionados.....	115
FIGURA 33: Parte da Arquitetura aplicada na base de indicadores selecionados.....	116
FIGURA 34: Módulo de fuzzificação.....	116
FIGURA 35: Função de pertinência.....	117
FIGURA 36: Conjunto de regras estabelecidas no MATLAB.....	118
FIGURA 37: Representação gráfica do módulo de inferência no MATLAB.....	120
FIGURA 38: Indicador de Sustentabilidade Energética (ISE).....	122
FIGURA 39: Indicadores que compõe o Índice de Sustentabilidade Energética.....	123

1. INTRODUÇÃO

O Desenvolvimento Sustentável é sem dúvida, o conceito mais propalado na atualidade, tratando em atender a eficácia econômica, simultaneamente com os requisitos de ordem ecológica, social, cultural, tecnológica e política. Segundo a Comissão Mundial de Meio Ambiente e Desenvolvimento (*UNCED*) que publicou o *Relatório de Brundtland* [1], define, “Desenvolvimento Sustentável como sendo aquela que satisfaz as necessidades presentes, sem comprometer a capacidade das gerações futuras de suprir suas próprias necessidades”, ou seja, é o desenvolvimento econômico, social, científico e cultural das sociedades, garantindo mais saúde, conforto e conhecimento, sem exaurir os recursos naturais do planeta [2,3].

Como resposta ao Relatório de Brundtland e tendo por base suas recomendações, outra Conferência foi convocada pela Assembleia Geral das Nações Unidas e realizada no Rio de Janeiro, a ECO-92 [4], que configurou-se como importante marco de reflexão sobre a questão ambiental e a sua relação com o desenvolvimento, uma vez que os debates giraram em torno de estratégias de ações que pudessem ser adotadas pelos países periféricos na direção de um Desenvolvimento Sustentável, bem como das convenções sobre mudança climática e diversidade biológica.

Um dos desafios da construção do Desenvolvimento Sustentável é o de criar instrumentos de mensuração, tais como indicadores do desenvolvimento [5]. Indicadores são ferramentas constituídas por uma ou mais variáveis que, associadas através de diversas formas, revelam significados mais amplos sobre os fenômenos a que se referem. Indicadores de Desenvolvimento Sustentável são instrumentos essenciais para guiar a ação e subsidiar o acompanhamento e a avaliação do progresso alcançado rumo ao Desenvolvimento Sustentável. A conquista do Desenvolvimento Sustentável, atualmente uma aspiração de abrangência universal, toma feições concretas em cada país, nasce de suas peculiaridades e responde aos problemas e oportunidades de cada nação. A escolha dos Indicadores de Desenvolvimento Sustentável reflete as situações e especificidades de cada país, apontando ao mesmo tempo para a necessidade de produção regular de estatísticas sobre os temas abordados.

O trabalho de construção de Indicadores de Desenvolvimento Sustentável no Brasil é baseado no movimento internacional liderado pela Comissão para o

Desenvolvimento Sustentável (CSD) - *Commission on Sustainable Development*, das Nações Unidas [6], que estabelece as diretrizes de elaboração e levantamento. No Brasil, o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [7] é o órgão responsável pelo gerenciamento dos dados pertinentes aos indicadores. Os Indicadores cumprem funções e reportam-se a fenômenos de curto, médio e longo prazo, e servem para identificar variações, comportamentos, processos e tendências, indicando as necessidades e prioridades para a formulação, monitoramento e avaliação de políticas e tomadas de decisão.

A apresentação dos Indicadores segue o marco ordenador proposto pela Comissão de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas, que os organiza primeiramente em quatro dimensões: ambiental, social, econômica e institucional. Em uma segunda etapa, as *dimensões* são divididas em *temas* e posteriormente estes *temas* são subdivididos em *subtemas* os quais são chamados de *indicadores*. Os indicadores se correlacionam de diversas maneiras gerando uma dificuldade de interpretação e extração de informações neles contidos.

Existe uma grande riqueza de dados e informações que se aplicam ao gerenciamento do Desenvolvimento Sustentável. Encontrar a informação adequada no momento preciso e na escala pertinente de agregação é uma tarefa difícil.

Segundo Veiga [8], a busca por um indicador de sustentabilidade é um desafio na superação de obstáculos teóricos devido às várias ambigüidades que caracterizam as noções de renda, de riqueza e de bem-estar.

“... não pode haver um indicador que consiga revelar simultaneamente grau de sustentabilidade do processo socioeconômico e grau de qualidade de vida que dele decorre. Talvez sejam dois lados de uma mesma moeda, mas nenhum método contábil ou estatístico permite que ambos sejam expressos por uma única fórmula sintética. Isto significa que a única maneira de bem utilizar tais indicadores na orientação de políticas requer necessariamente algum tipo de consorciação.”[8].

Assim, faz-se necessário a utilização de indicadores que retratem a “situação da sustentabilidade”, de forma simples, que defina a própria idéia, apesar da complexidade das inter-relações do homem com o meio natural. O processo de desenvolvimento destes indicadores deve contribuir para uma melhor compreensão do que seja o desenvolvimento sustentável, sempre focando as mudanças nas tendências

mundiais que hoje podem ser sintetizadas como sendo: a necessidade de uma visão mais dinâmica que envolve riscos globais; problemas de crescimento populacional e de urbanização; aguçamento da dualidade socioeconômica; rupturas e descontinuidades tecnológicas; consciência intergeracional. Neste caso, uma nova abordagem faz-se necessária, a de indicadores de desenvolvimento baseados em indicadores energéticos. O acesso a serviços energéticos é uma condição essencial para a manutenção do bem estar social e da qualidade de vida das pessoas. Neste sentido, o acesso a fontes de energia de forma adequada, confiável e de qualidade geram externalidades positivas para a sociedade.

2 OBJETIVO E ASPECTOS RELEVANTES DO TRABALHO

Existe um consenso a respeito da necessidade de adotar medidas que vão além do Produto Interno Bruto (PIB) para analisar e avaliar o desenvolvimento e bem estar da sociedade, sendo que já foram construídas diversas métricas. Contudo, não se chegou a um consenso sobre a sua utilização enquanto medidas dos diversos determinantes do bem estar, bem como a validação universal de um único ou um conjunto de indicadores que englobem todas as dimensões do desenvolvimento sustentável (dimensões econômica, social, ambiental e institucional) procurando entender as relações do homem com o meio ambiente.

O objetivo principal desse trabalho está em desenvolver um método de análise que facilite a interpretação da informação dos dados, utilizando ferramentas matemáticas, tornando assim possível o monitoramento e avaliação de resultados, e contribuindo na análise e tomada de decisão de políticas de Desenvolvimento Sustentável. A metodologia desenvolvida utiliza aplicação da Lógica Fuzzy ou Lógica Nebulosa, baseada em um conjunto de regras desenvolvidas através de um banco de conhecimento, constituindo uma ferramenta poderosa em capturar informações vagas, em geral descritas em uma linguagem natural posteriormente convertida em valores numéricos.

A concepção norteadora desse trabalho está vinculada a publicação *“Energy Indicators for Sustainable Development: Guidelines and Methodologies”* (EISD) [9] da Agência Internacional de Energia Atômica desenvolvido em parceria com outros organismos internacionais como a *United Nations Department of Economic and Social Affairs* (UNDESA) [10] e a *International Energy Agency* (IEA). Segundo a Agência Internacional de Energia Atômica, os indicadores, para serem úteis, devem evoluir ao longo do tempo, de modo a refletir condições, prioridades e capacidades específicas de cada país (IAEA, 2005). O referido trabalho, assim como outros que lhe precederam, que são parte de um projeto maior teve como propósito apresentar o conjunto de indicadores energéticos para o desenvolvimento sustentável, para avaliação e uso, particularmente em nível nacional, e para servir de ponto de partida para o desenvolvimento de um conjunto mais compreensivo e universalmente aceito de indicadores sobre energia, relevantes para o desenvolvimento sustentável.

O trabalho aqui proposto tem um interesse principal na questão energética voltado à questão da sustentabilidade procurando correlacionar indicadores baseados em recomendações institucionais, assunto este de certa forma pouco explorado, contribuindo como uma nova abordagem nas pesquisas desse tema importante.

3. DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

3.1 Histórico

Pode-se dizer que o começo das preocupações da atuação do ser humano sobre o meio ambiente data do fim da década de 1960 e começo da década de 70. Porém, no começo do século XX nos Estados Unidos, ocorreu uma cisão nas teorias sobre proteção ambiental natural, que se dividiram em preservacionismo e conservacionismo. O preservacionismo teve como princípio a proteção de áreas virgens de qualquer tipo de exploração do homem que não fosse recreativa ou educacional. Já o conservacionismo, baseado na ciência florestal alemã, teve como filosofia o planejamento eficiente e racional do uso dos recursos naturais. [6, 11]

Com a criação da Organização das Nações Unidas (ONU) em 1945, quatro anos depois em 1949 foi feita a primeira “Conferência das Nações Unidas para a Conservação e uso dos Recursos” nos Estados Unidos. Nesta conferência foram discutidas questões sobre: recursos naturais, interdependência de recursos, segurança alimentar, combustíveis e energia, novas tecnologias, gestão de recursos hídricos. Esta primeira conferência teve um foco científico e não político, pois esta primeira conferência não tinha poder para impor compromissos governamentais, porém, estava lançada a semente do processo que mais tarde seria chamado de Desenvolvimento Sustentável.

Os primeiros movimentos ambientalistas surgiram após esta conferência, como um questionamento às atividades humanas sobre o ecossistema terrestre. Este movimento se caracterizou como sendo um movimento ativista e político, afirmando que a degradação ambiental só poderia ser evitada se a humanidade mudasse seus valores e instituições sociais. Como resultado deste movimento alguns países ao final da década de 1960, dentre eles os Estados Unidos, elaboraram programas e políticas voltados para a proteção do meio ambiente e conservação dos recursos naturais, criando agências especiais voltadas para a administração. O Estado da Califórnia nos Estados Unidos foi um dos estados pioneiros em políticas de conservação ambiental, bem como em políticas energéticas sustentáveis. [11]

Porém havia a necessidade de uma avaliação científica dos problemas ambientais. Em 1968 e 1972 foram realizadas duas conferências internacionais coordenadas pela ONU, para o estabelecimento de um programa específico para tratar

das questões ambientais, denominado de Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA).

A conferência de 1968 também conhecida como “Conferência da Biosfera” realizada em Paris, teve como foco a conservação do meio ambiente natural. E a de 1972 também chamada de “Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente Humano” ou mais conhecida como “Conferência de Estocolmo”, que foi o marco nas discussões sobre questões ambientais levando em consideração aspectos políticos, sociais e econômicos relacionados aos problemas ambientais. [6,11]

Na Conferência de Estocolmo foram produzidos três documentos: a Declaração de Estocolmo que registrou os principais debates, delineando metas gerais e objetivos de proteção ambiental, sem, no entanto estabelecer cláusulas de cumprimento obrigatório; um Plano de Ação que apresentou um conjunto de atividades e recomendações em avaliação ambiental, administração ambiental e medidas para fomentar o conhecimento científico e uma Lista de Princípios. A Lista de Princípios apontou 26 princípios classificados em cinco categorias: [6, 11, 12]

Categoria 1: os recursos naturais devem ser resguardados e conservados; a capacidade terrestre de produção de recursos renováveis deve ser mantida e os recursos não renováveis devem ser compartilhados.

Categoria 2: o desenvolvimento e a manutenção da qualidade ambiental devem se constituir em um só objetivo, devendo ser oferecidos assistência e incentivo aos países em desenvolvimento para que promovam uma administração ambiental racional.

Categoria 3: os países devem estabelecer padrões nacionais de administração e exploração de recursos que também atendam aos princípios de cooperação internacional.

Categoria 4: os níveis de poluição não devem exceder a capacidade de recuperação dos ecossistemas, devendo ser especialmente evitada a poluição dos oceanos.

Categoria 5: ciência, tecnologia e pesquisa devem oferecer novos métodos e instrumentos para a conservação dos sistemas naturais.

Estes acordos estabelecidos na Conferência de Estocolmo foram formulados através de textos genéricos, com pouco detalhamento, o que gerou interpretações

particulares de cada país participante, bem como problemas de transformação destes princípios em leis nacionais, além de sua fiscalização.

Um estudo muito importante feito em 1972 pelo Clube de Roma, uma organização composta por empresários, cientistas, jornalistas e demais participantes influentes solicitaram ao Grupo de Dinâmica Sistêmica e Modelagem Computacional do Instituto de Tecnologia de Massachusetts (MIT) para analisar as causas de longo prazo e as conseqüências do crescimento na população mundial e da economia levando em consideração os seguintes pontos: industrialização acelerada, rápido crescimento demográfico, subnutrição generalizada, erosão de recursos não renováveis e destruição do meio ambiente. Este estudo denominado de Limite do Crescimento (*Limits to Growth*) apontava para a conclusão de que se mudanças radicais não fossem introduzidas nos modelos de produção e consumo, as mudanças sobre o meio ambiente seriam irreversíveis dentro de um século. Segundo Meadows [13]:

“O LTG defendia uma inovação profunda, proativa e social por meio de mudanças tecnológicas, culturais e institucionais para evitar um aumento na pegada ecológica da humanidade que fugisse à capacidade de suporte do planeta Terra. Embora o desafio global fosse apresentado como grave, o tom da obra era otimista, ressaltando, repetidamente, a forma pela qual as pessoas poderiam contribuir para reduzir os danos provocados pela aproximação (ou superação) dos limites ecológicos da Terra se, antecipadamente, fossem tomadas providências.”

O Brasil procurou a partir de 1980 estabelecer uma “Política Nacional do Meio Ambiente” que tinha como objetivo a *“preservação, melhoria e recuperação da qualidade ambiental propícia à vida, visando assegurar no país, as condições ao desenvolvimento econômico e social, aos interesses de segurança nacional e a proteção da dignidade humana.”* [14]

Em âmbito internacional, no ano de 1980 a *International Union for Conservation of Nature and Resources* (IUCN) lançou o texto “Estratégia Mundial de Conservação”, [15] onde estabeleceu a conexão necessária entre a conservação dos sistemas naturais e o contexto sócio-econômico, levando em consideração população, pobreza, crescimento econômico, tecnologias obsoletas de conservação de energia e

matérias primas. Este texto sistematiza as relações entre economia, crescimento, população e recursos naturais.

Em 1983 a ONU constitui a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento que teve como primeira dirigente a primeira ministra da Noruega Gro Harlem Brundtland. Durante quatro anos esta comissão, da qual o Brasil fez parte, estudou sistematicamente as relações entre os problemas ambientais e o modelo econômico vigente. O resultado destas análises foi publicado em 1987 na Comissão Mundial para o Meio Ambiente e o Desenvolvimento da Organização das Nações Unidas, na Noruega. [1]

Este documento denominado *“Nosso Futuro Comum”*, também conhecido como Relatório Brundtland, em que os governos signatários se comprometiam a promover o desenvolvimento econômico e social em conformidade com a preservação ambiental (COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO, 1991).

Nesse relatório foi elaborada uma das definições mais difundidas do conceito de desenvolvimento sustentável: “[...] *o desenvolvimento sustentável é aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer as possibilidades de as gerações futuras atenderem suas próprias necessidades*” [1].

De acordo com o Relatório Brundtland, foi definida a necessidade urgente de se encontrar formas de desenvolvimento econômico que se sustentassem, sem a redução drástica dos recursos naturais e sem provocar danos ao meio ambiente. O Relatório definiu também três princípios essenciais a serem cumpridos: desenvolvimento econômico, proteção ambiental e equidade social, sendo que, para cumprir tais condições, seriam indispensáveis mudanças tecnológicas e sociais. Este documento foi definitivo na decisão da Assembleia Geral das Nações Unidas, para convocar a Conferência sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, dada a necessidade de redefinir o conceito de desenvolvimento, para que o desenvolvimento sócio-econômico fosse incluído e, assim, a deterioração do meio ambiente fosse detida. A nova definição poderia surgir somente com uma aliança entre os países desenvolvidos e em desenvolvimento [1].

Em 1992 foi realizado no Rio de Janeiro a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio 92) [6, 11, 13] que marca os esforços internacionais em direção à sustentabilidade. Esta reunião teve como objetivo principal a elaboração de estratégias buscando interromper e reverter os efeitos da degradação ambiental. Nesta conferência foram elaborados cinco documentos:

- Declaração do Rio ou Carta da Terra: declaração de princípios através dos quais são definidos os direitos e responsabilidades dos governos e pessoas sobre o meio ambiente.

- Agenda 21: plano de ação estabelecendo metas a serem atingidas no século XXI, que tem como objetivo transformar as relações sociais em busca da sustentabilidade. É um protocolo de intenções.

- Convenção sobre as Mudanças Climáticas: procurou definir medidas e metas para a emissão de gases do efeito estufa, reduzindo assim o aquecimento global.

- Declaração das Florestas: definiu os princípios para a conservação de florestas e matas nativas do ponto de vista sustentável.

- Convenção sobre Biodiversidade: definiu a necessidade da conservação da biodiversidade, dispondo sobre os direitos dos países com alta biodiversidade.

Em 2002, a ONU promoveu a Rio +10, na África do Sul, que teve como objetivo analisar se os princípios estabelecidos em 1992 foram seguidos e se o mundo estava caminhando para a sustentabilidade. Esta conferência chamada de “Cúpula Mundial do Desenvolvimento Sustentável” elaborou dois documentos: Declaração Política e Plano de Implementação, reafirmando o compromisso entre crescimento econômico, justiça social e proteção ambiental. Porém esta conferência estabeleceu novamente princípios e metas, porém, não estabeleceu os meios de implementação, sendo que as negociações foram difíceis, onde vários países estabeleceram acordos bilaterais [11].

Pode-se observar que do ponto de vista histórico do conceito de desenvolvimento sustentável, suas práticas e modelos pouco avançaram nas últimas três décadas, sendo que fatores econômicos relacionados à produção e consumo têm ainda grande peso sobre as demais questões ambientais na agenda.

3.2 A importância do conceito de DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Segundo Sachs [3, 16], a teoria do desenvolvimento sustentável, ou eco-desenvolvimento, foi criado porque a maior parte das teorias que procuraram desvendar os mistérios sociais e econômicos das últimas décadas não obteve sucesso. O modelo de industrialização tardia ou de modernização, que foi tema de diversas teorias nos anos 60

e 70, é capaz de modernizar alguns setores da economia, mas incapaz de oferecer um desenvolvimento equilibrado para uma sociedade inteira. De acordo com Brüseke (apud SACHS [17]), a modernização, não acompanhada da intervenção do estado racional e das correções partindo da sociedade civil, desestrutura a composição social, a economia territorial e seu contexto ecológico. Emerge daí a necessidade de uma perspectiva multidimensional, que envolva economia, ecologia e política ao mesmo tempo, como busca fazer a teoria do desenvolvimento sustentável.

“O desenvolvimento econômico necessário à redução da pobreza, aliado ao crescimento populacional, implicará num significativo aumento da demanda por energia nas próximas décadas. Os impactos ambientais resultantes gerarão um conjunto de dilemas e desafios cuja solução demandará um complexo arranjo de cooperação entre os países com medidas de longo prazo” [16]

As ações antrópicas motivaram boa parte dos problemas ambientais que a sociedade moderna vive, sejam eles os de escassez de recursos naturais, importantes para a satisfação do padrão de vida, ou os de poluição e seus efeitos. Desta forma, o problema do desenvolvimento sustentável deve focar três elementos chaves e suas respectivas interconexões como apresentado na FIG. 1.

FIGURA 1: Elementos chave do desenvolvimento sustentável e interconexões [17]

A década de 1970 pode ser vista como um marco delineador entre dois períodos distintos: um período antes de 1970 baseados no crescimento econômico e da

exploração dos recursos naturais e do meio ambiente sem levar em consideração qualquer impacto para as gerações futuras e após 1970, quando os problemas dos recursos naturais e do meio ambiente começaram a ser entendidos e tratados como uma necessidade de gestão, surgindo daí o conceito de desenvolvimento sustentável.

Pode-se simplificar esta visão em quatro posições [18, 19]:

- uma posição extremista, dita preservacionista, centrada na preservação integral da biosfera. Nada do que se constitui a biosfera deve ser prejudicado pela ação humana. Salvo situações de emergência, este não tem direito algum sobre os recursos naturais. Os elementos não humanos da natureza possuem, em contrapartida, direitos que o homem deve respeitar. As condições éticas estendem-se, portanto à natureza inteira e são válidas para toda a sucessão de tempos futuros. Esta abordagem corresponde à corrente denominada de *Deep Ecology* ou Ecologia Profunda.

- uma atitude dominada pela eficiência econômica e o seu instrumento privilegiado, a análise dos custos e benefícios. Esta concepção fundamenta-se no utilitarismo e nos direitos de propriedade, a fim de permitir ao mercado regular a exploração de recursos. O otimismo tecnológico e as possibilidades de substituição em função dos preços deixam o campo livre à exploração dos recursos naturais e do meio ambiente. Está ausente qualquer consideração ética, tanto intrageracional quanto intergeracional.

- uma atitude, freqüentemente chamada conservacionista, que vê nos recursos e nos problemas ambientais uma barreira tamanha para o crescimento econômico que o mesmo deverá parar. São adeptos do crescimento zero ou do chamado estado estacionário. Trata-se de um ponto de vista antropocêntrico, conseqüentemente distinto da primeira atitude. Diferencia-se igualmente da segunda abordagem pela sua preocupação em conservar uma base de recursos naturais. As considerações éticas intrageracionais prevalecem, todavia nitidamente sobre as preocupações intergeracionais. Aquelas que levam a sacrificar o crescimento presente em benefício das gerações futuras.

- uma atitude que vê nos recursos e nos problemas ambientais um sério obstáculo ao crescimento econômico, mas que pensa ser possível um compromisso, com a ajuda de uma definição mais adequada das barreiras a respeitar e de uma civilização hábil em instrumentos econômicos de incentivo. Encontram-se aqui os mais fervorosos

adeptos do desenvolvimento sustentável. As considerações éticas intra e intergeracionais são levadas em conta de maneira equilibrada. Estas levam a não sacrificar o desenvolvimento atual, mas a alterar-lhe as características para que perdure, ou seja, tem como objetivo “*não matar a galinha dos ovos de ouro*”.

A TAB. 1 apresenta as quatro visões com suas principais características.

TABELA 1 – Dimensões do ambientalismo e dos graus de sustentabilidade [19]

	Cornucopiana	Adaptativa	Comunalista	Ecologia Profunda
Rótulo Ambiental.	Exploração de recursos, orientação pelo crescimento.	Conservacionismo de recursos, posição gerencial.	Preservacionismo de recursos.	Preservacionismo profundo.
Tipo de Economia.	Economia anti-verde, livre mercado.	Economia verde, mercado conduzido por instrumentos de incentivos econômicos.	Economia verde profunda. Economia de <i>steady – state</i> , regulação macroambiental.	Economia verde muito profunda, forte regulação para minimizar a tomada de recursos.
Estratégia de Gestão.	Objetivo econômico, maximização do crescimento econômico. Considera que o livre mercado em conjunção com o progresso técnico deve possibilitar a eliminação das restrições relativas aos limites e a escassez.	Modificação do crescimento econômico, norma do capital constante, alguma mudança de escala.	Crescimento econômico nulo, crescimento populacional nulo. Perspectiva sistêmica, saúde do todo (ecossistema); hipótese de Gaia e suas implicações.	Reduzida escala da economia e da população. Mudança de escala imperativa; interpretação literal de Gaia.
Ética.	Direitos e interesses dos indivíduos contemporâneos, valor instrumental na natureza.	Equidade intra e intergeracional (pobres contemporâneos e gerações futuras). Valor instrumental na natureza.	Interesse coletivo sobrepuja o interesse individual, valor primário dos ecossistemas e valor secundário para suas funções e serviços.	Bioética (direitos e interesses conferidos a todas as espécies). Valor intrínseco da natureza.
Grau de Sustentabilidade.	Sustentabilidade muito fraca	Sustentabilidade fraca	Sustentabilidade Forte.	Sustentabilidade muito forte.

Observa-se que entre estas quatro atitudes sobre o meio ambiente e os recursos naturais, as duas primeiras são a consequência de concepções reducionistas e unilaterais, enquanto as duas últimas dependem em diversos graus de posições de compromisso entre as dimensões econômica, social e ambiental.

Os autores mais ligados às teorias Cornucopiana e Adaptativa acreditam que a sustentabilidade pode advir do capital gerado pela capacidade humana em substituição ao capital natural. Já as teorias Comunalista e da Ecologia Profunda (*Deep Ecology*) que não deve ser confundida com a ciência da ecologia, articulam principalmente em torno de considerações éticas aplicadas a todos os elementos da natureza, e não apenas ao homem, e desemboca geralmente em posições conservacionistas rígidas. Assim, para estes autores existem limites físicos naturais para o desenvolvimento [19].

3.3 Os vários conceitos de Desenvolvimento Sustentável

Um grande problema surge na questão do desenvolvimento sustentável: o que se entende por desenvolvimento e o que seria um “desenvolvimento sustentável”?

Porém, a complexidade deste tema, muito em voga na atualidade, principalmente devido às suas múltiplas dimensões e abordagens, tem dificultado a utilização mais consciente e adequada de ferramentas que buscam avaliar e mensurar a sustentabilidade.

Pode-se dizer que o desenvolvimento sustentável em sua visão mais difundida através do relatório Brundtland é a de satisfazer as necessidades das gerações atuais sem sacrificar as gerações futuras de suprirem suas próprias necessidades.

Porém, a própria definição acima encerra uma contradição, pois na medida em que os agentes econômicos tomam decisões para satisfazer as necessidades das gerações presentes, tais decisões com maior ou menor grau de impacto afetarão as decisões das gerações futuras.

Podemos citar como exemplo a construção da represa de Itaipu, que privou as gerações futuras de conhecerem as “Sete Quedas”. Assim, há que se aprofundarem as condições e definir critérios de gestão correspondentes, o que constitui um verdadeiro desafio para pesquisadores da área.

Desta forma, os problemas apresentados na tomada de decisão que afetam o meio ambiente e as gerações futuras podem ser decompostas em:

I) Multidimensionalidade: os problemas do desenvolvimento deixam de ser isoláveis (principalmente no tocante à esfera econômica) e passam a comportar várias dimensões. Segundo Fauchoux e O'Connor [18]:

“...os problemas dos recursos e do meio ambiente estão evidentemente ligados: um recurso poluído pode já não estar disponível para o uso que dele se espera; a extração de recursos não renováveis causa poluições locais ou regionais e a sua utilização é posta em causa da escala global pelo reforço do efeito estufa das emissões de CO₂; a exploração dos recursos renováveis e o agravamento das poluições põem em causa a diversidade biológica, que é uma das características da biosfera. Por outro lado, a existência de interações entre aquilo a que se pode chamar, segundo Passet (1979), a esfera econômica, a esfera natural e a esfera sociocultural, encontra-se no âmago das relações entre economia, recursos e ambiente. Ora, neste conjunto, a esfera econômica surge como um subconjunto as esferas sociocultural e natural que a englobam. Porém, inversamente, nenhum dos elementos das esferas englobantes pertence à esfera econômica. Esta situação explica a multidimensionalidade fundamental dos fenômenos de exploração e de esgotamento dos recursos naturais, assim como os da degradação do meio ambiente, e justifica a utilização, para a sua compreensão, de uma abordagem sistêmica adaptada a esta multidimensionalidade”.

II) Irreversibilidade: o crescimento econômico dos países já atingiu a biosfera como, por exemplo, a emissão de gases do efeito estufa (GHG), que atuam em escala global, provocando alterações climáticas, em reações complexas, que podem ser pensadas como irreversíveis à escala humana.

Outro aspecto importante é a extinção das espécies, que pode ser classificada como perda de patrimônio genético e, portanto, irreversível. Neste sentido, pode-se afirmar que o meio ambiente possui uma capacidade de resiliência, sendo que as

pressões que a humanidade “deposita” no meio ambiente são altas, podendo ocorrer um ponto de ruptura (*threshold*) nesta capacidade de resiliência ambiental. Ponto este no qual não haveria mais a possibilidade de retorno (irreversibilidade do sistema).

III) A presença de problemas de equidade, tanto intrageracionais como intergeracionais: as escolhas feitas em relação ao uso ou não dos recursos naturais (renováveis ou não renováveis) e do meio ambiente inserem-se necessariamente no tempo. Desta forma, supondo que as preferências atuais são conhecidas, as preferências futuras não o são. Neste caso, estabelecer regras que assegurem de modo equitativo a partilha do bem estar entre as gerações presentes e futuras é muito complicado, e deve ser analisado sob a luz da ética.

IV) Incerteza: dado que as relações entre o homem e o meio ambiente são complexas, surgem incertezas quanto às possibilidades que os progressos técnicos futuros reservam, ou quando às conseqüências exatas da degradação ambiental para as gerações futuras. Segundo Perrings [20]: *“... não se pode correr o risco de uma evolução irreversível da biosfera, mesmo que esta não seja certa, e deve-se, por conseqüência, orientar sistematicamente as escolhas em direção a opções que revelem serem mais prudentes”*.

Assim, todas estas dimensões devem ser abordadas ao se procurar entender as relações do homem com o meio ambiente. Vários economistas ao longo do tempo procuraram trabalhar vários destes aspectos.

Em Ricardo [21], por exemplo, encontra-se a idéia da produtividade decrescente da terra, onde ele explica que, primeiramente, as mais férteis seriam ocupadas e, com o crescimento da população, outras menos férteis passariam a ser usadas.

Pode-se dizer que o modelo do uso da terra apresentado por David Ricardo é semelhante àquele utilizado hoje para explicar o padrão de uso dos recursos minerais, onde geralmente se assume que as melhores reservas são usadas antes, para depois se expandir para áreas menos propícias como, por exemplo, a prospecção de petróleo. Apesar das semelhanças, o enfoque de sua análise era bastante diferente, pois seu modelo procurava explicar a renda dos senhores da terra do que as relações com o ambiente [18, 21].

Thomas Malthus [21], com a sua teoria do crescimento exponencial da população e da impossibilidade do crescimento de alimentos na mesma proporção, tem suas idéias retomadas, principalmente, com relação à demanda energética.

Pode-se observar que as questões referentes ao desenvolvimento e mais recentemente ao desenvolvimento sustentável são segundo Bellen [19]:

“o resultado de um relativamente longo processo histórico de reavaliação da crítica existente entre a sociedade civil e seu meio natural. Por se tratar de um processo contínuo e complexo, observa-se hoje que existe uma variedade de abordagens que procuram explicar o conceito de sustentabilidade. Esta variedade pode ser mostrada pelo enorme número de definições relativas a este conceito”.

Segundo Benneti [22]:

“O termo desenvolvimento sustentável é claramente carregado de valores, nos quais existe uma forte relação entre os princípios, a ética, as crenças e valores que fundamentam a sociedade ou comunidade e sua concepção de sustentabilidade. A diferença nas definições é decorrente das diferentes abordagens que se tem sobre o conceito. Portanto, o grau de sustentabilidade é relativo, dependendo do ponto de vista considerado, isto é em função do campo ideológico ambiental ou dimensão em que cada ator se coloca (LAFER, 1996). Bellia (1996, p.47) acredita que o problema está na própria junção de um substantivo (desenvolvimento) com um adjetivo (sustentável), que representa um juízo de valor próprio de cada indivíduo, e, portanto, não qualificável.”

3.3.1 Desenvolvimento Sustentável: Perspectiva Econômica

A partir de Georgescu – Roegen (1971) com a publicação do livro *“The Entropy Law and the Economic Process”*, [23] a economia passou a ser influenciada pelo paradigma termodinâmico, em especial, a segunda lei da termodinâmica.

Assim, podem-se distinguir quatro correntes: uma minimalista, uma maximalista e duas que podem ser classificadas como intermediárias. Neste caso, serão explanadas brevemente apenas a primeira (minimalista) e a intermediária.

A interpretação minimalista apenas aborda questões referentes à primeira lei da termodinâmica como as análises de saldo-matéria e às análises input-output. Do mesmo modo, foram desenvolvidos modelos de otimização dinâmica combinando recursos e poluição e integrando, na base do saldo-matéria, a reciclagem. Desta forma, introduz-se um elo entre os desperdícios e os inputs, mas mantendo unicamente o fato de que a reciclagem dos primeiros oferece possibilidades de substituição através do progresso técnico, libertando assim a sociedade da raridade de recursos [23, 24]

A principal vertente intermediária leva em conta uma barreira ambiental absoluta que pesa sobre o sistema econômico em função da segunda lei da termodinâmica (lei da Entropia). Desta forma, uma parte dos desperdícios, que não é reciclada, é lançada ao meio ambiente novamente na forma de poluição. Cabe ao meio ambiente assimilar estes resíduos, o que muitos autores atribuem como uma função econômica do meio ambiente. Porém, esta capacidade de absorção é limitada e nunca deve ser ultrapassada (*threshold*). Por outro lado, os recursos de energia fósseis e minerais que são recursos de estoque e estão submetidos à lei da entropia não podem ser reciclados, o que implica em um esforço de substituição entre estes recursos esgotáveis e outros ditos renováveis (álcool da cana, por exemplo), ou seja, a biomassa. Contudo, também na biomassa há limites de renovação o que representa uma barreira adicional.

A FIG. 2 ilustra bem a relação entre economia e meio ambiente e suas limitações ditadas pela segunda lei da termodinâmica. “A” representa a capacidade de assimilação e “U” a utilidade, “ER” e “RR” respectivamente os recursos naturais não renováveis e renováveis, “h” e “y” respectivamente às taxas de exploração e renovação, sendo que os fluxos de materiais são apresentados em traços contínuos e os fluxos de utilidade em traços pontilhados [18].

FIGURA 2 – Fluxo circular completo das relações economia-meio ambiente [18].

A FIG. 2 permite explicar o caráter circular entre economia e meio ambiente, apresentando a perspectiva econômica tradicional, tratando separadamente recursos naturais e poluição, mas, sobretudo, sublinha o caráter multidimensional dos bens e serviços ambientais [18].

Desta forma o conceito de desenvolvimento, crescimento e sustentabilidade econômica podem ser entendidos como focos separados que buscam alguma convergência na sustentabilidade. Pode-se dizer que crescimento econômico é a ampliação quantitativa da produção, ou seja, de bens e serviços que atenda às necessidades humanas, enquanto que, desenvolvimento econômico: é um conceito mais amplo e está associado às condições de vida da população ou a qualidade de vida dos residentes no país.

É importante ressaltar que o conceito associado a “boa” ou “má” qualidade de vida é algo bastante relativo e varia entre as diferentes culturas dos diferentes países ao longo do tempo. Sendo assim, definir o conceito de desenvolvimento de uma sociedade, comunidade ou país é algo complexo.

3.3.2 Desenvolvimento Sustentável: Perspectiva Social

O desenvolvimento sustentável da perspectiva social, procura focar no desenvolvimento do ser humano, buscando soluções que levem a uma sociedade mais igualitária, meritocrática e socialmente justa. Desta forma devem-se criar mecanismos, que permitam ao ser humano que ao maximizar os seus interesses pessoais ele esteja ao mesmo tempo gerando externalidades positivas à sociedade como um todo.

A ligação entre liberdade individual e a realização de desenvolvimento social vai muito além de uma relação constitutiva. O que as pessoas conseguem positivamente realizar é influenciado por oportunidades econômicas, liberdades políticas, poderes sociais e por condições básicas como saúde, educação e incentivo ao aperfeiçoamento de iniciativas.

Segundo Sem [25]:

“As liberdades substantivas incluem capacidades elementares como, por exemplo, ter condições de evitar privações como a fome, a subnutrição, a morbidez evitável e a morte prematura, bem como as liberdades associadas a saber ler e fazer cálculos aritméticos, ter participação política e liberdade de expressão, etc. Nesta perspectiva constitutiva, o desenvolvimento envolve a expansão dessas e de outras liberdades básicas: é o processo de expansão das liberdades humanas, e sua avaliação de bem estar nesta consideração.”

Assim, o desenvolvimento sustentável do ponto de vista social, pode ser visto como um processo de expansão das liberdades reais que as pessoas desfrutam.

3.3.3 Desenvolvimento Sustentável: Perspectiva Ecológica

A perspectiva ecológica engloba uma gestão integrada dos recursos naturais, levando em consideração os não renováveis, neste caso, fazendo uma gestão de estoque e proteção e os renováveis, levando em consideração sua taxa natural de reposição [26].

Deve levar a uma necessidade de ampliação da capacidade do planeta, através da utilização do potencial encontrado nos diversos ecossistemas, ao mesmo

tempo em que se mantém um mínimo de deterioração dos mesmos. Segundo Sacks [16, 27]:

“deve-se reduzir a utilização de combustíveis fósseis, diminuir a emissão de substâncias poluentes, adotar políticas de conservação de energia e de recursos, substituir recursos não renováveis por renováveis e aumentar a eficiência em relação aos recursos utilizados.”

Logo, o foco é o combate aos desperdícios, à conservação de recursos finitos, mantendo-se uma ética ambiental mais solidária com a natureza e com as gerações futuras.

3.3.4 Desenvolvimento Sustentável: Perspectiva Cultural e Geográfica

Este enfoque deve buscar uma melhor distribuição da população humana e das atividades econômicas, procurando evitar “pontos de pressão” sobre o meio ambiente e das variedades culturais existentes. Deve buscar o fomento ao desenvolvimento de soluções locais na cadeia produtiva, bem como agregar valor à produção local em busca de uma melhor qualidade de vida regional. Segundo Bellen [19, apud Sacks]:

“... a sustentabilidade cultural, a mais difícil de ser concretizada segundo Sacks (1997), está relacionada ao caminho da modernização como o rompimento da identidade cultural dentro de contextos sociais específicos. Para Sacks, o conceito de desenvolvimento sustentável refere-se a uma nova concepção de limites e ao reconhecimento das fragilidades do planeta, ao mesmo tempo em que enfoca o problema socioeconômico e da satisfação das necessidades básicas das populações.”

3.3.5 Desenvolvimento Sustentável: Perspectiva Política e Tecnológica

O caminho para o desenvolvimento sustentável passa necessariamente pela criação de sociedades mais politizadas e com o desenvolvimento de tecnologias mais limpas e eficientes do ponto de vista energético [27].

Assim a criação de condições para a participação efetiva da sociedade civil no planejamento e controle das políticas públicas, a partir de informações desagregadas é de fundamental importância. Além disto, faz-se necessário o desenvolvimento de uma filosofia, na administração pública, voltada para o coletivo e seus interesses, de forma a evitar qualquer prática de vantagens (clientelismo) gerando distorções e externalidades negativas para a sociedade [28].

Sob o prisma de vista tecnológico, o governo deve atuar junto com a sociedade civil e o setor privado para o fomento ao desenvolvimento de pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias mais eficientes e menos poluentes, bem como garantir que o intercâmbio destes novos conhecimentos científicos e tecnológicos possa beneficiar a sociedade como um todo.

3.4 Principais indicadores de Desenvolvimento Sustentável

A grande complexidade do tema desenvolvimento sustentável e a sua inter-relação com diversas áreas do conhecimento humano, representa um grande desafio para a sua compreensão. Desta forma, ajudar os agentes que fazem políticas públicas ou mesmo dentro das empresas a tomarem decisões que ajudem no caminho do desenvolvimento se torna um grande desafio aos pesquisadores, principalmente no tocante à “mensuração” do desenvolvimento.

Neste caso, faz-se necessário a utilização de indicadores que retratem a “situação da sustentabilidade”, de forma simples, que defina a própria idéia, apesar da complexidade das inter-relações do homem com o meio natural. Sendo que o processo de desenvolvimento destes indicadores deve contribuir para uma melhor compreensão do que seja o desenvolvimento sustentável, sempre focando as mudanças nas tendências mundiais que hoje podem ser sintetizadas como sendo: a) a necessidade de uma visão mais dinâmica que envolve riscos globais; b) problemas de crescimento populacional e de urbanização; c) aguçamento da dualidade socioeconômica; d) rupturas e descontinuidades tecnológicas; e) consciência intergeracional [18].

O processo de construção destes indicadores deve abordar quatro dimensões: a dimensão ambiental, econômica, social e institucional, sendo que em cada uma destas dimensões devem ser escolhidos os temas e, em seguida os subtemas, que são os

indicadores. O Brasil, por exemplo, utiliza-se dos indicadores baseados na CSD (*Comission of Sustainable Development*) [29] constituídos em 49 indicadores.

Autores como Jacques Markovitch defendem que haja a necessidade de duas dimensões adicionais que complementem as quatro dimensões acima mencionadas: a da inovação tecnológica e a do empreendedorismo, pois as sociedades que investirem também nestas dimensões, terá mais chances de trilhar o caminho da sustentabilidade.

Em 2009, foi feito um esforço para catalogar e avaliar os principais indicadores de sustentabilidade que existem no mundo. Anne Louette [30] foi à organizadora deste trabalho.

3.4.1 IDH – Índice de Desenvolvimento Humano

Definição: procura mensurar o desenvolvimento de uma sociedade através da combinação de três enfoques distintos: todas as pessoas devem desfrutar de uma vida longa e saudável, adquirir conhecimento e ter acesso aos recursos necessários a um padrão de vida decente. Desta forma, este índice agrega um indicador de longevidade, baseado na expectativa de vida ao nascer; um indicador de educação, baseado na taxa de alfabetização e um indicador de riqueza baseado no Produto Interno Bruto *per capita* [30].

Desvantagens: o IDH não leva em conta o que se poderia chamar de efeitos colaterais do progresso, como desemprego, aumento da criminalidade, novas necessidades de saúde, poluição ambiental, desagregação familiar, entre outros.

3.4.2 IPH – Índice de Pobreza Humana

Definição: procura mensurar as carências no desenvolvimento humano básico em termos do percentual de pessoas cuja expectativa de vida não atinge os 40 anos, do percentual de adultos analfabetos e do estabelecimento de condições econômicas para um padrão de vida aceitável em termos do percentual de pessoas sem acesso a serviços de saúde e água potável e do percentual de crianças menores de 5 anos com peso insuficiente [30].

Desvantagens: é um indicador pouco utilizado. Foi calculado apenas em 78 países.

3.4.3 IDG - Índice de Desenvolvimento Ajustado ao Gênero

Definição: leva em conta as mesmas dimensões do IDH, mas penaliza as desigualdades entre homens e mulheres. Quanto maior a disparidade entre os sexos no desenvolvimento humano básico, menor o IDG de um país, comparado com o seu IDH. O IDG é simplesmente o IDH descontado ou ajustado para baixo pela desigualdade entre os sexos [31].

Desvantagens: A igualdade entre homens e mulheres é uma parte importante do progresso humano, mas isso não se reflete no Índice de Desenvolvimento Humano nem no Índice de Pobreza Humana.

3.4.4 MPG - Medida de Participação Segundo o Gênero

Definição: revela se as mulheres tomam parte ativa na vida econômica e política. Incide nas desigualdades entre homens e mulheres em áreas-chave da participação econômica e política, bem como na tomada de decisões. Verifica a quota de assentos no parlamento ocupados por mulheres, de legisladores femininos, de funcionários superiores e gestores e de profissionais liberais e técnicos femininos. Também inclui a disparidade entre homens e mulheres em matéria de rendimentos, refletindo a independência econômica [30, 31].

Desvantagens: um alto rendimento não garante a igualdade do gênero: o Japão, por exemplo, está abaixo das Filipinas e Botsuana, apesar de ser um país desenvolvido.

A FIG. 3 apresenta os indicadores acima apresentados e que são utilizados no Relatório de Desenvolvimento Humano Calculado pelo PNUD, realçando tanto as semelhanças quanto as diferenças [30].

FIGURA 3: Cálculos dos Índices de Desenvolvimento Humano [30]

3.4.5 BCN - Balanço Contábil das Nações

Definição: o Balanço Contábil das Nações é uma metodologia para a elaboração de relatórios financeiros de países ou regiões, por meio do método *inquired balance sheet* e da equação básica da contabilidade: ativo menos passivo é igual ao patrimônio líquido, composto por dados físicos (recursos florestais) e financeiros. Tem por objetivo evidenciar a conta que cada cidadão terá que arcar diante dos fenômenos de mudanças climáticas globais e do aquecimento global, diante do aumento da concentração dos gases de efeito estufa, ou *greenhouse gas* (GHG).

Mostra situações de superávit ou déficit e permite reflexões individuais e coletivas sobre ações globais, regionais e locais em relação a políticas e mecanismos de preservação ambiental [30].

Desvantagens: é um indicador que procura avaliar os impactos no meio ambiente decorrentes da atividade humana, porém não leva em consideração os aspectos do desenvolvimento humano.

3.4.6 BS - Barometer of Sustainability

Definição: é uma metodologia que avalia e relata o progresso em direção a sociedades sustentáveis que combina, de modo coerente, diversos indicadores sociais e ambientais, fornecendo uma avaliação do estado das pessoas e do meio ambiente por meio de uma escala de índices. Oferece imagens claras, rapidamente comunicadas, da condição do ambiente, da condição das pessoas e, quando analisadas em conjunto, do progresso geral em direção à sustentabilidade. Também compara o bem-estar humano e o do ecossistema dentro das sociedades, a velocidade e o sentido da mudança e os principais pontos fortes e fracos [30, 31].

Desvantagens: abrange apenas as dimensões social e ambiental. Ainda é necessário testar o Barômetro como protótipo de instrumento de medição de saúde de ecossistemas em condições culturais e ecológicas bastante diferentes.

3.4.7 DNA Brasil

Definição: O índice tem como objetivo medir o progresso real e a qualidade de vida do País, em relação a uma situação ideal, projetada para ocorrer em 2029. O Índice DNA Brasil vai além das dimensões usadas pelo IDH (renda, longevidade e educação) e apura seu resultado tendo por base sete dimensões sociais e econômicas (sem deixar de considerar as dimensões demográficas da realidade brasileira) [30].

Desvantagens: utiliza um conjunto de indicadores (bem-estar econômico, competição econômica, condições socioambientais, educação, saúde, proteção social básica e coesão social), sendo que alguns destes indicadores são difíceis de se estimar, devido a pouca base de dados.

A FIG. 4 apresenta o Índice DNA Brasil para os anos de 2004 e 2005, bem como a intenção para 2029.

FIGURA 4: Índice DNA Brasil: resultados e projeção [30]

3.4.8 DS - Dashboard of Sustainability

Definição: é um índice agregado de vários indicadores de desempenho econômico, social, ambiental e institucional que mostra, visualmente, os avanços dos países em direção à sustentabilidade, utilizando a metáfora de um painel de veículo, onde se apresentam avaliações econômicas, ambientais, sociais e institucionais específicas de cada país. Assim é possível saber se eles se aproximam ou se distanciam de um panorama de sustentabilidade. O painel é adequado para tomadores de decisão e interessados em desenvolvimento sustentável. A ferramenta, disponível on-line, foi concebida para ser entendida por especialistas, mídia, formuladores de políticas públicas e o público em geral. A nova edição do painel promove indicadores para as Metas de Desenvolvimento do Milênio, especialmente para países em desenvolvimento. Esses indicadores ajudam a definir as estratégias de redução da pobreza e monitorar o alcance das metas [19].

Desvantagens: trabalha com índices e indicadores, utilizando-se de uma mediana. Os cálculos estão associados à: média aritmética; média ponderada e interpolação linear. Utiliza-se de programa específico. Os pesos de cada um dos indicadores não podem ser observados na interface geral da ferramenta.

A FIG. 5 apresenta uma das saídas do Dashboard. Observe que a saída é muito parecida com o painel de um automóvel, como se os tomadores de decisão estivessem “guiando” para a sustentabilidade. Onde o que está em vermelho apresenta situações críticas e em verde, situações consideradas sustentáveis.

FIGURA 5: Exemplo de saída da ferramenta *Dashboard of Sustainability*

3.4.9 EF - Ecological Footprint

Definição: é uma ferramenta de gerenciamento do uso de recursos naturais por indivíduos, cidades, nações e pela humanidade em geral. Este indicador ajuda indivíduos, organizações e governos a estruturar políticas, definir metas e acompanhar o progresso em direção à sustentabilidade. Do ponto de vista da sustentabilidade, quando a Pegada da Humanidade ultrapassa a quantidade de biocapacidade renovável, ocorre uma diminuição do capital natural, e isso é considerado insustentável. Contas da *Global Footprint* relativas aos últimos 40 anos indicam uma tendência de crescimento ao longo de 25 anos, além da quantidade de biocapacidade renovável. Em suma, a Pegada Ecológica da humanidade parece ter rompido os limites ecológicos e é, portanto, insustentável [19]. Acompanhar o efeito

acumulado do consumo humano de recursos naturais e da geração de resíduos é uma das chaves para alcançar a sustentabilidade.

Desvantagens: é um indicador que tem uma metodologia complexa relacionada aos fluxos de matéria e energia de um sistema (produtividade e energia) e estes com a sustentabilidade. Além disto, este indicador leva em consideração apenas a dimensão ambiental, não levando em consideração as demais dimensões da sustentabilidade. O processo de cálculo apresenta baixo grau de abertura. Opera seus índices ou indicadores intermediários, dificultando a visualização dos elementos da avaliação.

3.4.10 EPI - Environmental Performance Index

Definição: é um método para quantificar e classificar numericamente o desempenho ambiental de um conjunto de companhias e países. O EPI identifica metas de desempenho ambiental e mede em que grau cada país está se aproximando dessas metas utilizando os melhores dados disponíveis, o que fornece padrões de avaliação para os atuais resultados nacionais em controle de poluição e gerenciamento de recursos naturais. Os rankings agregados e divididos por itens facilitam comparações entre países, tanto globalmente quanto dentro de grupos relevantes com características semelhantes [31].

Desvantagens: em muitos países, principalmente em vias de desenvolvimento, a falta de dados é um fator crítico. Geralmente, falhas metodológicas no cálculo de dados, falta de séries temporais ou dados incomparáveis entre países, significam alguns dos desafios. Também devido à falta de dados, surge incerteza na construção da métrica. Embora os métodos estatísticos sejam cada vez mais sofisticados e permitam minimizar falhas, isto só é possível assumindo valores. Além disso, a aplicação destes métodos requer conhecimento e uma análise profunda dos pontos fortes e fracos de várias técnicas, à luz dos dados disponíveis.

3.4.11 ESI - Environmental Sustainability Index

Definição: é uma métrica que procura quantificar indicadores socioeconômicos, ambientais e institucionais que caracterizam e influenciam a

sustentabilidade ambiental na escala nacional. Abrangem os recursos naturais, níveis de poluição passados e presentes, iniciativas de gestão ambiental, contribuições para a proteção de bens globais e quantifica a capacidade que uma sociedade tem, para preservar os seus recursos ambientais de forma eficiente ao longo de várias décadas, avaliando o seu potencial para evitar maior degradação ambiental. Este indicador inclui 5 componentes (Sistemas ambientais, Redução do stress ambiental, Redução da vulnerabilidade humana, Capacidade institucional e social, Gestão global) que se baseiam em 21 indicadores, que por sua vez derivam de 76 variáveis, de acordo com a FIG. 6 [31].

FIGURA 6: Modelo esquemático da construção do ESI [31]

A Pegada Ecológica é uma das variáveis que fazem parte do seu cálculo. Para a normalização das variáveis, utiliza-se o seu desvio-padrão (com distribuição normal). Os três passos de agregação consistem em médias aritméticas com ponderações iguais.

Desvantagens: como outros índices apresentados anteriormente o problema de dados, é um fator crítico. A cobertura dos dados é limitada e as comparações de dados entre países nem sempre são possíveis, o que dificulta o seu cálculo e implicitamente influencia o que é medido. A seleção dos 21 indicadores, e das suas variáveis, resulta de uma pesquisa profunda das fontes de dados disponíveis, combinada com abordagens inovadoras para obter métricas alternativas e valores substitutos para problemas importantes, em que não existe uma rotina de monitoramento.

3.4.12 EVI - Environmental Vulnerability Index

Definição: Um índice de vulnerabilidade do meio ambiente, tomado como base para todo o bem-estar humano. Este índice se baseia na perspectiva de que os bens e serviços de um ecossistema podem ser afetados por acidentes naturais e humanos. Os indicadores do EVI são "indicadores inteligentes", selecionados de maneira a refletir a variedade de condições e processos da vulnerabilidade ambiental, minimizando a quantidade de dados necessária e permitindo uma boa caracterização da vulnerabilidade ambiental. O EVI tem por base 50 indicadores: 32 indicadores de risco, 8 indicadores de resistência e 10 indicadores que medem o dano. Os 50 indicadores têm igual ponderação e são agregados através de médias aritméticas. A escala para a normalização do EVI varia entre o valor 1 (alta resiliência/baixa vulnerabilidade) e 7 (baixa resiliência/elevada vulnerabilidade).

Desvantagens: segundo a própria Comissão de Geociência Aplicada do Pacífico Sul (SOPAC) que foi uma das idealizadoras do índice, é necessário ter 80% dos dados totais para que seja possível calcular o índice, sendo que, a falta de dados pode constituir um impedimento ao seu cálculo, embora o índice tenha captado com sucesso a natureza e o âmbito da vulnerabilidade ambiental. Este índice deve ser considerado em conjunto com um índice de vulnerabilidade econômica e de um índice de vulnerabilidade social, pois só assim se consegue analisar as três dimensões da sustentabilidade. De outra forma não fica completo [30, 31].

3.4.13 IPG – Índice de Progresso Genuíno

Definição: o IPG, também conhecido como *Genuine Progress Indicator* (GPI) é uma forma de medir o crescimento econômico de um país atrelado ao aumento do bem-estar de seus habitantes. O indicador propõe uma comparação com o PIB, buscando mostrar em que medida o crescimento econômico tradicional está comprometendo o futuro da vida no planeta [30].

Desvantagens: segundo Goossens [32] este índice apresenta alguma arbitrariedade na seleção de critérios e métodos de atribuição de valores monetários, o que torna a metodologia do GPI mais vulnerável de intervenção política. Deste

modo, ainda que o GPI já tenha sido utilizado em campanhas sociais, a sua avaliação na tomada de decisão tem sido debatida.

3.4.14 HPI - Happy Planet Index

Definição: é um índice que mostra a eficiência ecológica com a qual o bem-estar humano é obtido em todo o mundo, por nação ou grupo de nações. O HPI considera como input fundamental, o estoque de recursos a nível global que mantém a vida e permite as atividades humanas. O output é o objetivo do empenho de todos os humanos: bem-estar. Do ponto de vista conceitual, o HPI é uma medida da eficiência *input-output*, indicando o bem-estar produzido por unidade de recurso consumido [30].

Desvantagens: segundo Goossens [32] este índice é polêmico devido à subjetividade inerente (por exemplo, taxas reduzidas de felicidade na Europa de Leste, podem ser explicadas por fatores culturais, como a tendência nacional da "psique" para a melancolia). No entanto, as declarações pessoais dos níveis de satisfação parecem razoavelmente estáveis. A relevância política de medir felicidade é discutível. O impacto das ações políticas na felicidade é complexo e existem diversos fatores que contribuem e que se encontram fora do âmbito das ações políticas. O HPI não considera os critérios sociais e econômicos que iriam permitir conhecer a relação direta entre política e felicidade, isto é, saúde e educação.

3.4.15 IDS - Indicadores de Desenvolvimento Sustentável do IBGE

Definição: é um conjunto de indicadores de Desenvolvimento Sustentável do Brasil, com informações sobre a realidade brasileira que integram as dimensões social, ambiental, econômica e institucional. A construção de indicadores de desenvolvimento sustentável no Brasil faz parte do conjunto de esforços internacionais para concretização das idéias e dos princípios formulados na Agenda 21, da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento, realizada no Rio de Janeiro, em 1992, no que diz respeito à relação entre meio ambiente, desenvolvimento e informações para a tomada de decisões. Elaborado, inicialmente,

em 2002, segue o marco ordenador proposto pela Comissão de Desenvolvimento Sustentável (CDS), das Nações Unidas [7, 30].

A edição de 2008 reúne 60 indicadores, dentre eles 12 novos, relativos a questões emergentes, que propiciam uma avaliação mais completa do desenvolvimento sustentável. Estes indicadores estão divididos em quatro dimensões, sendo cada dimensão composta por temas e dentro de cada tema os indicadores propriamente ditos. As dimensões são:

- Ambiental: 23 indicadores
- Social: 19 indicadores
- Econômica: 12 indicadores
- Institucional: 6 indicadores

Sendo que os indicadores referem-se a quatro diretrizes:

- Equidade: aspectos distributivos;
- Eficiência: uso racional dos recursos;
- Adaptabilidade: diversificação, alternativas nos processos de produção;
- Atenção a gerações futuras: recursos e os bens econômicos, ecológicos e

humanos que serão legados às futuras gerações.

Desvantagens: os dados apresentam séries históricas pequenas e muitas vezes pouco confiáveis devido à mudanças de metodologia, não sendo feito o emparelhamento com os dados passados. Muitos dados estão expressos na forma de gráficos, e estes por sua vez não apresentam os dados com fácil visualização. Além disso a base de dados é incompleta.

3.4.16 Isew - Index of Sustainable Economic Welfare

Definição: é um índice monetário que visa substituir o PIB como medida de progresso das nações e vai muito além da medida total das atividades econômicas, pois leva em conta o quanto as políticas nacionais realmente resultam em melhor qualidade de vida para todos.

O ISEW pretende ajustar o PIB de um país, considerando custos que atualmente não são considerados e que foram adquirindo relevância. Assim, esta métrica parte do consumo privado, que é uma parcela do PIB. A série temporal dos

valores de consumo é ajustada por vários aspectos com o objetivo de obter um “*PIB*” mais adequado à mensuração do bem-estar social. Dado que os ajustes realizados são monetarizados (normalização e ponderação), recorre-se à soma no processo de agregação. É uma métrica que, do ponto de vista metodológico, pode ser considerada econômica e ajustada, agregada num só valor. Este índice considera três dimensões do desenvolvimento sustentável: social, ambiental e econômica [31].

Desvantagens: é um indicador que tem pouca comparação entre os resultados, pois são feitos por diferentes instituições e sem uma metodologia padrão. Além disso, alguns autores criticam o fato do ISEW ser uma métrica econômica, colocando mesmo em causa a sua utilidade, pois para a realização de correções dos custos financeiros é necessário considerar impactos não financeiros como as alterações climáticas e os impactos no meio ambiente.

3.4.17 LPI - Living Planet Index (Índice Planeta Vivo)

Definição: com o objetivo de monitorizar os progressos realizados face ao seu principal objetivo, a *World Wild Life* (WWF) criou o “*Living Planet Report*”, um relatório que fornece uma perspectiva quantitativa do estado do ambiente natural. O *Living Planet Index* (LPI) constitui a principal métrica deste relatório, tendo sido concebido em 1998 pela WWF, em parceria com a *Zoological Society of London*. Esta métrica tem por objetivo medir o estado dos ecossistemas, sendo que, atualmente, representa a perda contínua da biodiversidade. O LPI global sofreu um declínio de cerca de 30% nos últimos 35 anos. Torna-se cada vez mais improvável que, mesmo a modesta meta global da Convenção em Diversidade Biológica, que pretende reduzir a taxa de perda da biodiversidade global até 2010 seja cumprida. O LPI enfatiza apenas aspectos ambientais do desenvolvimento sustentável, não incluindo aspectos econômicos, nem sociais [30, 31].

O LPI global é calculado a partir de índices separados que são produzidos para espécies terrestres, marinhas e de água doce, e as três tendências médias são usadas para criar um índice agregado, conforme a FIG. 7.

FIGURA 7: Modelo de agregação do Live Index Planet [31]

Desvantagens: Problemas com dados, pois idealmente, uma métrica de alteração da abundância de espécies deveria medir uma amostra aleatória representativa estratificada nos principais tipos de habitats. Contudo, existem lacunas nos dados e para solucionar a questão, recorre-se a dados disponíveis de populações monitoradas. Problemas metodológicos, dado que o uso do LPI foi questionado por diversos grupos de trabalho [33], pois ponderando as espécies tropicais e temperadas de forma igual, existe um desequilíbrio geográfico no índice. Embora a cobertura global seja razoável, o LPI tem por base os dados disponíveis, que são inevitavelmente mais abundantes nas regiões mais estudadas.

Ao procurar observar a realidade com os seus processos e interações, a busca por um modelo que avalie todas as dimensões acaba tornando-se uma tarefa por demais complexa. Portanto, os modelos construídos são apenas uma cópia bem simples da realidade, já que se necessita da utilização de hipóteses simplificadoras. Sendo assim, qualquer indicador é apenas uma simplificação da realidade e, portanto possuem problemas e virtudes. Os principais problemas relacionados aos indicadores podem ser classificados em:

1. Baixa periodicidade, pequena publicação e poucos países analisados, não permitindo estabelecer critérios de comparação aceitos;

2. Limitações da metodologia: problemas com dados (falta de dados, transparências das fontes, limitação da métrica que originou estes dados), dificuldades de replicar a metodologia devido a problemas de arbitrariedade, comensurabilidade / incomensurabilidade;
3. Problemas na aceitação e divulgação: incertezas associadas aos resultados, dificuldade de interpretação, fraca comparabilidade dos resultados;
4. Falta de financiamento por parte de instituições governamentais e/ou privadas.
5. Problemas relacionados aos índices: alguns têm como objetivo conscientizar o público em geral enquanto outros servem a objetivos políticos ou científicos, não podendo ser compreendidos pelo público em geral.

De acordo com os problemas acima mencionados foi elaborada a TAB. 2, classificando os índices pelos critérios que não são atendidos:

TABELA 2: Comparação dos principais índices selecionados [31]

Indicadores	Problemas de Dados	Problemas Metodológicos	Problemas de Aceitação (Polêmicos)	
	Falta de dados disponíveis; Fontes duvidosas; Dados pouco acessíveis	Dificuldade de replicação da metodologia para obtenção do índice	Dificuldades de aceitação devido a problemas arbitrariedade/ comensurabilidade / incomensurabilidade	Dificuldade de interpretação dos resultados, baixo grau de comparação
IDH	x		x	
IPH	x		x	
IDG	x		x	
MPG		x		x
BCN	x		x	
BS	x	x		
DNA	x		x	
DS		x		x
EF		x		x
EPI	x	x		
ESI	x	x		
EVI	x	x		
GPI			x	
HPI			x	x
IDS	x	x		x
Isew	x		x	x
LPI	x	x	x	x

3.5 O crescimento econômico e a demanda por energia

Historicamente o homem sempre foi um usuário de fontes energéticas. Desde que descobriu o fogo, a busca por novas fontes energéticas sempre esteve pautada na agenda da humanidade. Porém, a demanda por energia também está intimamente relacionada com o grau de desenvolvimento de qualquer sociedade. As cidades estão se tornando cada vez maiores e mais densamente povoadas, onde a demanda por conforto e progresso material se acentuam cada vez mais, e, por conseguinte, grandes demandantes de energia. Em síntese as populações em geral buscam conforto moderno que para ser alcançado demanda cada vez mais energia em suas mais distintas e diversas formas. A FIG. 8 apresenta uma clara correlação entre o grau de desenvolvimento de um país, medido pelo seu IDH e a demanda energética medida em toneladas equivalentes de petróleo (tep/habitante) [34].

FIGURA 8: Demanda de energia e IDH

O atual padrão de consumo e produção desenvolvido pela população mundial é essencialmente capital intensivo e energia-intensivo, gerando muitos efeitos deletérios para o meio ambiente. Isto porque os ecossistemas naturais podem absorver muito mais facilmente pequenas agressões esparsas, do que constantes agressões ao longo do tempo, como as que vêm ocorrendo nos últimos anos.

Segundo Rippel [35]:

“De um modo geral, todos estes problemas têm um grande número de causas, tais como os acelerados crescimentos populacionais, industriais e econômicos, da expansão do setor de transporte, da intensificação produtiva da agricultura e até mesmo do turismo; e o que se vê é que mudam-se os setores e os problemas que surgem, porém as causas são sempre relacionadas à forma como a energia é produzida e utilizada.”

Portanto, estabelecer uma relação de causa e efeito entre crescimento econômico, desenvolvimento, demanda de energia e problemas ambientais é perfeitamente factível. Por exemplo, a poluição do ar e mesmo a chuva ácida ocorrem em virtude da queima de combustíveis fósseis e do transporte urbano; o aquecimento do planeta via efeito estufa e as mudanças climáticas são devido à queima de combustíveis fósseis; e os desmatamentos bem como as degradações do solo devem sua ocorrência em grande parte, ao uso da lenha como combustível [36].

Esta conexão entre energia e meio ambiente tem sido alvo de estudos em diversas esferas do conhecimento e da interdisciplinaridade. Segundo Carvalho & Goldemberg [37]:

O crescimento quantitativo da espécie humana e a evolução da qualidade de vida da mesma ocasionam via de regra, um processo geométrico de exploração dos recursos naturais renováveis e também dos não renováveis; isto porque o simples crescimento demográfico exige que o homem busque e abra novas áreas de produção capazes de serem exploradas, e que antes eram ocupadas por campos e florestas, para aí construir suas cidades.

A solução para o problema não é fácil, mas é possível, e o Brasil tem muito a contribuir nesse sentido. O papel do governo implica em manter uma matriz energética pouco intensiva em carbono, compatível com as necessidades de desenvolvimento, associada às medidas efetivas que reduzam a taxa de desmatamento e queimadas e estimulem o reflorestamento – pré-requisitos para a credibilidade perante a comunidade internacional.

O Brasil já ocupa posição privilegiada, com uma das matrizes energéticas mais limpas do mundo e boa parte da frota de veículos movida a bicomcombustível. O país é referência de como uma economia pode ser movida com níveis de emissões de gases de efeito estufa relativamente baixos [35].

Tratar a questão ambiental é essencial nos novos modelos para desenvolvimento da sociedade como um todo, mas para a implementação coerente de um processo de desenvolvimento pautado em sustentabilidade, a informação que sintetize a relação da sociedade com o meio ambiente é fundamental.

Para isso, necessita-se de apropriados indicadores cuja elaboração é essencial para a implementação de processos de desenvolvimento em bases sustentáveis; a informação tem um papel altamente relevante nesse contexto.

Sendo assim, informações que avaliem a sustentabilidade de um país do ponto de vista energético torna-se estratégia fundamental para os tomadores de decisão. Estabelecer critérios de análise, prognósticos e estruturar políticas voltadas para uma produção mais eficiente e limpa de energia será o “santo graal” de muitos planejadores ao longo do século XXI [38].

O próprio desenvolvimento requer o uso de fontes energéticas em suas diversas formas. A energia é o elo entre a sustentabilidade ambiental e as dimensões do desenvolvimento, em especial a dimensão econômica e social. Os recursos fósseis estão findando, além disto, a sua desigual distribuição pelo globo terrestre já é motivo suficiente para uma busca de fontes alternativa e para o planejamento energético [34, 38].

Além disto, o fornecimento de serviços energéticos é essencial para dotar o homem de uma melhor qualidade de vida. O consumo energético gera externalidade positivas, ou seja, os benefícios sociais são maiores que apenas os benefícios privados. Por exemplo, o uso da eletricidade nas escolas permite o ensino à noite, gerando maior produtividade ao trabalhador.

Finalmente é importante destacar que um planejamento energético sustentável requer a participação do governo, já que o nível de investimento é proibitivo para ser financiado apenas pelo setor privado, além do retorno ser no longo prazo, o que não condiz com os prazos do setor privado.

Portanto, a construção de instrumentos de avaliação (índices) que ajudem o governo no desenvolvimento de uma matriz energética sustentável é de fundamental importância no âmbito de qualquer nação.

4. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

4.1 Indicadores de Desenvolvimento Sustentável

A etimologia da palavra indicador tem origem no Latim *indicare* que significa revelar ou tornar de conhecimento público, estimar [37]. Os indicadores, quando colocados de forma numérica, são valores medidos ou derivados de mensurações quantitativas e/ou qualitativas, passíveis de serem padronizados e assim comparados com essas mesmas informações de outras áreas, regiões ou países. Possibilitam a seleção das informações significativas, a simplificação de fenômenos complexos, a quantificação da informação e a comunicação da informação entre coletores e usuários.

Assim, as principais usos dos indicadores são: avaliação de condições e tendências em relação aos objetivos e metas; capacidade de comparação de resultados considerando similaridade de metodologias; fornecimento de informações de advertência antecipando condições futuras.

A figura abaixo apresenta uma pirâmide de informação que relaciona quantidade e condensação de informação (FIG. 9).

FIGURA 9: Pirâmide de informação [38]

De igual forma verifica-se que, em relação ao público-alvo desse tipo de método, a agregação e quantidade de informação seguem uma ordem que poderá ser representada pelo mesmo tipo de pirâmide (FIG. 10).

FIGURA 10: Pirâmide de informação associada ao tipo de usuário [38]

É importante considerar alguns dos principais conceitos associados à utilização de indicadores e índices de desenvolvimento sustentável, sendo que os principais são:

- parâmetro - corresponde a uma grandeza que pode ser medida com precisão ou avaliada qualitativamente / quantitativamente, e que se considera relevante para a avaliação dos sistemas ambientais, econômicos, sociais e institucionais;
- indicador - parâmetros selecionados e considerados isoladamente ou combinados entre si, sendo de especial pertinência para refletir determinadas condições dos sistemas em análise (normalmente são utilizados com pré-tratamento, isto é, são efetuados tratamentos aos dados originais, tais como médias aritméticas simples, medianas, etc.;
- índice - corresponde a um nível superior de agregação, onde depois de aplicado um método de agregação aos indicadores é obtido um valor final; os métodos de agregação podem ser aritméticos (linear, geométrico, mínimo, máximo, aditivo) ou heurísticos (regras de decisão).

Uma vez estabelecido os principais conceitos é possível estabelecer uma taxonomia sobre os indicadores baseado em duas categorias de indicadores de sustentabilidade: a agregação e a precificação.

Para a *Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico* (OCDE) os indicadores são parâmetros que fornecem informações sobre o estado de um fenômeno [39], com uma extensão significativa. Ainda de acordo com a classificação da

OCDE, os indicadores ambientais podem ser sistematizados pelo modelo *Pressão-Estado-Resposta*, que se baseia em três grupos de indicadores:

Pressão - caracterizam as pressões sobre os sistemas ambientais e podem ser traduzidos por indicadores de emissão de poluentes, eficiência tecnológica, intervenção no território e de impacto ambiental;

Estado - refletem a qualidade do ambiente num dado horizonte de espaço/tempo; são por exemplo os indicadores de sensibilidade, risco e qualidade ambiental;

Resposta - avaliam as respostas da sociedade às alterações e preocupações ambientais, bem como à adesão a programas e/ou à implementação de medidas em prol do ambiente; podem ser incluídos neste grupo os indicadores de adesão social, de sensibilização e de atividades de grupos sociais importantes.

Uma variante do modelo Pressão-Estado-Resposta foi desenvolvido pela Agência de Proteção do Ambiente Norte Americana (USEPA – *United States Environmental Protection Agency*) [40] denominado de Pressão-Estado-Resposta-Efeitos, onde a categoria Efeitos está essencialmente relacionada com a utilização de indicadores para avaliar as relações existentes entre variáveis de pressão, estado e resposta. Este tipo de informação poderá ser muito útil para ajudar a delinear critérios de decisão no estabelecimento de objetivos/metas de política ambiental.

Ainda em relação aos possíveis modelos ambientais, nos quais poderá assentar o tipo de indicadores utilizados, a AEA (Agência Europeia do Ambiente) [41] propõe um modelo conceitual, denominado DPSIR, cuja filosofia geral é dirigida para analisar problemas ambientais. Este modelo considera que as Atividades Humanas (D - "*Driving forces*"), em especial, a indústria e os transportes, produzem Pressões (P - "*Pressures*") no ambiente, tais como emissões de poluentes, os quais vão degradar o Estado do Ambiente (S - "*State of the environment*"), que por sua vez poderá originar Impactos (I - "*Impacts on the environment*") na saúde humana e nos ecossistemas, levando a sociedade a emitir Respostas (R - "*Responses*") através de medidas políticas, tais como normas legais, taxas de produção de informação, os quais podem ser direcionadas a qualquer compartimento do sistema.

Ainda dentro do conceito de indicadores, é importante ressaltar que existem duas correntes de pensamento sobre a formulação teórica dos indicadores. A primeira

delas preconiza que para avaliar uma sociedade no rumo ao desenvolvimento sustentável é necessário uma quantidade muito grande de indicadores, organizados dentro de uma estrutura lógica que esteja alinhada de acordo com um marco conceitual, mas que não é possível a redução em um número ou poucos grupos de números. Esta corrente de pensamento se vale de sistemas de indicadores, que permitem aos tomadores de decisão e analistas uma visão ampla dos fenômenos analisados, porém devem ser observados todos ao mesmo tempo.

A segunda vertente teórica acredita que é possível condensar uma gama muito ampla de indicadores integrando-os em um ou poucos índices sintéticos, mediante o entendimento dos fenômenos associados às diversas dimensões da sustentabilidade. As etapas que compõem a construção de um indicador ou índice sintético podem ser observadas na FIG. 11:

FIGURA 11: Etapas na construção de um indicador sintético [28]

Cada uma das etapas compreende todo um processo em si, podendo ser aplicadas diferentes técnicas. Na presente dissertação foi adotado um processo de construção de um indicador de sustentabilidade energética sintético. Ou seja, foi selecionado um conjunto de indicadores, mediante critérios pré-estabelecidos e ao final deste processo foi criado um único índice de sustentabilidade energética.

Segundo Saltelli et. al. [42], existem argumentos favoráveis e contrários ao emprego de indicadores ou índices sintéticos:

- *Indicadores sintéticos podem emitir mensagens políticas na direção equivocada ou não robusta, se são pobremente construídos ou mal interpretados. Análises de sensibilidade podem ser usadas para testar a robustez de indicadores sintéticos.*
- *A ‘grande representação’ mostrada como resultado de um indicador sintético pode convidar políticos a tomar decisões simplistas. Indicadores sintéticos poderiam ser usados em*

combinação com os sub-indicadores para propiciar conclusões políticas mais sofisticadas.

- A construção de indicadores sintéticos envolve estágios nos quais julgamentos devem ser feitos: a seleção dos sub-indicadores, escolha do modelo, ponderações dos indicadores e tratamento de valores faltantes. Estes julgamentos devem ser transparentes e baseados em princípios estatísticos claros.

- Pode existir maior discordância entre 'Estados Membros'[referindo-se aos membros da União Européia] com relação a indicadores sintéticos do que a indicadores individuais. A escolha dos indicadores individuais e de seus pesos pode se tornar alvo de disputa política.

- Indicadores sintéticos fazem crescer a quantidade necessária de dados porque são requeridos dados para cada um dos sub-indicadores e para uma análise estatística significativa.

- Indicadores sintéticos podem ser usados para sumarizar questões complexas ou multidimensionais, com o intento de apoiar tomadores de decisão.

- Indicadores sintéticos fornecem uma grande representação. Podem ser mais fáceis de interpretar do que tentar encontrar uma tendência em muitos indicadores separados. Eles facilitam a tarefa de ordenar países segundo questões complexas.

- Indicadores sintéticos podem ajudar a atrair a atenção do público, fornecendo um número sumarizado com o qual se pode comparar o desempenho entre países e seus progressos do decorrer do tempo.

- Indicadores sintéticos podem ajudar a reduzir o tamanho de uma lista de indicadores ou incluir mais informação acerca de uma lista com um dado tamanho.

Assim, para mensurar o grau de sustentabilidade, é fundamental que os tomadores de decisão possam ter acesso a bons indicadores, sejam eles, um conjunto de indicadores ou um indicador sintético. Além de transmitir informações relevantes e

coerentes se uma determinada comunidade está no “caminho da sustentabilidade”, um bom indicador deve ser capaz de sinalizar para problemas que possam surgir, ou seja, devem antecipar e permitir alterar políticas no sentido de evitar problemas. Sendo que os dados devem ser acompanhados de análise quantitativa e interpretados à luz dos contextos socioeconômico e ambiental.

Um indicador é apenas uma medida, não um instrumento de previsão ou uma medida estatística definitiva, tampouco uma evidência de causalidade; ele apenas constata uma dada situação. As possíveis causas, conseqüências ou previsões que podem ser feitas são um exercício de abstração do observador, de acordo com o seu nível de conhecimento e seu entendimento do mundo que o cerca [38].

Desta forma, cada um dos indicadores apresentam vantagens e desvantagens, porém são um importante parâmetro na orientação à gestão e ao planejamento de políticas voltadas a um melhor amanhã. A TAB. 3 apresenta um resumo das principais vantagens e limitações da aplicação dos indicadores e índices de DS.

TABELA 3: Vantagens e limitações dos indicadores e índices de Desenvolvimento Sustentável [38]

Vantagens	Limitações
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Avaliação dos níveis de DS; ✓ Capacidade de sintetizar a informação de caráter técnico / científico; ✓ Facilidade de transmitir a informação; ✓ Bom instrumento de apoio à decisão a aos processos de gestão ambiental; ✓ Sublinhar a existência de tendências; ✓ Possibilitar comparar padrões e/ou metas pré-definidas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Inexistência de informações de base; ✓ Dificuldades na definição de expressões matemáticas que melhor traduzam os parâmetros selecionados; ✓ Perda de informação nos processos de agregação de dados; ✓ Diferentes critérios na definição dos limites de variação do índice em relação às imposições estabelecidas; ✓ Ausência de critérios robustos para a seleção de alguns indicadores; ✓ Dificuldades na aplicação em determinadas áreas como o ordenamento do território e paisagem.

Em função das características dos processos participativos de planejamento e desenvolvimento e da própria mutabilidade do conceito de desenvolvimento sustentável é coerente afirmar que um indicador deve segundo Benneti [22] e Meadows [13]:

1. Ser significativo em relação à sustentabilidade do sistema;
2. Ser relevante politicamente;
3. Revelar tradução fiel e sintética da preocupação;
4. Permitir repetir as mensurações no tempo;
5. Prever a interação no tempo e no espaço de diferentes elementos da população, considerando aspectos históricos e condições atuais de diferentes comunidades;
6. Permitir um enfoque integrado, relacionando indicadores, e permitindo analisar essas relações;
7. Ter mensurabilidade (tempo e custo necessário, e viabilidade de efetuar a medida);
8. Ser replicáveis e verificáveis;
9. Ter claros princípios de base, assim como clara visão dos objetivos a serem alcançados;
10. Ser de fácil interpretação pelo seu usuário;
11. Ter uma metodologia de medida bem determinada e transparente
12. Devem ser suplementares, ou seja, devem incluir elementos que as pessoas não possam medir por si próprias;
13. Devem ser condutores, ou seja, devem fornecer informações que conduzam à ação;
14. Devem ser hierárquicos, para que os usuários possam descer na pirâmide de informações se desejarem, mas ao mesmo tempo, transmitir a mensagem principal rapidamente;
15. Devem ser físicos, uma vez que a sustentabilidade está ligada em grande parte a problemas físicos, como água, poluentes, florestas, alimentos. É desejável, na medida do possível, que meça a sustentabilidade através de unidades físicas (toneladas de petróleo e não seu preço, expectativa de vida e não gastos com saúde);
16. Devem ser provocativos, levando à discussão, ao aprendizado e à mudança.

Dada a grande importância da utilização de indicadores na tomada de decisões em 1995 a CSD (*Comission on Sustainable Development*) organizou um workshop

com o título de *“Indicators for Sustainable Development for Decision Making”* [43] que procurou chegar a um consenso entre o tema desenvolvimento sustentável e indicadores. O relatório final do workshop afirma que:

“A utilidade dos indicadores de sustentabilidade, como mencionado na Agenda 21, foi confirmada pelo Workshop. Os usos potenciais destes sistemas incluem o alerta aos tomadores de decisão para as questões prioritárias, orientação na formulação de políticas, simplificação e melhora na comunicação e promoção do entendimento sobre tendências-chave fornecendo a visão necessária para as iniciativas de ação nacional.”

Assim, o grande desafio na construção de um indicador ou sistema de indicadores é que através do próprio processo de construção haja uma maior compreensão do que seja exatamente o conceito de desenvolvimento sustentável. Sendo que os processos de desenvolvimento e avaliação são paralelos e complementares. Desta forma, o trabalho com indicadores de sustentabilidade pode ajudar no entendimento das ligações entre os diferentes aspectos do desenvolvimento dentro dos vários níveis em que eles coexistem e apreciar a complexa interação entre as suas quatro dimensões [19]

4.2 Dimensões da Sustentabilidade

Em 1973, Maurice Strong [11] utilizou pela primeira vez o conceito de ecodesenvolvimento para caracterizar uma concepção alternativa de política de desenvolvimento. Os princípios básicos foram formulados por Ignacy Sachs tendo como pressuposto a existência de cinco dimensões do ecodesenvolvimento, a saber:

- a sustentabilidade social,
- a sustentabilidade econômica,
- a sustentabilidade ecológica,
- a sustentabilidade espacial e
- a sustentabilidade cultural, introduzindo um importante dimensionamento da sua complexidade.

Esses princípios articulam-se com as teorias de autodeterminação que estavam sendo defendidas pelos países em desenvolvimento desde a década de 60. Essas

cinco dimensões refletem a leitura que Sachs faz do desenvolvimento dentro de uma nova proposta, o ecodesenvolvimento, que propõe ações que explicitam a necessidade de tornar compatíveis a melhoria nos níveis de qualidade de vida e a preservação ambiental.

Em 1978, com a publicação do Relatório de Meadows, “*Os Limites do Crescimento*” [13], pode-se dizer que foi o marco da inclusão de questões ambientais, colocando em evidência a constatação de que a natureza, ou a agressão à natureza pode impor limites ao processo de crescimento ou desenvolvimento anteriormente estabelecido. Em outras palavras, os recursos naturais são finitos e não renováveis a partir de um certo limite.

A partir daí o termo “desenvolvimento” ganha um complemento de maneira definitiva incorporando o conceito de sustentabilidade. Sendo assim são incorporadas algumas dimensões na questão da sustentabilidade [3, 13, 19, 22, 28]:

- A sustentabilidade na dimensão ecológica que inclui a gestão integrada dos recursos naturais, preservação e reutilização;
- A sustentabilidade na dimensão econômica que inclui mecanismos para um novo sistema produtivo;
- A sustentabilidade na dimensão social, que inclui o atendimento às necessidades sociais como, saúde, educação, habitação e saneamento básico;
- A sustentabilidade na dimensão espacial que inclui a descentralização de atividades econômicas do centro urbano, atendendo às áreas rurais;
- A sustentabilidade na dimensão cultural que inclui o desenvolvimento de projetos para preservação da diversidade cultural, capacitando a sociedade no exercício de cidadania;
- A sustentabilidade na dimensão tecnológica, que inclui a promoção do desenvolvimento científico e tecnológico, promovendo cooperação técnica na formação de recursos humanos e;
- A sustentabilidade na dimensão política que inclui a participação efetiva da sociedade civil no planejamento e controle social de políticas públicas.

Todas estas dimensões que caracterizam o desenvolvimento sustentável, por sua vez podem ser reduzidas em apenas quatro dimensões (FIG. 12) que representam todo o conjunto maior anteriormente exposto.

FIGURA 12: Dimensões do Desenvolvimento Sustentável

Na presente dissertação focamos o trabalho em apenas três dimensões, a saber: a dimensão econômica, a dimensão social e a dimensão ambiental. Devido aos problemas inerentes à dimensão institucional, como, problemas de mensuração, falta de dados, definições mais específicas do conceito, a dimensão institucional torna-se em si um desafio a parte, porém será devidamente comentada em um capítulo a seguir.

4.2.1 Dimensão econômica

A Dimensão Econômica trata do desempenho macroeconômico e financeiro e dos impactos no consumo de recursos materiais e uso de energia primária. É uma dimensão que se ocupa com os objetivos de eficiência dos processos produtivos e com as alterações nas estruturas de consumo orientadas a uma reprodução econômica sustentável a longo prazo.

Não se pode abandonar abruptamente a estrutura econômica na qual a sociedade atual está baseada, em vários momentos da história isto foi tentado e as conseqüências sempre foram desastrosas. Assim, entender a estrutura na qual se está baseado o desenvolvimento econômico atual e propor mudanças gradativas em busca da sustentabilidade já em si é um objetivo ousado.

Assim, a dimensão econômica deve levar em conta que existem aspectos importantes a serem considerados, não apenas da manutenção do capital e as transações econômicas. Desta forma, a economia deve possibilitar uma alocação e uma gestão mais eficiente dos recursos e um fluxo regular de investimentos públicos e privados [16].

4.2.2 Dimensão social

A Dimensão Social dos indicadores do Desenvolvimento Sustentável corresponde especialmente aos objetivos ligados à satisfação das necessidades humanas, melhoria da qualidade de vida e justiça social.

Esta dimensão diz respeito a um processo de desenvolvimento baseado em uma visão do que seja uma “boa sociedade” [44]. A dimensão social procura analisar os temas relacionados entre a interação das pessoas e a sociedade que emerge desta interação, bem como os problemas inerentes desta relação, como, por exemplo, a desigualdade de renda, a pobreza e o ritmo de crescimento da sociedade.

Sachs propõe que se defina um processo de desenvolvimento que leve a um crescimento estável com igualdade de renda, promovendo assim das diferenças sociais e a melhoria na qualidade de vida de todos.

Pode-se dizer que o cerne da sustentabilidade social segundo Sachs [16] é a redução das desigualdades. Para tanto os principais componentes a serem analisados são a criação de postos de trabalho que permitam a obtenção de renda individual adequada e a produção de bens dirigida propriamente às necessidades básicas sociais.

4.2.3 Dimensão ambiental

A Dimensão Ambiental dos indicadores do Desenvolvimento Sustentável diz respeito ao uso dos recursos naturais e à degradação ambiental, e está relacionada aos objetivos de preservação e conservação do meio ambiente, considerados fundamentais ao benefício das gerações futuras.

Assim esta dimensão deve refletir na inclusão do capital natural (estoque de recursos naturais) no sistema capitalista. Desta forma, não só analisar o fluxo de bens e serviços dentro do sistema capitalista, mas também os benefícios advindos dos ativos ambientais. Sendo assim, a melhoria da qualidade do meio ambiente e da preservação

das fontes de recursos energéticos e naturais para as próximas gerações deve ser uma busca incessante por parte da sociedade.

Os principais componentes desta dimensão devem buscar [22]:

- produzir respeitando os ciclos ecológicos de renovação dos ecossistemas;
- ter prudência no uso dos recursos naturais;
- prioridade à produção de biomassa e a industrialização de insumos naturais renováveis;
- redução da intensidade energética e aumento da conservação de energia;
- tecnologias e processos produtivos de baixo índice de resíduos e;
- cuidados ambientais.

4.2.4 Dimensão Institucional

A Dimensão Institucional diz respeito à orientação política, capacidade e esforço despendido para as mudanças requeridas para uma efetiva implementação do Desenvolvimento Sustentável. Ressalta-se que nesta dimensão figuram-se os indicadores que sintetizam o investimento em ciência e novas tecnologias de processos e produtos e também a atuação do poder público na proteção do ambiente, componentes importantes para a busca das alternativas para o Desenvolvimento Sustentável.

Assim o conjunto de indicadores desta dimensão deve ser capaz de captar tanto a Estrutura Institucional quanto a Capacidade Institucional. O primeiro está relacionado à estratégias de implementação do desenvolvimento sustentável e da cooperação internacional, enquanto o segundo está relacionado com o acesso à informação, à infra-estrutura de comunicação, a ciência e tecnologia e a preparação e reposta para desastres naturais.

4.3 Os princípios de Bellágio na construção de indicadores de DS

Segundo a Agência Portuguesa para o Meio Ambiente [38]:

“... o processo de escolha dos indicadores deve seguir um conjunto de critérios objetivos, exeqüíveis e verificáveis que justifiquem a sua escolha. Os indicadores escolhidos devem refletir o significado dos dados na forma original, satisfazendo, por um lado, a

conveniência da escolha e, por outro, a precisão e relevância dos resultados.”

Na busca pelos indicadores de sustentabilidade alguns princípios devem ser atendidos. Em 1996, o Instituto Internacional para o Desenvolvimento Sustentável (*International Institute for Sustainable Development – IISD*) [12] reuniu especialistas em Bellágio (Itália), com o objetivo de estabelecer princípios destinados a orientar a avaliação do progresso rumo ao desenvolvimento sustentável. Estes princípios são orientações que avaliam todo o processo no desenvolvimento de um indicador de desenvolvimento sustentável, bem como sua interpretação e comunicação dos resultados. Os princípios de Bellágio [45] declaram que tais avaliações devem satisfazer os seguintes critérios de forma conjunta:

1. Orientar visão e metas: as avaliações devem ser orientadas por uma visão clara do desenvolvimento sustentável e por metas que definam esta visão;
2. Perspectiva holística: devem incluir uma revisão de todo o sistema bem como de suas partes, e devem considerar o bem estar de subsistemas e as conseqüências positivas da atividade humana em termos monetários e não monetários;
3. Elementos essenciais: devem considerar igualdade e desigualdade na população atual e entre gerações presentes e futuras, lidando com a utilização de recursos, super-consumo e pobreza, direitos humanos e acessos a serviços; considerar as condições ecológicas das quais a vida depende e considerar o desenvolvimento econômico e outros aspectos que não são oferecidos pelo mercado e contribuem para o bem estar social e humano;
4. Amplitude adequada: devem adotar um horizonte cronológico suficientemente amplo, a fim de abranger escalas de tempo humana e ambiental, atendendo às necessidades das gerações futuras, bem como a geração presente em termos de processo de tomada de decisão em curto prazo. Definir o espaço de estudo para abranger não apenas impactos locais, mas, também, impactos de longa distância sobre pessoas e ecossistemas. Construir um histórico das condições presentes e passadas para antecipar futuras condições.

5. Foco prático: devem basear num conjunto explícito de categorias que liguem perspectivas e metas a indicadores; devem ter um número limitado de questões-chave para análise; um número limitado de indicadores ou combinação de indicadores para fornecer um sinal claro do progresso. Na padronização das medidas quando possível para permitir comparações. Na comparação dos valores dos indicadores com as metas, valores de referência, padrão mínimo e tendências.
6. Transparência: devem ter métodos transparentes e dados acessíveis; devem tornar explícitos todos os julgamentos, hipóteses e incertezas nos dados e na interpretação;
7. Comunicação eficiente: devem ser concebidas para satisfazer as necessidades dos usuários e buscar a simplicidade na estrutura e na linguagem;
8. Participação ampla: devem obter ampla representação de importantes grupos profissionais, técnicos e sociais, assegurando ao mesmo tempo a participação dos responsáveis pelo processo decisório;
9. Avaliação permanente: devem desenvolver a capacidade de mensurar, para determinar tendências, ficar atento a mudanças e incertezas e ajustar metas e estruturas, à medida que se ganhem novos insights; e promover o desenvolvimento do aprendizado coletivo e o *feedback* necessário para a tomada de decisão.
10. Capacidade institucional: a continuidade da avaliação do progresso deve ser assegurada, designando-se claramente responsabilidade e apoio no processo decisório, fornecendo capacidade institucional para a coleta de dados e incentivando o desenvolvimento da capacidade local de avaliação.

A busca de um ou vários indicadores que avaliem a sustentabilidade e que satisfaçam os princípios de Bellágio ainda é árdua e os problemas teóricos envolvidos são grandes. Estes dez princípios são referência na construção de indicadores sendo que o princípio 1 refere-se ao ponto inicial de qualquer tentativa de avaliação: deve-se estabelecer uma visão do que seja sustentabilidade e estabelecer as metas que revelem uma definição prática desta visão em termos do que seja relevante para a tomada de decisão [11].

Os princípios 2 até 5 tratam do conteúdo de qualquer avaliação e da necessidade de fundir o sistema por inteiro (global) com o foco prático nas principais questões ou questões prioritárias.

Os princípios 6 até 8 lidam com a questão-chave do processo de avaliação, enquanto os princípios 9 e 10 se referem à necessidade de estabelecer uma capacidade contínua de avaliação.

De maneira geral os indicadores e índices são elaborados para cumprirem as funções de simplificação, quantificação, análise e comunicação, o que permite entender fenômenos complexos e torná-los quantificáveis e compreensíveis, de modo que possam ser analisados em um dado contexto e, ainda, comunicar-se com os diferentes níveis da sociedade.

Concluindo, para transformar o conceito de desenvolvimento sustentável em prática devem-se compreender melhor os processos humanos e naturais que estão relacionados aos problemas ambientais, econômicos e sociais.

4.4 Base de Indicadores Energéticos na Mensuração do Desenvolvimento Sustentável

Embora ferramentas de agregação de base de dados constituam um grande desafio, este não é o único na busca do desenvolvimento de indicadores. Um problema adjacente a este é a própria base de dados, principalmente no que diz respeito ao escopo do trabalho proposto, ou seja, na avaliação da sustentabilidade do ponto de vista energético.

Dos indicadores adotados pelo IBGE, apenas uma parte da base de dados é estatisticamente consistente em questões energéticas, dificultando assim o estabelecimento de uma análise mais profunda, enaltecendo, portanto, a importância da questão energética do ponto de vista da sustentabilidade.

Em 1999, a Agência Internacional de Energia Atômica (AIEA) iniciou um trabalho pioneiro de cooperação com diversas organizações internacionais, incluindo a AIE, a Eurostat e a UNDESA, no sentido de desenvolver um conjunto único de indicadores, que eliminasse as duplicações e pudesse ser utilizado como ferramenta de análise em qualquer país. Tal conjunto de indicadores, denominados ISED (*Indicators for Sustainable Energy Development*), englobaria as dimensões econômica, social e ambiental do uso da

energia e teria como objetivo fundamental o estabelecimento de uma ferramenta analítica que possibilitasse a avaliação, o monitoramento e a comparação do nível de sustentabilidade energética dos países. Nesse sentido, foi empreendido um abrangente programa internacional, envolvendo especialistas de diversas organizações, países membros e não-membros, cujo resultado foi o desenvolvimento de um conjunto de 41 indicadores energéticos para o desenvolvimento sustentável.

Estes indicadores adotaram uma abordagem do tipo causa, estado e resposta proposto pelas Nações Unidas, assim como integrou definitivamente as dimensões econômica, social e ambiental do uso da energia.

Assim, o conjunto de indicadores energéticos ISED (*Indicators for Sustainable Energy Development*) [9] é o resultado de um esforço no sentido de estabelecer uma metodologia padronizada para coleta, processamento e análise de informações relacionadas ao uso da energia. Segundo Cima [34], a utilização de indicadores energéticos se fundamenta nas seguintes premissas:

1. É uma metodologia aceita internacionalmente e de forma unificada, permitindo estabelecer comparações entre países [9] sendo que esta identificação deve estear-se num sistema de informações padrão (SCHAEFFER et al. 2005) [10];
2. A base de indicadores permite que se convirja para metodologias padronizadas internacionalmente, em termos de classificação de atividades econômicas, fontes energéticas e procedimentos de contabilização energética;
3. Possibilidade de inserção das especificidades do sistema energético nacional sem que se comprometa a estrutura de indicadores energéticos, ou seja, considerando as peculiaridades regionais.

Trabalhos recentes com indicadores energéticos e ferramentas de agregação estão permitindo uma evolução rápida no desenvolvimento de técnicas mais apuradas e consistentes [46]. Uma das vantagens de se utilizarem indicadores energéticos é justamente o fato de já existir uma vasta base de dados consolidada em vários países permitindo comparações. No Brasil a base de dados energética é feita pelo Ministério das Minas e Energia (MME) junto com a Empresa de Pesquisas Energéticas (EPE).

Estes indicadores energéticos não podem ser entendidos apenas como um conjunto de dados. Eles se estendem além da estatística básica, pois muitos deles estão relacionados entre si e não apenas em uma relação meramente linear. Entender estas

inter-relações e suas causas e conseqüências extrapolam além da estatística básica. Cada um dos indicadores energéticos apresenta aspectos e conseqüências na produção, no uso da energia e das relações de desenvolvimento de uma sociedade. Um estudo recente apresentou o Programa de Planejamento Energético Brasileiro, utilizando os indicadores ISED propostos pelo IAEA como indicadores da política energética do Brasil e como indicadores de “Forças Guias” (*Driving Force*) e de estados (*State Indicator*). [10]

Desta forma, estes indicadores dependem das condições edafo-climáticas de cada país, da sua matriz energética e suas prioridades, bem como seus critérios e objetivos, rumo à sustentabilidade. Tendo, portanto, características peculiares regionais.

4.4.1 Guideline da Agência Internacional de Energia Atômica (IAEA)

O guia de indicadores energéticos para o desenvolvimento sustentável foi mais uma resposta a busca por novas métricas. Com uma estrutura semelhante à proposta pelo Comissão para o Desenvolvimento Sustentável (CSD – *Commission on Sustainable Development*), os indicadores que são no total de 30, estão classificados em três dimensões (social, econômica e ambiental). Sendo que cada dimensão está dividida em temas (neste caso 7) e 19 subtemas. Alguns indicadores estão classificados em mais de uma dimensão, tema ou subtema, apresentando inúmeras interconexões entre si. A TAB. 4 apresenta um resumo destes indicadores.

TABELA 4: Indicadores energéticos para o Desenvolvimento Sustentável [9]

Dimensão Econômica				
Padrões de Produção e Consumo	Uso geral	ECO 1	Consumo de energia per capita	Uso da energia (suprimento total de energia primária, consumo final total e uso de eletricidade). Total da população.
	Produtividade global	ECO 2	Intensidade energética (por unidade de PIB)	Uso da energia (suprimento total de energia primária, consumo final total e uso de eletricidade). PIB
	Fontes eficientes	ECO 3	Eficiência energética na conversão e distribuição	Perdas na geração, transmissão e distribuição de eletricidade
	Produção	ECO 4	Total de reservas em relação ao total produzido	Reservas provadas que existem - recuperadas. Produção total de energia.
		ECO 5	Total de recursos em relação ao total produzido	Recursos energéticos totais estimados. Produção total de energia.
	Uso final	ECO 6	Intensidade energética industrial	O consumo de energia no setor industrial e pelo ramo de fabricação. Valor adicionado correspondente.
		ECO 7	Intensidade energética na agricultura	Consumo de energia no setor agrícola. Valor adicionado correspondente.
		ECO 8	Intensidade energética no comércio e serviços	Consumo de energia no setor de serviços / comercial. Valor adicionado correspondente.
		ECO 9	Intensidade energética nas famílias	O consumo de energia nos domicílios pela utilização final. Números de habitantes por domicílio, área total e quantidade de aparelhos eletro-eletrônicos.
		ECO 10	Intensidade energética no setor de transportes	O consumo de energia no transporte de passageiros e de mercadorias por tipo e setor. Número de passageiros por Km rodado e toneladas por Km rodado.

Dimensão Econômica				
Padrões de Produção e Consumo	Diversificação da matriz energética	ECO 11	Participação dos combustíveis no total de energia e eletricidade	Fornecimento de energia primária no consumo final, geração de eletricidade e capacidade de geração por tipo de combustível. Produção total de energia primária, consumo final total, total da geração de eletricidade e capacidade de geração total.
		ECO 12	Percentual de geração de energia elétrica proveniente de fontes não emissoras de carbono	Produção primária, geração de eletricidade e capacidade de geração de fontes não carbônicas. Produção total de energia primária, total de geração de eletricidade e capacidade total de geração.
		ECO 13	Geração de energia elétrica de fontes renováveis	Produção de energia primária, geração e consumo final de eletricidade e capacidade de geração de fontes renováveis. Produção total de energia primária, consumo final total, geração total de eletricidade e capacidade total de geração.
	Preços	ECO 14	Preço final da energia por setor e tipo de combustível	Preço da energia (incluindo impostos e subsídios)
Segurança	Importação	ECO 15	Dependência líquida externa de energia	Importação de energia. Produção total de energia primária.
	Estoques estratégicos de combustível	ECO 16	Total de estoques por tipo de combustível e consumo	Estoques de combustíveis críticos (ex. óleo, gás, etc.). Padrões de consumo de combustíveis críticos.

Dimensão Ambiental				
Tema	Sub tema	Indicador Energético		Componentes do indicador
Atmosfera	Mudanças climáticas	ENV 1	Emissões de gases do efeito estufa (GEE) na produção e no uso de energia por unidade de PIB.	Emissão de GEE na produção e uso da energia. População e PIB.
	Qualidade do ar	ENV 2	Concentração de poluentes no ambiente e em áreas urbanas.	Concentração de poluentes no ar.
		ENV 3	Poluição do ar através da geração de energia.	Emissão de poluentes no ar.
Água	Qualidade da água	ENV 4	Descarte de contaminantes em afluentes devido a sistemas energéticos, incluindo descarte de óleo.	Descarga de contaminantes em efluentes líquidos.
Terra	Qualidade do solo	ENV 5	Áreas do solo com elevada acidez (acima do ponto crítico).	Área de solo afetada. Carga crítica.
	Florestas	ENV 6	Taxa de deflorestamento atribuída a geração de energia.	Área florestal em dois períodos diferentes. Utilização da biomassa.
	Geração de resíduos sólidos e seu gerenciamento	ENV 7	Taxa de geração de resíduos sólidos por unidade de energia produzida.	Quantidade de resíduos sólidos. Energia produzida.
		ENV 8	Total de resíduos sólidos armazenados adequadamente no total gerado.	Quantidade de resíduos sólidos devidamente eliminados. Total de resíduos sólidos eliminados.
		ENV 9	Total de resíduos sólidos radioativos gerados por unidade de energia produzida.	Quantidade de resíduos radioativos (acumulado por um determinado período de tempo). Energia produzida.
		ENV 10	Total de resíduos sólidos radioativos aguardando o armazenamento adequado no total gerado.	Quantidade de resíduos radioativos aguardando o descarte. Total de resíduos gerados.

Dimensão Social				
Tema	Sub tema	Indicador Energético		Componentes do indicador
Patrimônio / Riqueza	Acessibilidade	SOC 1	% de famílias (ou população) com acesso a eletricidade ou dependentes de energias não comerciais	Famílias (ou população) sem eletricidade ou dependente de fontes não comerciais. Número total de famílias ou população
	Acessibilidade financeira	SOC 2	% da renda familiar gasta com combustíveis ou eletricidade	% da renda familiar gasta com combustíveis ou eletricidade. Renda familiar dos 20% mais pobres.
	Disparidades	SOC 3	uso de energia nas famílias por grupo e tipo de combustível	Consumo de energia por agregado familiar para cada grupo de renda. Mix de combustíveis para cada grupo de renda.
	Segurança	SOC 4	Acidentes fatais na cadeia de produção de combustíveis	Fatalidades anuais na cadeia de produção. Energia anual produzida

4.5 Ferramentas de Avaliação de Indicadores de Sustentabilidade

Existem várias ferramentas de análise e avaliação de indicadores de desenvolvimento sustentável. Estudos recentes indicam as principais ferramentas existentes destacando os fatores positivos e negativos de cada uma delas. Segundo Bellen [20], que realizou uma pesquisa qualitativa e quantitativa com os principais pesquisadores na área do desenvolvimento sustentável avaliando os pontos fortes e fracos das principais ferramentas concluiu com a indicação das três ferramentas principais: *Ecological Footprint Method* - EFM; *Dashboard of Sustainability* - DS; *Barometer of Sustainability* - BS. A TAB. 5 resume as principais características destas ferramentas.

TABELA 5: Comparação entre as três principais ferramentas de avaliação da sustentabilidade [19].

	Ecological Foot print	Barometer of Sustainability	Dashboard
Definição	Procura estabelecer a área necessária para manter uma determinada população ou sistema econômico indefinidamente, fornecendo: energia e recursos naturais, absorvendo os resíduos.	Avalia o progresso em direção à sustentabilidade pela integração de indicadores, apresentando seus resultados por meio de índices.	Faz alusão à um painel de instrumentos que informam aos tomadores de decisão ou “público em geral”, o “nível” do desenvolvimento sustentável
Escopo (Dimensão)	Ambiental	Social / Ambiental	Social / Econômica/ Ambiental /Institucional
Atuação	Da global à individual	Da global ao local	Do continental ao local
Complexidade da Interface	Complexo: sustentabilidade relacionada aos fluxos de matéria e energia de um sistema (produtividade e energia). Grande número de sistemas informatizados.	Mediana: trabalha com índices e indicadores. Os cálculos estão associados à: média aritmética; média ponderada; interpolação linear.	Mediana: trabalha com índices e indicadores. Os cálculos estão associados à: média aritmética; média ponderada; interpolação linear. Utiliza-se de programa específico.
Abertura dos Dados	Baixo grau de abertura. Opera seus índices ou indicadores intermediários, dificultando a visualização dos elementos da avaliação.	Médio, os dados analisados estão abertos até o nível dos indicadores. Não apresenta a estrutura de ponderação.	Apresenta um grau de abertura maior. Não utiliza subindicadores. Os pesos de cada um dos indicadores não podem ser observados na interface geral da ferramenta.
Apresentação das Informações	Resultado final fornecido e a comparação da área apropriada com a capacidade biofísica do sistema avaliado.	Apresentam os resultados em um gráfico bem como através de uma figura, semelhante à um ovo. Esta área é construída a partir dos extremos das subdimensões dos dois eixos principais.	Utiliza um painel de instrumentos graduados em sete cores.

Fonte: Adaptação de Rabelo et al (2007) e Bellen. (2002) [20].

O *Ecological Footprint* ou Pegada Ecológica é uma ferramenta que busca avaliar de forma quantitativa principalmente do ponto de vista ecológico o quanto de terra biologicamente produtiva é necessária para sustentar uma determinada sociedade, país ou mesmo um indivíduo, fornecendo os insumos necessários para satisfazer o seu consumo e ao mesmo tempo assimilando os resíduos. É um índice de fácil entendimento, pois relaciona as questões da sustentabilidade, do desenvolvimento e da equidade e permite uma análise de impacto. Segundo esta ferramenta, com base nos dados *World*

Wildlife Fund (WWF) [19] a sociedade humana acumula um déficit acima de 20% além da biocapacidade produtiva do planeta.

Esta metodologia utiliza o menor número de enfoques dentre as ferramentas, porém é a que apresenta o maior campo de aplicação na área ambiental. Utiliza apenas uma dimensão – a Ambiental – que representa apenas uma visão da sustentabilidade, porém, reforça a sua importância. A ferramenta trabalha com dados quantitativos altamente agregados e, portanto, não utiliza índices intermediários. Sua abordagem é top-down, no sentido de que os especialistas é que são capazes de realizar os cálculos referentes à capacidade biofísica e ao padrão de consumo de um sistema.

O *Barometer of Sustainability* ou Barômetro da Sustentabilidade tem como objetivo primário mensurar a sustentabilidade por meio de índices. A escolha dos indicadores é feita de modo hierarquizado, que começa com a definição do sistema e da meta, chegando aos seus critérios de desempenho. Esta ferramenta se utiliza de indicadores biofísicos e sociais contemplando apenas duas dimensões, a dimensão ambiental e a social.

O *Dashboard of Sustainability* trabalha com uma visão sistêmica, ou seja, permite observar visualmente os valores das dimensões primárias da sustentabilidade de forma qualitativa e quantitativa. A ferramenta se apresenta na forma de um painel de instrumentos, permitindo avaliar de maneira metafórica a sustentabilidade. Esta ferramenta trabalha com as quatro dimensões sugeridas pela Comissão de Desenvolvimento Sustentável das Nações Unidas [12], permitindo ter uma visão mais ampla no contexto da sustentabilidade.

As três ferramentas apresentadas são as que têm maior credibilidade na comunidade mundial, porém, estão sujeitas a problemas técnicos e teóricos, devido à complexidade das interações entre as dimensões, do conceito de sustentabilidade e a dificuldade da mensuração do grau de incertezas.

É consenso que as ferramentas de avaliação de sustentabilidade devem satisfazer alguns fatores preponderantes:

- Possibilidade de intercambiação;
- Facilidade e rapidez de determinação e interpretação;
- Grau de importância e validação científica;
- Sensibilidade do público alvo;

- Baixo custo de implementação;
- Possibilidade de rápida atualização.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

5.1 Base de Dados

Todo trabalho que envolva modelagem matemática e estimação, a base de dados é parte fundamental. É importante observar que, o tratamento dos dados para rodar o modelo também é de fundamental importância.

A base de dados referente à escolha dos indicadores para a mensuração da sustentabilidade energética analisada neste trabalho é de certa forma consolidada e de reconhecimento internacional, o que permite uma comparação entre diferentes países e regiões. Além disto, é uma base de dados flexível, que permite a incorporação de novos indicadores caso seja necessário.

Regra geral os indicadores energéticos não são homogêneos, podendo ter como resultado a agregação de várias estruturas. Esta combinação de valores pode ocorrer através de diferentes critérios de agregação e calculados utilizando diferentes técnicas estatísticas. Neste trabalho, utilizou-se uma combinação de indicadores agrupados em três dimensões de acordo com a TAB. 6 abaixo:

TABELA 6: Indicadores de Sustentabilidade Seleccionados

Dimensão Social (DS)	
IDS 1	Desigualdade de Renda
IDS 2	Fração da renda disponível gasta com consumo de energia
IDS 3	Percentual de domicílios sem acesso a fontes de energia modernas
Dimensão Ambiental (DA)	
IDA 1	Oferta Interna de Energia (Renovável) tep
IDA 2	Oferta Interna de Energia (Não Renovável) tep
IDA 3	Emissões de GHG (Gases do Efeito Estufa) (Mt/ CO2 eq)
Dimensão Econômica	
IDE 1	PIB <i>per capita</i> (preços 2008) - US\$ de 2008(mil) - IPEA
IDE 2	Intensidade Energética Total (tep/10 ³ US\$) - OIE/PIB
IDE 3	Taxa de Investimento (% PIB) - (a preços correntes)
IDE 4	Consumo Final Residencial de Energia (tep)
IDE 5	Consumo Final de Energia Indústria + Agropecuário (tep)
IDE 6	Consumo Final de Energia Comércio + Transportes (tep)

Outro fator importante é que via de regra não existe um critério de escolha dos indicadores definido mundialmente, mas sim, recomendações. No presente trabalho

foi selecionado um número de indicadores capazes de modelar relações de causa e efeito de maneira inicial na avaliação do problema, estando em aberto a incorporação de outros indicadores.

Um levantamento bibliográfico prévio permitiu observar que alguns indicadores energéticos, são denominadores comuns na aplicação de diversas ferramentas de análise. Foram escolhidos os indicadores de acordo com a literatura, dentro do *Guideline* do ISSD [9], e compreenderam o período de 1996 a 2007. Os dados originais se encontram no ANEXO I.

Dessa forma, o esforço foi de selecionar indicadores-chave que refletissem a sustentabilidade energética e que pudessem ser passíveis de generalizações. Os dados primários foram obtidos do Balanço Energético Nacional (BEN) [47], compreendendo um espaço temporal de 1970 a 2007. É importante observar que o Balanço Energético Nacional – BEN é o documento tradicional do setor energético brasileiro que divulga, anualmente, extensa pesquisa e a contabilidade relativas à oferta e consumo de energia no Brasil, contemplando as atividades de exploração e produção de recursos energéticos primários, sua conversão em formas secundárias, a importação e exportação, a distribuição e o uso final da energia. Segundo o próprio site do BEN:

“Uma das mais completas e sistematizadas bases continuadas de dados e estatísticas energéticas disponível no país, o BEN constitui-se em uma referência fundamental para qualquer estudo do planejamento do setor energético brasileiro.”

O BEN foi criado em 1976 com o objetivo de expor estatísticas de energia do Brasil, já que até aquele momento o país não possuía dados gerais sobre energia, apenas estatísticas setoriais, sendo que parte da elaboração do balanço foi motivada pela crise do petróleo em 1974. Inicialmente o BEN foi elaborado de maneira simples, sem que houvesse metodologia previamente definida. Esse modelo perdurou até 1980, quando o país adotou a metodologia internacional para composição e distribuição de informações para esse tipo de balanço. Hoje, o BEN apresenta o consumo final de energia em cada setor econômico por fonte, além dos processos de produção. Este relatório é publicado regularmente há mais de 30 anos pelo Ministério de Minas e Energia – MME, e desde

2005 a execução operacional das atividades relacionadas à sua elaboração são de responsabilidade integral da Empresa de Pesquisa Energética – EPE.

A Empresa de Pesquisa Energética - EPE tem por finalidade prestar serviços na área de estudos e pesquisas destinadas a subsidiar o planejamento do setor energético, tais como energia elétrica, petróleo e gás natural e seus derivados, carvão mineral, fontes energéticas renováveis e eficiência energética, dentre outras." (art 2º da Lei 10.847 de 15 de março de 2004)

Cabe ainda destacar que o BEN, não é composto apenas de dados primários, mas sim de estatísticas energéticas originárias de operações de serviço público concedido. Porém, uma parcela não desprezível destas informações se refere a energéticos não comerciais, que não possuem instrumentos formais de contabilização, ou são produzidas diretamente pelo consumidor (auto-produtores), não aparecendo assim em registros oficiais, e exigindo que seja durante a execução do BEN a geração destes dados primários.

5.2 Descrição da base de dados segundo as dimensões

5.2.1 Dimensão Social

A dimensão social deve através de seus indicadores, apresentarem um quadro de como ocorrem às desigualdades entre regiões com relação ao rendimento da população. Desta forma o acesso a serviços energéticos está relacionado com o desenvolvimento de uma sociedade, pois na medida em que uma sociedade se desenvolve, gerando mais emprego, renda e escolaridade, a demanda por produtos intensivos em energia aumenta.

Sendo assim, a conexão energia – desenvolvimento merece ser analisada de uma forma mais aprofundada. Segundo Goldemberg [38] o desenvolvimento tem sido usualmente considerado como a capacidade de uma determinada economia sustentar um grande aumento (crescimento) do seu PNB (Produto Nacional Bruto). No entanto, o mero e simples uso do crescimento do PNB como indicador de qualidade de vida de uma população encobre uma série de problemas, tais como distribuição de renda, acesso aos bens de consumo, desequilíbrios econômicos e sociais regionais, etc.

Assim o uso de indicadores relacionados à dimensão social constitui-se numa medida do bem estar de uma população, pois as diferentes classes sociais de uma determinada sociedade detêm modos de consumo e formas de acesso a bens e serviços distintos; pois, por exemplo, no caso da energia, os pobres não apenas consomem menos energia do que os ricos; mas também tipos diferentes da mesma (notadamente aquela oriunda de biomassa – lenha, carvão etc.), conseqüentemente o impacto ambiental da energia consumido por diferentes grupos de uma sociedade é obviamente diferente.

A Dimensão Social (DS) foi representada através de três indicadores:

IDS 1 - Desigualdade de renda, medido através do Índice de Gini que é um indicador que varia entre 0 e 1, onde 0 corresponde à completa igualdade de renda (onde todos têm a mesma renda) e 1 corresponde à completa desigualdade (onde uma pessoa tem toda a renda, e as demais nada têm).

Como foi dito anteriormente, a dimensão social do uso da energia no Brasil é fortemente marcada pelas desigualdades sociais e regionais com relação ao aumento da população. O uso do índice de Gini permite captar a evolução desta desigualdade. A FIG. 13 apresenta a evolução do índice de Gini no período compreendido entre 1971 e 2007.

FIGURA 13: Evolução do Índice de Gini

Com o controle da inflação e a melhora nas condições de distribuição de renda do Brasil, a partir principalmente do Plano Real, a demanda por produtos eletro-

eletrônicos pelas camadas mais baixas da sociedade aumentaram e, portanto houve um incremento na demanda por energia. Segundo Cohen [apud 34]:

“O consumo direto de energia para a média dos domicílios aumenta continuamente da menor para a maior classe de renda. Nesta última, este consumo representa cerca de 38% do consumo de energia total, embora participe apenas em pouco mais de 10% das despesas totais. Quanto à classe de menor renda, o consumo direto de energia representa um pouco menos de 10% das despesas totais e 30% do consumo total de energia. Este resultado nos remete às análises acerca de configuração espacial e estilos de vida já empreendidas anteriormente. Com efeito, as classes de maior renda das cidades brasileiras analisadas são também aquelas cujo acesso e uso de transporte individual são maiores. Por outra, as classes de menor renda tendem a utilizar mais o transporte coletivo, por uma questão de falta de escolha, em geral.”

Desta forma, o que se percebe é que, em linhas gerais, nas metrópoles brasileiras, o uso do automóvel é associado ao conforto e a infra-estrutura espacial cada vez mais se direciona para este meio de transporte, já que é ele o mais procurado pelas classes formadoras de opinião, acentuando cada vez mais a demanda por energia no caso Brasileiro.

IDS 2 – o segundo indicador da dimensão social é a fração da renda disponível gasta com consumo de energia. É outro indicador que procura medir o grau de desenvolvimento de uma sociedade. Existe uma alta correlação entre o grau de desenvolvimento de uma sociedade e seu consumo de energia, neste caso este indicador procura captar se o custo desta energia é baixo ou alto. Neste caso foi utilizada a Pesquisa de Orçamento Familiar (POF)¹ [48] que é utilizada na geração de uma estrutura de ponderação (pesos) no cálculo do IPCA. Esta estrutura de pesos foi calculada com base em uma cesta de bens atual, para o período de 1970 a 2007.

¹ A Pesquisa de Orçamentos Familiares do IBGE analisa a composição dos gastos e do consumo das famílias segundo as classes de rendimento, entre julho de 2002 e julho de 2003 e permite verificar, na comparação com as pesquisas anteriores, algumas mudanças expressivas nas despesas e nos hábitos dos brasileiros.

A construção deste indicador permitiu com base em uma cesta de bens e serviços atuais estimar qual a participação no consumo de energia médio, levando em consideração famílias que iam da faixa de renda de 1 a 40 salários mínimos por mês. Entenda que o consumo de energia médio, compreende neste caso, todas as formas de energia utilizadas por uma família, a saber: combustível, gás encanado, gás de botijão e outras formas de energia.

A FIG. 14 apresenta a evolução do indicador desde 1970 até 2006. Observa-se que durante um bom período de tempo o gasto com consumo de energia se manteve estável, mas a partir de 1994 sua participação na renda média aumentou. Isto se deve principalmente a dois fatores, primeiramente o aumento dos impostos elevando o custo da energia e segundo com a melhora advinda com a queda da inflação a demanda por produtos eletro-eletrônicos aumentou rapidamente devido a uma demanda reprimida de consumo e as incertezas associadas à duração deste período de baixa inflação, levando as classes mais baixas principalmente a comprarem produtos rapidamente. Com a manutenção da inflação em patamares baixos e o aumento do nível médio de renda da população observa-se que há uma queda natural na participação do consumo de energia no total da renda.

FIGURA 14: fração da renda gasta com consumo de energia

Portanto o IDS 2 é um bom indicador para captar o grau de desenvolvimento e igualdade social levando em consideração sua participação no total da renda familiar.

IDS 3 - o terceiro indicador refere-se ao percentual de domicílios sem acesso a fontes de energia modernas. Entende-se que o acesso a fontes de energia modernas permite mensurar características também de ordem social.

TABELA 7: consumo residencial de energia por região (%) [47]

	NORTE	NORDESTE	SUDESTE	SUL	CENTRO-OESTE
1994	3,8	13,8	59,6	15,9	6,8
1995	4,1	14,1	59,1	15,7	0,1
1996	4,2	14,1	58,9	15,8	0,1
1997	4,3	14,2	58,7	15,6	0,2
1998	4,4	14,7	58,5	15,3	0,2
1999	4,4	14,7	58,1	15,6	7,2
2000	4,7	14,9	57,6	15,6	7,2
2001	5,1	14,8	55,7	17,3	7,2
2002	5,3	15	54,9	17,5	7,4
2003	5,2	15,6	54,8	17	7,4
2004	5,2	15,8	54,7	16,8	7,5
2005	3,9	16,3	54,7	16,7	7,4
2006	5,1	16,3	54,6	16,4	7,6
2007	5,2	16,3	54,5	16,5	7,5

Não obstante, para os domicílios com acesso à energia elétrica, as disparidades regionais no consumo de energia elétrica também são grandes, como se observa na tabela acima. A região Sudeste é a região maior demandante de energia, mas também a mais desenvolvida, em contraposição com a região Norte e Nordeste que são as menos desenvolvidas. Se considerarmos o consumo per capita de energia, em 2007, o consumo de energia médio por consumidor da região sudeste era 1,72 vezes superior ao consumo médio por consumidor da região nordeste. Também cabe observar que após a queda de 2001 (apagão), o consumo médio por consumidor residencial no Brasil vem mantendo-se em torno dos 140 kWh/mês. Contribuindo para a continuidade desse índice, citam-se os programas governamentais de universalização do atendimento, a utilização de eletrodomésticos mais eficientes e hábitos de conservação adquiridos pela população em decorrência do racionamento de energia ocorrido em 2001 e da desaceleração do crescimento econômico.

5.2.2 Dimensão Ambiental

Esta dimensão procura captar a emissão de poluentes atmosféricos e gases do efeito estufa para o cálculo de emissões atmosféricas provenientes do sistema energético. Esta metodologia é baseada em um inventário de emissões de gases do efeito estufa e pode ser entendida em maiores detalhes no site no Ministério de Ciência e Tecnologia e /ou em Schaeffer [10] (MCT).

Sabe-se que no Brasil grande parte das emissões de gases do efeito estufa advém de queimadas, seguido dos setores industriais e de transportes. No setor industrial as emissões vêm principalmente do setor siderúrgico. Na geração de energia, o Brasil ocupa uma posição privilegiada, pois boa parte de sua geração vem de fontes renováveis, em especial hidrelétricas.

A Dimensão Ambiental (DA) foi representada por três indicadores, a saber:

- **IDA 1** - Oferta interna de energia renovável: parte do total de energia produzido e destinado para consumo final que provém de fontes de energia renováveis principalmente hidrelétricas. O desenvolvimento sustentável e os impactos ambientais para a geração de energia devem ser estabelecidos com alta prioridade nos planejamentos energéticos.

Desta forma, avaliar a matriz energética do ponto de vista de energia renováveis é fator fundamental no caminho para a sustentabilidade.

Juntamente com a tendência de reduzir a dependência externa de energia, a ocorrência de grandes extensões territoriais e da abundância de corpos d'água com alto potencial hidrelétrico foram sem dúvida os fatores determinantes para o desenvolvimento do enorme parque hidrelétrico brasileiro. Segundo dados da ANEEL (2008) [49], atualmente a geração de eletricidade no Brasil se distribui conforme apresentado na FIG. 15 a seguir.

Empreendimentos em Operação							
Tipo		Capacidade Instalada		%	Total		%
		N.º de Usinas	(kW)		N.º de Usinas	(kW)	
Hidro		706	77.525.722	70,23	706	77.525.722	70,23
Gás	Natural	85	10.588.402	9,59	114	11.769.430	10,66
	Processo	29	1.181.028	1,07			
Petróleo	Óleo Diesel	595	3.283.796	2,97	617	4.657.290	4,22
	Óleo Residual	22	1.373.494	1,24			
Biomassa	Bagaço de Cana	252	3.376.063	3,06	300	4.531.265	4,11
	Licor Negro	13	859.217	0,78			
	Madeira	28	233.187	0,21			
	Biogás	3	41.590	0,04			
	Casca de Arroz	4	21.208	0,02			
Nuclear		2	2.007.000	1,82	2	2.007.000	1,82
Carvão Mineral	Carvão Mineral	8	1.455.104	1,32	8	1.455.104	1,32
Eólica		17	272.650	0,25	17	272.650	0,25
Importação	Paraguai		5.650.000	5,46		8.170.000	7,40
	Argentina		2.250.000	2,17			
	Venezuela		200.000	0,19			
	Uruguai		70.000	0,07			
Total		1.764	110.388.461	100	1.764	110.388.461	100

FIGURA 15: Participação das diversas fontes geradoras na matriz elétrica brasileira (2007) [49]

Estes valores cabem destacar, diz respeito à potência instalada nas usinas, o que se refere ao potencial de geração, e ao qual ainda há que se considerar o fator de capacidade, variável que determina quanto deste potencial pode de fato ser aproveitado. Desta forma, para se ter a real dimensão da participação das fontes renováveis, e principalmente da hidrelétrica (que possui fator de carga muito superior às usinas termelétricas), deve-se avaliar a energia gerada. Para tanto, pode-se lançar mão dos dados do Balanço Energético Nacional [50].

Segundo a ANEEL [49], em 2007 dos 484,52 TWh gerados de eletricidade no país, 374,4 TWh foram provenientes de hidrelétricas e 16,8 TWh de centrais à biomassa, o que resulta em 88,7% da eletricidade oriunda de fontes renováveis.

Ainda sobre a matriz de geração é importante ressaltar que, embora sejam alternativas em crescente expansão (principalmente por iniciativas de incentivo por parte do governo federal), as opções eólica, solar e outras fontes renováveis ainda são incipientes e não perfazem somadas sequer 1% da potência instalada.

Desta forma o indicador IDA 1 é fundamental para avaliar a sustentabilidade ambiental quanto a emissões de gases do efeito estufa e impactos nas condições sócio econômicas.

IDA 2 - O indicador de oferta interna de energia não renovável permite avaliar o grau do desenvolvimento de um país e sua utilização de fontes de energia poluentes e não renováveis, ou seja, é um complemento ao indicador IDA 1. Países que possuem uma matriz energética composta em boa parte de fontes de energia não renováveis, terão como desafio para as próximas décadas desenvolverem tecnologias novas na geração de eletricidade e como tal deverão gastar grandes montantes em investimentos de pesquisa e desenvolvimento. Portanto, acompanhar o progresso deste indicador bem como a evolução dos investimentos em pesquisa na área permite avaliar o grau de sustentabilidade, e os desafios inerentes.

IDA 3 - O terceiro indicador selecionado foi a Emissões de Gases do Efeito Estufa. As emissões de gases de efeito estufa estão relacionadas principalmente ao uso de energia para a geração de eletricidade, nos transportes e na queima de biomassa. Países menos desenvolvidos ainda são grandes dependentes de fontes energéticas altas em emissões de GEF.

Pode-se considerar que o Brasil não é um grande emissor de gases de efeito estufa no setor energético. Entre as razões que contribuem para isso, cita-se que o Brasil é um país tropical, com invernos moderados e aproximadamente 46% de sua matriz energética é suprida por fontes renováveis. Mais de 95% da eletricidade brasileira é gerada por usinas hidrelétricas e há ampla utilização de biomassa (álcool como combustível para veículos, bagaço da cana-de-açúcar para a geração de vapor, uso de carvão vegetal na indústria siderúrgica, entre outras aplicações). Além disso, há programas de conservação de energia que têm buscado desde a década de 80, melhorar os padrões de produção de energia e consumo no Brasil. [51].

Analisando-se especificamente as emissões de gases do setor elétrico brasileiro, pode-se observar as emissões das usinas hidrelétricas e termelétricas para o período de 2007 a 2016 na FIG 16 extraída do Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica [50]. Para os anos de 2013 e 2014, ocorre uma queda na emissão de gases provenientes das termelétricas devido à substituição de energia de algumas usinas pela

energia gerada e redistribuída de outras regiões em função da integração de sistemas isolados ao Sistema Nacional Integrado (SIN).

FIGURE

FIG 16: Emissão das termelétricas e das hidrelétricas no período de 2007 a 2016 [50]

Observando-se mais detalhadamente as emissões oriundas das termelétricas, constata-se que há emissão de 19 Mt de CO₂ eq – valores estimados para 2007. Espera-se que essas emissões dupliquem e alcancem o patamar de 44 Mt. de CO₂ eq. em 2016. A partir de 2011, haverá um aumento significativo das emissões provenientes da região Sul com a entrada em operação da termelétrica de Candiota. Por sua vez, registra-se-á um aumento no Nordeste também a partir de 2011 com a geração proveniente de gás natural. A TAB. 8 apresenta o quantitativo acumulado de gases de efeito estufa a serem emitidos para o período de 2007 a 2016 por termelétricas expressos em Mt de CO₂ equivalente [50].

TABELA 8: Gases de efeito estufa emitidos por termelétricas (2007 – 2016) [50]

Emissões	CO ₂	CH ₄	N ₂ O
Total (Mt CO ₂ Equiv.)	303,06	0,36	0,38

No caso das emissões provenientes de usinas hidrelétricas, a alteração provocada pela interferência humana nos ecossistemas naturais devido à formação de reservatórios hidrelétricos modificou ambientes de águas em movimento para uma

situação de águas paradas, além de ter mudado a dinâmica de armazenamento de nutrientes bem como suas taxas de reciclagem. Essas alterações influenciaram o balanço do carbono, nos fluxos de gases-traço e na química da água tanto na superfície como abaixo dela.

Pesquisas realizadas pela COPPE/UFRJ em associação com instituições internacionais a respeito de gases de efeito estufa em reservatórios hidrelétricos demonstram que ocorrem emissões de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), óxido nitroso (N_2O), nitrogênio e oxigênio [51]. Outros resultados das pesquisas apontam que a intensidade de emissão dos gases em um reservatório muda com o tempo e com flutuações em períodos de duração irregular. Elementos como a temperatura, intensidade dos ventos, insolação, parâmetros físico-químicos da água, composição da biomassa, entre outros, influenciam essa intensidade. A COPPE e o MCT ainda divulgaram em documento que foi constatada uma grande variabilidade na intensidade das emissões de CO_2 e CH_4 dependendo de fatores como a profundidade no ponto de medição, composição da biosfera e regime de operação do reservatório. Há, também, uma baixa correlação entre as emissões e a idade do reservatório, o que pode ser associado ao fato de as emissões serem devidas não apenas à decomposição do estoque de biomassa terrestre preexistente, mas também à da matéria orgânica proveniente da bacia de drenagem a montante (carbono da biomassa e do solo e eventual lançamento de esgoto e águas residuais) e da matéria orgânica internamente produzida no lago (produção de fitoplâncton por exemplo) [51].

É importante ressaltar que os valores estimados para as hidrelétricas na pesquisa mencionada incluem emissões não totalmente antrópicas. Esse problema só poderá ser resolvido quando um estudo de avaliação das emissões for realizado previamente à construção de um reservatório o que permitirá a comparação com as emissões a serem medidas após a sua construção.

Uma comparação realizada pela ELETROBRAS em 2000 das emissões equivalentes de algumas hidrelétricas pesquisadas com diferentes tecnologias de geração térmica mostrou que, em sua maioria, as hidrelétricas apresentam resultados melhores, demonstrando que comparativamente é uma solução viável para a redução das emissões de gases na geração de energia elétrica. Essa comparação levou em consideração tecnologias de geração térmica com 30 a 35% de eficiência no caso de ciclo simples

movido a óleo combustível e 45% no caso de ciclo combinado a gás natural de potência equivalente pelo período de um ano [50].

Ainda em relação à comparação das emissões das hidrelétricas com as de termelétricas, de um modo geral, as hidrelétricas com maiores densidades de potência apresentam os melhores desempenhos, superiores aos de termelétricas com tecnologias mais modernas, a gás natural com ciclo combinado e eficiência de 50% [50]. Contudo, algumas hidrelétricas com baixa densidade de potência têm desempenhos pouco acima ou piores que termelétricas equivalentes. De maneira geral, pode-se dizer que as emissões de gases de efeito estufa por hidrelétricas podem ser reduzidas quando se evita a baixa densidade de potência na escolha dos reservatórios e quando se desmata o reservatório antes da inundação [51].

Vale destacar que os projetos que permitirão a integração dos sistemas isolados da região Norte ao Sistema Integrado Nacional (SIN) também contribuirão para a redução das emissões de CO₂ do setor elétrico do país, pois possibilitarão a substituição de geração termelétrica local a óleo combustível ou diesel por energia proveniente de outras regiões com base predominantemente hídrica. [50].

De modo a estimar estas emissões pode-se apresentar a adaptação dos cálculos do IPCC para o SIN, por meio do estabelecimento de uma relação matemática que permite o cálculo da emissão de gases causada pela geração de energia elétrica a partir da multiplicação do fator de emissão de queima ideal de combustível fóssil, apresentado pelo IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima, por um fator de eficiência total (no caso de 1996), obtido pela quantidade de combustível queimada dividida pela eficiência de conversão. Para os combustíveis fósseis mais utilizados na geração de eletricidade no Brasil, têm-se os dados apresentados na TAB. 9 [52].

TABELA 9: Emissão de gases de efeito estufa na geração de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis (1996) [52]

Combustível	Diesel	Óleo Combustível	Carvão	Gás Natural
Kg CO ₂ / MWh elétrico	884,4	923,6	1291,4	502,3

5.2.3 Dimensão Econômica

A escolha dos indicadores que avaliem a sustentabilidade energética deve levar em consideração o crescimento econômico, o nível de investimentos, o consumo e a relação destas variáveis com a crescente demanda por energia. Portanto, avaliar a questão da sustentabilidade energética sem levar em consideração questões relacionadas à dimensão econômica não permite ter uma análise de todos os ângulos possíveis.

IDE 1 - o primeiro indicador escolhido foi o PIB per capita. Este indicador procura avaliar o grau de riqueza por habitante de um país. Em média países que possuem um PIB per capita alto associado a um baixo índice de Gini, são grandes demandantes de energia.

FIGURA 17: Evolução do PIB per capita 1995 – 2008 (R\$ deflacionados).

Pode-se observar que o crescimento do PIB por habitante após o Plano Real aumentou gradativamente, isto representa um aumento na renda média do trabalhador, que, por conseguinte significa mais consumo de bens e serviços e aumento na demanda por energia.

Assim este indicador deve estar associado com outros indicadores, principalmente o índice de Intensidade Energética Total (IDE 2) que procura mensurar o desenvolvimento no caminho de uma maior eficiência energética, seja no desenvolvimento de novas tecnologias ou no melhor planejamento de sua matriz energética.

IDE 2 – Intensidade Energética - este indicador é obtido pela razão entre o uso da energia e o Produto Interno Bruto. Tal relação tem como finalidade, identificar de

maneira geral, a quantidade de energia necessária para a produção uma unidade monetária de PIB de um país em determinado período de tempo, geralmente um ano. Segundo Cima [34]:

“Na realidade, como argumentam especialistas, a utilização isolada de indicadores como consumo energético total, PIB e intensidade energética como ferramenta para a formulação de políticas, análises e projeções, pode levar a resultados equivocados (SCHIPPER et al., 2001; MARTIN, 1992; PERCEBOIS, 1979). De fato, poucas informações relevantes acerca do comportamento do sistema energético, ou da economia como um todo, podem ser extraídas apenas analisando-se a evolução da intensidade energética total de forma isolada. No entanto, como destaca SCHIPPER (2001), a análise da intensidade energética total é um primeiro passo para o estudo das escolhas de desenvolvimento feitas por um país ao longo dos anos, uma vez que oferece uma visão geral do perfil energético do país e levanta uma série de questionamentos acerca de quais foram os verdadeiros motivos para as variações na intensidade energética total.”

Portanto, uma combinação entre o indicador de intensidade energética e outros indicadores permite uma avaliação mais acertada. Uma solução para este problema é a decomposição de indicador por setores.

IDE 3 – Taxa de Investimento: esse indicador utilizado na presente dissertação é a Taxa de Investimento que mostra como os países investem na formação bruta de capital fixo e em qual proporção do PIB. Países que possuem alta taxa de investimento têm maiores condições de desenvolver novas tecnologias energéticas e/ou mais eficientes no consumo de energia.

No caso de países em desenvolvimento, o agente mais importante envolvido nas decisões relativas ao setor energético, nas últimas duas décadas, refere-se ao papel dos governos nacionais, que também foram os principais responsáveis pelas decisões econômicas nacionais e dos investimentos brutos no setor, dado que o retorno de um investimento em pesquisa e desenvolvimento de novas fontes de energia ou mesmo de

eficiência energética tem um retorno a médio e longo prazo. Assim, é que, por exemplo, a energia tem sido vista pelo governo brasileiro como um elemento estratégico para promover o crescimento econômico através da industrialização e exportação de manufaturados (principalmente daqueles intensivos em eletricidade), fato que também se repetiu em muitos outros países em desenvolvimento.

No Brasil e na maioria dos países em desenvolvimento, a visão atual de energia tem sido influenciada por eventos externos importantes, tais como os choques do preço do petróleo, as pressões financeiras resultantes da dívida externa acumulada e em anos recentes pela maior preocupação com o meio ambiente. O preço do petróleo durante os anos 70 determinou maiores esforços do Brasil em termos da redução da dependência externa deste combustível, por exemplo, através da canalização de investimentos para exploração, produção nacional e maior uso de hidroeletricidade. Programas de substituição de combustíveis foram iniciados durante aquela época, como o Programa Nacional do Álcool (PROALCOOL), com o objetivo de aumentar a produção doméstica como uma mercadoria estratégica e atualmente dado o alto preço do barril do petróleo assumiram relevada importância no panorama econômico do crescimento e do desenvolvimento nacional.

FIGURA 18: Nível de Investimento no Brasil (R\$ milhões)

A FIG. 18 quando analisada em termos percentuais do PIB, mostra que a taxa média de investimento do Brasil nos últimos anos corresponde a aproximadamente 19% do PIB, sendo que 16% é investimento privado e apenas 3% é feito pelo governo, segundo dados fornecidos pelo Instituto de Pesquisas em Economia Aplicada (IPEADData). Isto

mostra o descaso para com a questão do investimento em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias.

IDE4 - o quarto indicador a ser considerado é o Consumo Final Residencial de Energia. Famílias que se encontram em países com maior grau de desenvolvimento, medido pelo Índice de Desenvolvimento Humano (IDH), são também grandes consumidores finais de energia, já que o acesso a produtos mais intensivos em energia aumenta. O gráfico abaixo apresenta a relação entre o IDH de alguns países selecionados e sua demanda por energia.

FIGURA 19: Desenvolvimento e demanda energética por habitante

IDE 5 - Consumo Final de Energia Indústria + Agropecuário: as indústrias são grandes demandantes de energia em seus processos produtivos. A busca por melhorias técnicas na eficiência energética deve ser uma busca tanto do setor público quanto do setor privado.

O Brasil em virtude de uma industrialização tardia comprometeu a sua produção industrial, que ficou dependente de bens de capital importados. Isto forçou a um círculo vicioso, caracterizado por um aumento cada vez maior da produção no curto prazo, para satisfazer uma demanda crescente, de forma a compensar a perda relativa do

valor dos produtos no mercado internacional. A este processo foi dado o nome de Plano de Substituição de Importações. Isto levou a um processo de produção de bens de menor valor adicionado provocando uma maior rigidez na estrutura industrial no Brasil, cujo consumo final deve-se em grande parte, a segmentos industriais maduros, que tendem a ser menos dinâmicos com relação à incorporação de inovações tecnológicas no longo prazo, o que por sua vez faz com que se mantenha um consumo final de energia alto.

Por sua vez, o setor agropecuário passou por modernizações a partir da década de oitenta, incentivadas pelo governo federal. Cabe destacar dois segmentos: o setor de produtos agrícolas voltados para a exportação e o de biomassa voltado para fins energéticos.

A combinação destes fatores levou a um desacoplamento entre o índice de intensidade energética em relação ao PIB, por isto a utilização deste indicador de consumo setorial para analisar a se houve melhorias no consumo eficiente de energia.

IDE 6 - Consumo Final de Energia Comércio + Transportes. Os meios de transportes apresentam uma demanda energética, principalmente de combustíveis fósseis como o petróleo. A busca por uma tecnologia menos poluente na emissão de gases do efeito estufa é fator decisivo para o desenvolvimento sustentável de um país. Tecnologias como o etanol, células combustíveis e outros, devem ajudar no longo prazo para a diminuição das emissões de gases do efeito estufa.

O consumo de combustível, principalmente pelo setor automotivo foi o que apresentou o maior crescimento durante os últimos 20 anos. Outro setor que cresceu fortemente foi o consumo de energia na área comercial, principalmente devido ao processo de urbanização e o aumento do acesso à energia elétrica. Cabe destacar também que o crescimento do comércio informal contribui para o consumo de energia, porém o valor da produção não é mensurado diretamente, porém contribui para o aumento da intensidade energética. A partir do ano 2000 há uma retomada do setor sucro-alcooleiro, com a maior demanda por carros flex. Estes fatores explicam em parte o aumento do consumo de energia como apresentado na FIG. 20.

FIGURA 20: Consumo de Energia Comércio e Transportes (10^3 tep)

5.3 Metodologia de construção dos indicadores

A construção de um indicador sintético como o proposto neste trabalho envolve a necessidade de se trabalhar com várias unidades de medida, o que acarreta um problema na hora de consolidar os dados. Desta forma, colocá-los em uma mesma escala é parte importante no processo de construção de um índice de sustentabilidade energético. Existem diversas técnicas de padronização das variáveis, porém as mais comumente usadas são: a padronização pelo *z-score* ou a transformação em valores entre 0 (zero) e 1 (um) através do método de *Max-min*. No presente trabalho foi utilizada a segunda técnica de Max-min ou transformação 0-1.

A vantagem desta técnica é que ela impede que se criem pesos negativos, o que muitas vezes já enseja um problema. Para tanto, para cada variável analisada atribui-se o valor 0 (zero) ao menor valor do vetor e 1 (um) para o maior valor do vetor. Desta forma, para cada valor da variável x compreendida entre o menor valor e o maior, é feita uma transformação dada pela seguinte equação (1):

$$v_i = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (5.1)$$

Onde:

v_i = valor transformado da i -ésima observação da variável x

x_{min} = valor mínimo da variável x

x_{max} = valor máximo da variável x

Para corrigir o sentido da variável faz-se necessário uma segunda transformação:

$$v_i = 1 - \left(\frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \right) = \frac{x_{max} - x_i}{x_{max} - x_{min}} \quad (5.2)$$

O resultado final desta transformação é uma tabela contendo valores entre 0 e 1 que se encontram no ANEXO II do presente trabalho.

5.4 Ferramenta computacional (MATLAB)

Como foi dito no capítulo 1, o objetivo é a construção de um índice de sustentabilidade energética hipotético utilizando lógica fuzzy. Para tanto a escolha de algum software era necessária.

A estruturação desta arquitetura foi estabelecida através do software matemático MATLAB/ *Fuzzy Logic Toolbox*. A versão utilizada foi a 8.0 fornecida pela Universidade de São Paulo aos alunos de graduação e pós-graduação.

É importante ressaltar que a utilização desta ferramenta é puramente para pesquisa. Na construção de um índice de sustentabilidade energética permanente seria necessário a programação de toda a arquitetura em alguma linguagem de programação específica, pois as entradas (*inputs*) no MATLAB são feitas manualmente, bem como a compilação dos resultados.

6. LÓGICA FUZZY

6.1 Introdução / Base teórica

A lógica digital convencional trata variáveis assumindo apenas dois possíveis estados: falso ou verdadeiro. Em boa parte dos casos, essa representação é suficiente, mas há situações em que desejamos valores intermediários. Poderíamos usar valores analógicos, mas neste caso cairíamos em equações matemáticas complexas, que nem sempre chegariam ao resultado esperado. Neste ponto é que aparece a lógica nebulosa ou lógica difusa, que expressa exatamente, dentro de um grau de certeza, os valores com que trabalha.

Os primeiros conceitos de lógica fuzzy foram introduzidos em 1965, pelo matemático Lofti Asker Zadeh, professor da Universidade de Berkeley [53], que deu o primeiro tratamento matemático a termos lingüísticos subjetivos, como *“aproximadamente”*, *“em torno de”*, *“próximo”*, dentre outros, resumindo os conceitos dos conjuntos nebulosos com a criação de sistemas nebulosos ou sistemas difusos.

A Lógica Nebulosa desenvolvida por Zadeh combina Lógica Multivalorada, Teoria Probabilística e Inteligência Artificial para representar o pensamento humano, ou seja, ligar à lingüística e a inteligência humana, pois muitos conceitos são mais bem definidos por palavras do que pela matemática.

Os conjuntos nebulosos constituem uma "ponte" no caminho de aproximar o raciocínio humano ao da lógica binária ou computacional. Por outro lado, a lógica clássica desenvolvida por Aristóteles, filósofo grego (384-322 a.C.) estabelece um conjunto de regras rígidas para que conclusões possam ser logicamente aceitas e válidas. O emprego da lógica aristotélica leva a uma linha de raciocínio lógico baseado em premissas e conclusões. Desde então, a lógica convencional, assim chamada, tem sido binária, isto é, uma declaração é falsa ou verdadeira, não podendo ser ao mesmo tempo parcialmente verdadeira e parcialmente falsa.

Por exemplo: “todo homem é mortal” (pressuposição um); “Francisco é um homem” (pressuposição dois); “Francisco é mortal” (conclusão). No entanto: “a mulher morrerá se cair do décimo andar” (pressuposição um); “a mulher morreu” (pressuposição dois); nada é possível concluir destes dois fatos, pois, segundo a Lógica empregada, nenhuma relação determinante se estabelece entre ambas. Nesta lógica não é possível

uma verdade parcial ou tampouco uma falsidade parcial. É como ser honesto: nenhum ser humano pode ser “mais ou menos” honesto, isto é, o indivíduo se classifica como honesto ou desonesto, sem meio termo [54].

Então, expressões como “pouco honesto”, “muito desonesto”, “meio desonesto”, “quase totalmente honesto”, são todas vazias de semântica, sendo entendidas somente do ponto de vista estilístico da língua, seja ela qual for.

A Lógica Nebulosa viola estas suposições. O conceito de dualidade estabelece que algo pode e deve coexistir com o seu oposto, faz a lógica difusa parecer natural, até mesmo inevitável. A lógica aristotélica trata com valores "verdade" das afirmações, classificando-as como verdadeiras ou falsas.

Não obstante, muitas das experiências humanas, ambientais e sociais não podem ser classificadas simplesmente como verdadeiras ou falsas, sim ou não, branco ou preto. Por exemplo, irá chover hoje ou não? Se chover fará sol? O impacto ambiental na construção de um empreendimento é grande ou pequeno? Um sim ou não como resposta a estas questões é, na maioria das vezes, incompleta.

Portanto, a diferença básica entre a lógica clássica e a lógica nebulosa é que a lógica convencional trata conceitos como categorias discretas e a lógica nebulosa simultaneamente podem atribuir a um mesmo conceito diversos valores lingüísticos com graus de certeza associados, podendo existir também inúmeros graus de incerteza.

Contudo, a Lógica Nebulosa, com base na teoria dos conjuntos nebulosos, tem se mostrado mais adequada para tratar imperfeições da informação. Assim, podemos definir de forma simplificada a Lógica Nebulosa como sendo uma ferramenta capaz de capturar informações vagas, em geral descritas em uma linguagem natural e convertê-las para um formato numérico, de fácil manipulação computacional.

6.2 Vantagens da aplicação de lógica fuzzy na solução de problemas não lineares

A lógica fuzzy ou também conhecida como Lógica Nebulosa é a ferramenta mais apropriada para lidar com conceitos ambíguos e que apresentam um complexo espectro de variação, onde as relações de causa e efeito não estão bem definidas e são subjetivas. Esta ferramenta matemática permite modelar sistemas que envolvem tanto variáveis quantitativas como qualitativas. A modelagem é feita utilizando-se de conceitos

lingüísticos. Desta forma, é possível formular matematicamente a subjetividade própria de fenômenos naturais e sociais, ou de como os vemos, buscando previsões coerentes. [54]

Desta forma é uma lógica computacional (*soft computing*) baseada em palavras e não em números, onde são incorporados modificadores de predicado como “muito”, “pouco”, “grande”, “pequeno”, “médio”, “muito bom”, etc, e que se apropria de probabilidades lingüísticas, interpretadas como números nebulosos e manipulados pela sua aritmética.

A Lógica Nebulosa também permite o uso das variáveis lingüísticas que se aproximam mais do pensamento humano, simplificando a solução de problemas que tratados de forma convencional se tornariam por demais complexos.

Segundo Barros [54]:

“A idéia de contrapor modelos determinísticos a modelos mais flexíveis, que contemplam uma certa dose de incerteza tratada com a lógica fuzzy, tem sido a linha de nossas pesquisas. Formular matematicamente a subjetividade própria de fenômenos naturais, ou de como os vemos, para tentar previsões coerentes é um dos desafios.”

Citada por Pinho [54] como um novo ramo da matemática, a lógica fuzzy tem como ponto fundamental a representação da lógica e da racionalidade humana na resolução de problemas complexos.

Chiu e Park [55], afirmam que conforme o grau de incerteza de um problema aumenta, a capacidade de descrição de um modelo para resolução do mesmo decresce. Assim sendo, fez-se necessário o surgimento de uma teoria que fornecesse subsídios para a resolução de problemas com alto grau de incerteza, sem que informações importantes se perdessem durante a manipulação dos dados por incapacidade do modelo matemático em lidar com a incerteza inerente ao mesmo.

Neste contexto, a lógica fuzzy é definida por Cox [56], como sendo capaz de combinar a imprecisão associada aos eventos naturais e o poder computacional das máquinas para produzir sistemas de resposta inteligentes, robustos e flexíveis.

Nos sistemas Fuzzy o protocolo de raciocínio é um paradigma de processamento paralelo, onde todas as regras estabelecidas são disparadas. Desta forma, pode-se dizer que as etapas que compreendem o processo de raciocínio Fuzzy são:

FIGURA 21: Etapas do Raciocínio Fuzzy

Assim, a fuzzificação compreende a etapa na qual as variáveis lingüísticas são definidas de forma subjetiva, bem como as funções membro (funções de pertinência) transformando as variáveis de entrada em variáveis fuzzy. Esta fase do processo engloba:

- i. Análise do problema
- ii. Definição das variáveis
- iii. Definição das funções de pertinência (triangular, trapezoidal, etc)
- iv. Criação das regiões

A inferência é a etapa na qual as proposições (regras) são definidas e depois são examinadas paralelamente.

Esta fase engloba:

- i. Definição das proposições;
- ii. Análise das regras;
- iii. Criação da região resultante

Dentro do processo de inferência o mecanismo chave do modelo fuzzy é a proposição, que é relacionamento entre as variáveis do modelo e as regiões fuzzy. Na definição das proposições, deve-se trabalhar com proposições condicionais (*if W is Z then X is Y*) e proposições não-condicionais (*X is Y*).

A agregação calcula a importância de uma determinada regra para a situação corrente e a composição calcula a influência de cada regra nas variáveis de saída.

Finalmente a terceira etapa do processo é a Defuzzificação, onde as regiões resultantes são convertidas em valores para a variável de saída do sistema. Esta etapa corresponde à ligação funcional entre as regiões fuzzy e o valor esperado. Dentre os diversos tipos de técnicas de defuzzificação destacam-se: centróide (centro de gravidade ou centro de massa), primeiro dos máximos e média dos máximos. Cada uma destas etapas do processo de construção do modelo de inferência fuzzy será analisada em todos os seus detalhes nas páginas seguintes.

6.3 Conjuntos Fuzzy

Quando analisamos vários conjuntos de indicadores, dentro de cada uma das dimensões abordadas (Ambiental, Econômica, Institucional e Social) observa-se que muitas variáveis apresentam um alto grau de incerteza que apesar de serem utilizadas em nosso cotidiano e perfeitamente compreendidas linguisticamente entre os interlocutores, tem invariavelmente permanecido fora do tratamento matemático tradicional. Por exemplo, o rio *A* está muito poluído, região *B* apresenta um alto grau de pobreza, a taxa de desflorestamento de certa região é muito alta, etc.

Neste caso, os objetivos: muito, alto grau, etc, são conceitos lingüísticos relacionados à inexatidão, e neste caso, muitas vezes, a teoria dos conjuntos permite que se crie “grupos” cujas fronteiras podem ser consideradas incertas, ou seja, definida por propriedades subjetivas [54].

A formalização matemática de qualquer conjunto fuzzy pode ser representada através de uma função característica, dada por:

$$C_A = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (6.1)$$

onde:

C_A = é uma função cujo domínio é U e a imagem está contida no conjunto $\{0,1\}$

Desta forma, $C_A(X) = 1$ indica que o elemento X está em A e $C_A(X) = 0$ indica que X não pertence ao conjunto A . Esta função característica é, por conseguinte o

“*relaxamento*” no conjunto imagem permitindo captar as características subjetivas de determinadas variáveis.

O conceito de conjunto nebuloso aparece como uma tentativa de superar a rigidez da teoria clássica de conjuntos para trabalhar matematicamente com classes nas quais a pertinência de um objeto a uma classe pode ser interpretada como uma questão de grau, isto é, apresenta uma variação gradual. Assim, um conjunto fuzzy em vez de assumir valores no intervalo discreto $\{0,1\}$ através da função de pertinência, pode assumir valores no intervalo contínuo $[0,1]$.

Para obter a formulação matemática precisamos definir alguns conceitos. Seja U um conjunto (definição clássica de conjunto).

Definição 1: Um subconjunto fuzzy F de U é caracterizado por uma função $\mu:U \rightarrow [0,1]$, chamada de função de pertinência do conjunto fuzzy F .

O valor $\mu(x) \notin [0,1]$ indica o grau com que o elemento x de U está no conjunto fuzzy F , com $\mu(x) = 0$ e $\mu(x) = 1$, indicando respectivamente a pertinência e a não-pertinência de x ao conjunto fuzzy F . Do ponto de vista formal, a definição de um subconjunto fuzzy foi obtida “ampliando-se o conceito” de contradomínio da função característica, que é o conjunto $\{0,1\}$ para o intervalo $[0,1]$.

A grande dificuldade na teoria fuzzy reside em conjuntos cujas fronteiras são imprecisas, ou seja, fronteiras que envolvem variáveis lingüísticas como, por exemplo: próximo de, muito pequeno, grande, alto, etc. Por exemplo, considere o seguinte exemplo:

Exemplo: seja o subconjunto fuzzy F dos números naturais pequenos:

$$F = \{n \in \mathbb{N} / n \text{ é pequeno}\} \quad (6.2)$$

O número 0 (zero) pertence a este conjunto? E o número 1000? Dentro da teoria fuzzy ambas poderiam pertencer ao conjunto dos números pequenos, porém com diferentes graus de pertinência. Isto dependerá da propriedade que caracteriza a função de pertinência.

Desta forma, a função de pertinência deve ser “construída” de forma coerente com a propriedade lingüística “*pequeno*” que caracteriza seus elementos no conjunto universo dos números naturais. A função de pertinência poderia ser:

$$\mu(x) = \frac{1}{1+x} \quad (6.3)$$

Neste caso, a escolha da função de pertinência que será adotada dependerá de fatores relacionados ao contexto do problema analisado. No presente trabalho, variáveis relacionadas à sustentabilidade energética.

Dada a função de pertinência, como função acima, poderíamos dizer que 0 pertence a F com grau de pertinência $\mu(0) = 1$, enquanto 1.000 pertence a F com grau de pertinência $\mu(1000) = 0,001$, de acordo com o gráfico abaixo:

FIGURA 22: conjunto fuzzy dos números naturais “pequenos” [54]

Neste exemplo, a escolha da função de pertinência $\mu(x)$ foi feita levando em conta a definição de “pequeno”. Isto é, para modelar este conjunto fuzzy F , foi escolhida uma função monótona decrescente:

$$\{\mu_x\}_{x \in N}: 0 \leq \mu_0 \leq 1 \quad (6.4)$$

outra função com as mesmas propriedades seria:

$$\mu(n) = e^{-n}$$

$$\mu(x) = e^{-x} \text{ ou } \mu_F(x) = \frac{1}{x^2+1} \text{ ou } \mu_F(x) = \frac{1}{\ln(x+e)} \quad (6.5)$$

Claro que a função a ser adotada para expressar o conjunto *fuzzy* em questão, depende de fatores que estão relacionados com o contexto do problema a ser estudado. Do ponto de vista estrito da lógica fuzzy, qualquer uma das funções de pertinência

anteriores pode representar um conjunto fuzzy F . Porém, o que deve ser observado é que cada uma destas funções produz conjuntos fuzzy distintos.

No exemplo apresentado o conjunto universo U de cada conjunto fuzzy está claramente especificado. Porém, nem sempre este é o caso. Em boa parte dos casos interessantes em modelagem é preciso decidir qual conjunto universo, deve ser considerado.

6.3.1 Operações com conjuntos fuzzy (união, intersecção e complementação)

Sejam A e B dois subconjuntos fuzzy de U , com suas respectivas funções de pertinência φ_A e $\varphi_B(x)$, respectivamente. Dizemos que A é um subconjunto fuzzy de B , representado por $A \subset B$ se $\varphi_A(x) \leq \varphi_B(x)$, para todo $x \in U$.

É importante observar que o conjunto vazio $\emptyset$ tem função de pertinência $\varphi_{\emptyset}(x) = 0$, enquanto que o conjunto universo U tem função de pertinência $\varphi_U(x) = 1$, para todo $x \in U$. Assim, pode-se dizer que $\emptyset \subset A$ e que $A \subset U$ para todo A .

Definição 1 (União): a união entre A e B é o subconjunto fuzzy de U cuja função de pertinência é dada por:

$$\varphi_{(A \cup B)}(x) = \max_{x \in U} \{\varphi_A(x), \varphi_B(x)\} \quad (6.6)$$

Deve-se observar que esta definição é uma extensão do caso clássico. De fato quando A e B são subconjuntos clássicos de U temos:

$$\max_{x \in U} \{X_A(x), X_B(x)\} = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \text{ ou } x \in B \\ 0 & \text{se } x \notin A \text{ e } x \notin B \end{cases} \quad (6.7)$$

$$= \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \cup B \\ 0 & \text{se } x \notin A \cup B \end{cases} \quad (6.8)$$

$$= X_{A \cup B}(x) \quad (6.9)$$

Definição 2 (Intersecção): a intersecção entre A e B é o subconjunto fuzzy de U cuja função de pertinência é dada por:

$$\varphi_{(A \cap B)}(x) = \min_{x \in U} \{\varphi_A(x), \varphi_B(x)\} \quad (6.10)$$

Definição 3 (Complementar de subconjuntos fuzzy): o complementar de A é o subconjunto A' de U cuja função de pertinência é dada por:

$$\varphi_{A'}(x) = 1 - \varphi_A(x), x \in U \quad (6.11)$$

A FIG. 23 representa as operações com subconjuntos fuzzy.

FIGURA 23: Operações com subconjuntos fuzzy: (a) intersecção; (b) união; (c) complemento

6.3.2 O conceito de α -nível

Um subconjunto fuzzy A de U é “formado” por elementos de U com uma certa hierarquia (ordem) que é traduzida através da classificação por graus. Um elemento x de U está em uma classe se seu grau de pertinência é maior que um determinado valor limiar ou nível $\alpha \in [0,1]$ que define esta classe [54]. O conjunto clássico de tais elementos é um α -nível de A , denotado por $[A]^\alpha$.

Definição (α -nível): seja A um subconjunto fuzzy de U . O α -nível de A é o subconjunto clássico de U definindo por:

$$[A]^\alpha = \{x \in U: \varphi_A(x) \geq \alpha\} \text{ para } 0 < \alpha \leq 1 \quad (6.12)$$

O nível zero de um subconjunto fuzzy A é definido como sendo o menor subconjunto (clássico) fechado de U que contém o subconjunto suporte de A . Em notação matemática, $[A]^0$ é o fecho do suporte de A e é indicado por $\overline{\text{supp}A}$. Note que o conjunto $\{x \in U: \varphi_A(x) \geq \alpha\} = U$ não é necessariamente igual a $[A]^0 = \overline{\text{supp}A}$.

Exemplo: Seja $U = \mathbb{R}$, (conjunto dos números reais), e A um subconjunto fuzzy de $\mathbb{R}$, com a seguinte função de pertinência:

$$\varphi_A(x) = \begin{cases} x - 1 & \text{se } 1 \leq x \leq 2 \\ 3 - x & \text{se } 2 < x < 3 \\ 0 & \text{se } x \notin [1, 3) \end{cases} \quad (6.13)$$

Neste caso, tem-se:

$$[A]^\alpha = [\alpha + 1, 3 - \alpha] \text{ para } 0 < \alpha \leq 1; \quad (6.14)$$

$$[A]^0 = \overline{[1, 3]} = [1, 3] \quad (6.15)$$

Graficamente:

FIGURA 24: α -níveis $[A]^\alpha$ e $[A]^0 \neq U$

6.4 Principais funções de pertinência

Um conjunto fuzzy é caracterizado por uma função de pertinência, e o grau de pertinência pode ser considerado como uma medida que expressa a possibilidade de que um dado elemento seja membro de um conjunto fuzzy.

Quanto à representação de um conjunto fuzzy tem-se que, se ele é discreto, pode-se simplesmente enumerar os seus elementos juntamente com os graus de pertinência na forma:

$$A = \frac{\sum_i \mu_A(x_i)}{x_i} \quad (6.16)$$

onde a somatória se refere a operação união (disjunção) e a notação $\mu_A(x_i)/x_i$ se refere ao elemento x_i que pertence ao conjunto *fuzzy* A com grau de pertinência $\mu_A(x_i)$. Em geral, por simplicidade, somente é listado no conjunto A aqueles elementos cujo grau de pertinência é diferente de zero.

Quando os conjuntos *fuzzy* são contínuos sua representação é a própria função de pertinência. As formas para as funções de pertinência são totalmente arbitrárias. Todavia, as funções mais utilizadas são: linear por partes (triangular ou trapezoidal), quadrática e gaussiana. As funções lineares por partes são as mais populares devido a simplicidade dessas funções e ao fato de que o custo computacional adicional exigido pelos tipos de função não refletem, em geral em uma melhoria significativa na qualidade dos valores de saída dos sistemas [55].

6.4.1 Funções triangulares

Estas funções são caracterizadas por um conjunto de valores (a, u, b) , onde a e b denotam o intervalo mínimo e máximo de pertinência. A FIG. 25 representa uma saída da função de pertinência triangular no MATLAB, onde os valores no eixo das abscissas representam a variável que se quer estudar e o no eixo das ordenadas os valores da função de pertinência. Neste caso a função triangular é descrita da seguinte forma:

$$\varphi_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{u-a} & \text{se } a < x \leq u \\ \frac{x-b}{u-b} & \text{se } u < x < b \\ 0 & \text{se } x \geq b \end{cases} \quad (6.17)$$

O gráfico a seguir corresponde à função de pertinência de um número *fuzzy* triangular, sendo que o mesmo tem a forma de um triângulo, tendo como base o intervalo $[a, b]$ e, como único vértice fora desta base, o ponto $(u, 1)$. Deste modo, os números reais a, u e b , definem o número *fuzzy* triangular.

FIGURA 25: Função de pertinência triangular

Os α -níveis desses números fuzzy tem a seguinte forma simplificada:

$$[\alpha_1^\alpha, \alpha_2^\alpha] = [(u - a)\alpha + a, (u - b)\alpha + b] \text{ para todo } \alpha \in [0,1] \quad (6.18)$$

Note que um número fuzzy triangular não é necessariamente simétrico já que $b - u$ pode ser diferente de $u - a$, porém, $\varphi_A(u) = 1$. Pode-se dizer que o número fuzzy A é um modelo matemático razoável para a expressão lingüística “*perto de u*”. Para a expressão “*em torno de u*”, espera-se simetria. A imposição de simetria acarreta uma simplificação na definição de um número fuzzy triangular. De fato, seja u simétrico em relação a a e b , isto é,

$$u - a = b - u = \delta \quad (6.19)$$

Desta forma:

$$\varphi_A(x) = \begin{cases} 1 - \frac{|x-u|}{\delta} & \text{se } u - \delta \leq x \leq u + \delta \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6.20)$$

6.4.2 Funções trapezoidais

São funções caracterizadas por um conjunto de quatro valores (a, b, c, d) onde a e d determinam o intervalo onde a função de pertinência assume valores diferentes de

zero, e b e c determinam o intervalo dentro do qual a função é máxima e igual a 1. Esta é uma função do tipo:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a} & \text{se } a < x < b \\ 1 & \text{se } b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{se } c < x \leq d \\ 0 & \text{se } x > d \end{cases} \quad (6.21)$$

Figura 26: Função de pertinência trapezoidal

Os α -níveis desses números fuzzy tem a seguinte forma simplificada:

$$[\alpha_1^\alpha, \alpha_2^\alpha] = [(b-a)\alpha + a, (d-c)\alpha + d] \text{ para todo } \alpha \in [0,1] \quad (6.22)$$

É importante observar que, muitas vezes as bases de regras podem estar incompletas. Neste caso deve-se analisar se há um conjunto de regras suficientes para cobrir toda a extensão do problema estudado. No caso de variáveis que procuram auferir o desenvolvimento sustentável, o número de variáveis pode se tornar muito grande e o conjunto de regras por demais complexo, podendo ocorrer redundância de regras, ou mesmo base de regras incompletas. Neste caso, o MATLAB irá fornecer uma saída que corresponde ao ponto médio do domínio da variável resposta.

6.4.3 Funções gaussianas

São funções caracterizadas pela média (μ) e desvio-padrão (σ). Ela permite que um decaimento mais suave e assume valores diferentes de zero para todo o domínio

da variável de entrada. Neste caso, cada função de pertinência deverá apresentar sua média e desvio-padrão. A função é determinada como:

$$\varphi_A(x) = \begin{cases} 0 & \text{se } x \text{ está fora do domínio} \\ \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{\left[-(x-\mu)^2 / 2\sigma^2\right]} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (6.23)$$

FIGURA 27: Função de pertinência gaussiana

Os α -níveis desses números fuzzy tem a seguinte forma simplificada:

$$[\alpha_1^\alpha, \alpha_2^\alpha] = \left[u - \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\alpha^\alpha}\right)}, u + \sqrt{\ln\left(\frac{1}{\alpha^\alpha}\right)} \right] \quad (6.24)$$

6.5 A base de regras

Um sistema de regras fuzzy permite através de métodos matemáticos conhecido como raciocínio aproximado, traduzir termos lingüísticos, constantemente empregados por especialistas, em fórmulas matemáticas, que são então traduzidas em estratégias para que um sistema dinâmico otimize algum critério [56].

Em sistemas fuzzy as tarefas são comandadas por meio de termos da linguagem usual, relacionados com alguma variável de interesse e, é neste aspecto que variáveis lingüísticas desempenham papel fundamental. Estes termos, traduzidos por conjuntos fuzzy, são utilizados para transcrever a base de conhecimentos através de uma coleção de regras fuzzy, denominada de base de regras fuzzy. A partir desta base de regras obtêm-se a relação fuzzy, a qual produzirá uma saída (respostas, ação) para cada entrada (estado, condição) [56].

Uma base de regras fuzzy tem a seguinte forma, de acordo com o quadro abaixo:

FIGURA 28: Base de regras fuzzy em sua forma geral [54]

No sistema de regras fuzzy cada proposição tem a seguinte forma:

SE "**estado**" ENTÃO "**resposta**"

em que cada "estado" e cada "resposta" são valores assumidos por variáveis lingüísticas, e esses por sua vez, são modelados por conjuntos fuzzy. Os conjuntos fuzzy que compõe o "estado" são chamados antecedentes. Por outro lado, os conjuntos fuzzy que compõe a "resposta" são chamados consequentes.

Segundo Barros [54]:

"Uma base de regras cumpre o papel de "traduzir" matematicamente as informações que formam a base de conhecimentos do sistema fuzzy. Num certo sentido, pode-se afirmar que quanto mais precisas forem tais afirmações, menos fuzzy (mais crisp²) será a relação fuzzy que representa os conhecimentos. Numa situação ideal, tal relação pode mesmo ser uma função no sentido clássico."

² Variáveis crisp são variáveis numéricas com um conjunto bem definido.

Pode-se dizer que o caso clássico é um conjunto fuzzy com as incertezas no limite tendendo a zero.

6.6 Arquiteturas fuzzy – etapas

Em geral, para um sistema fuzzy qualquer, a cada entrada fuzzy faz-se corresponder uma saída crisp. Se a entrada for crisp (ponto no $\mathbb{R}^n$), espera-se que a saída também seja crisp (ponto no $\mathbb{R}^m$). Neste caso, um sistema fuzzy é uma função de ponto no $\mathbb{R}^n$ em ponto no $\mathbb{R}^m$ construída de alguma maneira específica [54]. Nos parágrafos seguintes será explicado o roteiro que permite a construção desta função de acordo com a FIG. 29.

FIGURA 29: etapas do raciocínio fuzzy

6.6.1 Fuzzificação

É a primeira fase da construção do modelo fuzzy. Nesta etapa as entradas do sistema são modeladas através de conjuntos fuzzy com os seus respectivos domínios. Nesta primeira fase já se justifica o conhecimento do especialista no fenômeno estudado, pois serão definidas as funções de pertinência para cada conjunto fuzzy envolvido no processo. É importante observar que se a entrada for *crisp*, esta será fuzzificada através de uma função característica.

6.6.2 Base de Regras

Pode-se dizer que na base de regras está a “alma” da modelagem fuzzy. Nesta etapa do processo são definidas as proposições fuzzy na sua forma lingüística:

$$\begin{aligned} & \text{Se } x_1 \text{ é } A_1 \text{ e } x_2 \text{ é } A_2 \text{ e } \dots x_n \text{ é } A_n \\ & \text{Então } u_1 \text{ é } B_1 \text{ e } u_2 \text{ é } B_2 \text{ e } \dots u_m \text{ é } B_m \end{aligned}$$

de acordo com as informações fornecidas por um especialista. Nesta fase, as variáveis e suas respectivas classificações lingüísticas são catalogadas e modeladas através de suas respectivas funções de pertinência, ou seja, é a fase em que se acessa o banco de regras, estabelecidas *ex ante*, e verificam-se quais as regras que se aplicam aos conjuntos que foram sensibilizados pela entrada crisp em questão.

6.6.3 Inferência Fuzzy

Nesta etapa cada proposição fuzzy é transformada matematicamente por meio das técnicas de lógica fuzzy. Em seguida é realizada a composição das regras que foram “disparadas” pelo processo de inferência, obtendo-se assim o conjunto de saída, que na maioria das vezes, constitui-se da união dos vários conjuntos de saída inferidos. Cabe lembrar, que esta fase do processo é tão importante quanto o módulo de regras, pois é basicamente dele que depende o sucesso dos dados de saída que serão defuzzificados.

6.6.3.1 Método de Inferência de Mamdani

O método de inferência Mamdani foi o utilizado na presente dissertação. Este método propõe uma relação binária M entre x e u para modelar a base de regras, baseado em uma regra de inferência do tipo max-min [54, 55]. O método segue os seguintes passos:

- i. Para cada regra R_i , da base de regras, a condição “Se x é A_i então u é B_i ” é modelada pela aplicação do mínimo ($\wedge$);
- ii. Para o conectivo lógico “e” adota-se o mínimo ($\wedge$);
- iii. Para o conectivo lógico “ou” adota-se o máximo ($\vee$) que conecta as regras fuzzy da base de regras.

Assim, a relação fuzzy M é o subconjunto fuzzy de $X \times U$ cuja função de pertinência é dada por:

$$\varphi_M(x, u) = \max_{1 \leq i \leq r} (\varphi_{R_i}(x, u)) = \max_{1 \leq i \leq r} [\varphi_{A_i}(x) \wedge \varphi_{B_i}(u)] \quad (6.25)$$

onde r é o número de regras que compõe a base de regras e, A_i e B_i são os subconjuntos fuzzy da regra i . Cada um dos valores de $\varphi_{A_i}(x)$ e $\varphi_{B_i}(u)$ é interpretado como os graus com que x e u estão nos subconjuntos fuzzy A_i e B_i . A FIG. 30 representa a técnica de Mamdani.

6.6.4 Defuzzificação

Esta é a etapa final do processo de uma arquitetura fuzzy. O objetivo da defuzzificação é transformar a composição gerada pelos conjuntos de saída fuzzy (ou seja, as variáveis lingüísticas, ou termos lingüísticos, ou termos de saída) em números crisp.

O princípio básico é de que, o tomador de decisões, prefere trabalhar com um valor específico, quantificável, do que fazer avaliações amparando-se em valorações puramente qualitativas. Portanto, a defuzzificação traduz em um único valor discreto a distribuição de possibilidades obtida. É importante observar que, as regiões resultantes são convertidas em valores para a variável de saída do sistema. Esta etapa corresponde à ligação funcional entre as regiões fuzzy e o valor esperado [54, 55].

Cabe observar que o processo de defuzzificação implica em perda de informações, pois se por um lado a fuzzificação aproveita a topologia matemática aplicada desde o início do processo, a defuzzificação implica em perda de toda a composição das funções de saída a fim de obter um único número representativo, o que provoca principalmente a perda propiciada pela concentração de informação. Assim, esta parte final do processo, procura aplicar técnicas que permitam minimizar a perda de informação, como será visto no tópico abaixo.

6.6.4.1 Métodos de defuzzificação

Como foi observado, a cada entrada fuzzy corresponde a uma saída fuzzy, porém, ocorre que se a entrada for um número real (*crisp*) a saída também será fuzzy. Desta forma, deve-se utilizar de algum método para defuzzificar e obter como saída um número real. Existem diversos métodos, porém, a princípio qualquer número real, que de

alguma maneira possa representar razoavelmente o conjunto fuzzy B , pode ser chamado de defuzzificador de B [54].

Os métodos de defuzzificação mais utilizados são [55]:

- ✓ Método da média dos máximos, o qual gera uma ação de controle que representa o valor médio de todas as ações de controle individuais cujas funções de pertinência assumem o valor máximo.
- ✓ Método do centro de gravidade, a ação de controle numérica é calculada obtendo-se o centro de gravidade da distribuição de possibilidades da ação de controle global (FIG. 30).

O método da média dos máximos $M(B)$ é geralmente utilizado para um domínio discreto, sendo dado pela fórmula:

$$M(B) = \frac{\sum u_i}{i} \quad (6.26)$$

onde u_i são os elementos de maior pertinências ao conjunto fuzzy B , isto é, para cada i toma-se:

$$\varphi_B(u_i) = \underbrace{\max}_u \varphi_B(u) \quad (6.27)$$

O segundo método é como se fosse uma média aritmética ponderada pelo seu grau de pertinência, que indicam o grau de compatibilidade do valor de u_i com o conceito modelado pelo conjunto fuzzy B .

Este método dá a média das áreas de todas as figuras que representam os graus de pertinência de um subconjunto fuzzy. Entre os métodos de defuzzificação ele é o mais utilizado. As equações abaixo representam respectivamente ao defuzzificador em domínio discreto e em domínio contínuo.

$$U = \frac{\sum_{i=0}^n u_i \varphi_B(u_i)}{\sum_{i=0}^n \varphi_B(u_i)} \quad (6.28)$$

$$U = \frac{\int_{min}^{max} u \varphi_B(u) du}{\int_{min}^{max} \varphi_B(u) du} \quad (6.29)$$

O método do centro de gravidade é o método utilizado na presente dissertação.

FIGURA 30: Método do centro de gravidade.

Como ilustração, a FIG. 31 apresenta um exemplo considerando duas variáveis de entrada, duas regras e a defuzzificação pelo método do centro de gravidade.

Figura 31: Defuzzificação por centro de gravidade.

6.7 Aplicação da Arquitetura Fuzzy nos Indicadores Seleccionados

Quando analisamos vários conjuntos de indicadores, dentro de cada uma das dimensões abordadas (Ambiental, Econômica e Social) observa-se que muitas variáveis apresentam um alto grau de incerteza que, apesar de serem utilizadas em nosso cotidiano e perfeitamente compreendidas linguisticamente entre os interlocutores, tem invariavelmente permanecido fora do tratamento matemático tradicional [56].

A lógica Fuzzy permite modelar um conjunto de dados onde o “espectro” de variação é muitas vezes “subjetivo”, ou seja, dados que, pela sua própria natureza, admitem termos de transição e que podem ser ponderados. Desta forma, a lógica Fuzzy tem-se mostrado mais eficaz para lidar com estas imprecisões, uma vez que captura dados vagos, oriundos de uma linguagem natural e os transforma em dados numéricos, matematicamente analisáveis [57].

A arquitetura aplicada no desenvolvimento e análise do índice de sustentabilidade energética está representada na FIG. 32 abaixo:

FIGURA 32: Arquitetura aplicada na base de indicadores selecionados

A estruturação desta arquitetura foi estabelecida através do software matemático MATLAB/ *Fuzzy Logic Toolbox*. A versão utilizada foi a 8.0 fornecida pela Universidade de São Paulo aos alunos de graduação e pós-graduação. O *Fuzzy Logic Toolbox* do MATLAB oferece duas opções: o Método de Mamdani e o Método de Sugeno. No sistema de inferência foi utilizado o método Mamdani e de defuzzificação o método de gravidade (*centroid*).

6.7.1 Etapas na Arquitetura Fuzzy do Índice de Sustentabilidade Energética (ISE)

O módulo de fuzzificação é o que modela matematicamente a informação das variáveis de entrada por meio de conjuntos fuzzy. É neste módulo que se mostra a grande importância do especialista do processo a ser analisado, pois a cada variável de entrada

devem ser atribuídos termos lingüísticos que representam os estados desta variável e, a cada termo lingüístico, deve ser associado um conjunto fuzzy por uma função de pertinência.

Como exemplo da aplicação da técnica, foi extraído uma parte do modelo completo, considerando os indicadores de desenvolvimento social, de acordo com a FIG. 33 abaixo e apresentado passo a passo de acordo com as saídas do MATLAB a seguir.

FIGURA 33: Parte da Arquitetura aplicada na base de indicadores selecionados

As FIG. 34 e 35 apresentam o modo de fuzzificação do MATLAB e a função de pertinência respectivamente.

FIGURA 34: Módulo de fuzzificação

FIGURA 35: Função de pertinência

O módulo da base de regras é o que constitui o núcleo do sistema. É neste módulo onde “se guardam” as variáveis e suas classificações lingüísticas. A FIG. 36 apresenta as regras previamente estabelecidas no MATLAB.

FIGURA 36: Conjunto de regras estabelecidas no MATLAB

Este conjunto de regras foi estabelecido de acordo com um conjunto de conhecimentos previamente definidos através de uma combinação probabilística de todos os indicadores e seus estados. Para cada um dos estados ou combinações (Fraco – Fr; Médio – M e Forte – Fo) foi associado um valor lingüístico, neste caso: Péssimo, Ruim, Médio, Bom e Ótimo. O intervalo de variação para cada um dos valores lingüísticos associados foi obtido, através de uma média aritmética ponderada simples, onde foram dados valores numéricos para cada estado conforme a TAB. 10.

TABELA 10: Critérios adotados para o estabelecimento dos estados

Intervalo	Estado	Total de observações (Acumulado)
1,00 -- 1,33	Péssimo	33%
1,33 -- 1,67	Ruim	44%
1,67 -- 2,0	Médio	56%
2,33 -- 2,67	Bom	78%
2,67 -- 3,00	Ótimo	> 89%

O resultado final do conjunto de regras associados às variáveis lingüísticas é apresentado na TAB. 11.

TABELA 11: Conjunto de Regras Fuzzy Utilizadas

	IF	AND	AND	Then KNOW is
	IDA 1	IDA 2	IDA 3	
1	Fr	Fr	Fr	Péssimo
2	Fr	Fr	M	Ruim
3	Fr	Fr	Fo	Médio
4	Fr	M	Fr	Ruim
5	Fr	Fo	Fr	Médio
6	Fr	M	Fo	Médio
7	Fr	Fo	M	Médio
8	Fr	Fo	Fo	Bom
9	Fr	M	M	Médio
10	M	M	M	Médio
11	M	M	Fr	Médio
12	M	M	Fo	Bom
13	M	Fr	M	Médio
14	M	Fo	M	Bom
15	M	Fr	Fo	Médio
16	M	Fo	Fr	Médio
17	M	Fo	Fo	Ótimo
18	M	Fr	Fr	Médio
19	Fo	Fo	Fo	Ótimo
20	Fo	Fo	Fr	Bom
21	Fo	Fo	M	Ótimo
22	Fo	Fr	Fo	Bom
23	Fo	M	Fo	Ótimo
24	Fo	Fr	M	Médio
25	Fo	M	Fr	Médio
26	Fo	M	M	Bom
27	Fo	Fr	Fr	Médio

O Módulo de inferência: é onde se definem quais são os conectivos lógicos usados para estabelecer a relação fuzzy que modela a base de regras. É deste módulo que depende o sucesso do sistema fuzzy já que ele fornecerá a saída (controle) fuzzy a ser adotado pelo controlador a partir de cada entrada fuzzy. A FIG. 37 apresenta o módulo de inferência na forma gráfica de acordo com as funções de pertinência estabelecidas.

FIGURA 37: Representação gráfica do módulo de inferência no MATLAB

Finalmente o módulo de defuzzificação é que irá traduzir o estado da variável de saída fuzzy para um valor numérico, no caso deste trabalho será uma saída compreendida no intervalo $[0,1]$.

7. RESULTADOS

A construção da arquitetura fuzzy na elaboração de um índice de sustentabilidade energética utilizou-se de três dimensões da sustentabilidade: a dimensão econômica, a dimensão social e a dimensão ambiental. Em seguida, foi aplicada a base de regras (base de conhecimentos de primeira ordem e de segunda ordem) em duas etapas do processo. A primeira etapa agregou todos os 12 indicadores selecionados que compõe cada dimensão, gerando assim um indicador de sustentabilidade energética para cada dimensão (FIG. 32), chamados de IDS – Indicador da Dimensão Social, IDA – Indicador da Dimensão Ambiental, IDE – Indicador da Dimensão Econômica.

A TAB. 12 apresenta os índices já obtidos com a aplicação da base de regras desenvolvida (base de conhecimentos de primeira ordem). Em seguida foi aplicado novamente um conjunto de regras (base de conhecimentos de segunda ordem) obtendo-se o ISE – Índice de Sustentabilidade Energética TAB. 12, que procura analisar a sustentabilidade do ponto de vista energético. Em resumo, a construção deste índice de sustentabilidade energética foi construída em duas etapas, aplicando-se duas bases de regras:

- uma base de regras de primeira ordem aplicada em cada um dos grupos de indicadores correspondentes a cada uma das dimensões, criando assim três indicadores primários – IDS, IDA e IDE e;
- uma base de regras de segunda ordem aplicada nos três indicadores primários obtidos através da primeira etapa, obtendo-se assim o índice de sustentabilidade energética (ISE).

TABELA 12: Indicadores de sustentabilidade separados por dimensões e Indicador de Sustentabilidade Energética

Ano	IDS	IDA	IDE	ISE
1996	0.500	0.455	0.847	0,7
1997	0.500	0.477	0.636	0,602
1998	0.500	0.619	0.561	0,563
1999	0.580	0.805	0.574	0,631
2000	0.796	0.829	0.559	0,739
2001	0.805	0.840	0.534	0,723
2002	0.731	0.890	0.586	0,755
2003	0.749	0.888	0.689	0,865
2004	0.770	0.894	0.700	0,894
2005	0.783	0.890	0.782	0,894
2006	0.782	0.891	0.780	0,872
2007	0.721	0.894	0.831	0,862

O Índice de Sustentabilidade Energética (ISE) foi estabelecido para ser um número compreendido entre zero e um, onde quanto mais próximo de zero, menor será a sustentabilidade energética da região analisada e quanto mais próxima de um, melhor será a sustentabilidade energética.

Este índice foi assim construído assemelhando-se ao IDH – Índice de Desenvolvimento Humano, ficando mais fácil estabelecer comparações e análises, já que ambos os índices são números compreendidos entre zero e um.

7.1 Análise dos resultados

Parte do resultado final deste trabalho é a obtenção de um gráfico que analisa a sustentabilidade energética e sua evolução ao longo do tempo (FIG. 38):

FIGURA 38: Indicador de Sustentabilidade Energética (ISE)

Pode-se observar que o indicador de sustentabilidade energética sofreu uma evolução positiva ao longo do tempo, indicando melhorias nos indicadores analisados, porém sofreu uma queda significativa no ano de 2007. Isto pode indicar uma piora em um dos grupos de indicadores utilizados, neste caso IDS, IDA e IDE.

Uma análise dos indicadores que compõem o ISE – Índice de Sustentabilidade Energética (FIG. 39) permite observar que o Índice de Desenvolvimento Social apresentou uma piora no ano de 2007, e neste caso contribuiu para a piora o ISE.

No presente trabalho todos os indicadores utilizados apresentaram o mesmo peso na composição do índice final. Porém a ferramenta lógica fuzzy permite que você atribua critérios (pesos) de acordo com o conhecimento do especialista, permitindo uma aproximação maior com a realidade analisada em estudo. Assim o estabelecimento de pesos permite atenuar ou acentuar um indicador em relação a outros.

FIGURA 39: Indicadores que compõe o Índice de Sustentabilidade Energética

A ferramenta desenvolvida permite que se analisem individualmente cada um dos indicadores e uma vez analisada a base de regras estabelecerem uma relação de causa e efeito.

Uma análise das correlações feitas entre os indicadores observa-se que muitos deles apresentam uma alta associação linear, principalmente entre os indicadores dos mesmos grupos e por outro lado uma associação linear média entre os grupos. Isto não quer dizer que não haja algum tipo de associação, apenas que o comportamento não é linear e neste caso, a aplicação de técnicas estatísticas mais avançadas faz-se necessário, porém, com o custo adicional de aumento de capacidade computacional e do

estabelecimento de pressupostos na elaboração de modelos. Pressupostos estes, que muitas vezes em função do rigor matemático, sacrificam informações.

TABELA 13: Matriz de correlação dos Indicadores de Sustentabilidade Energética

	IDS 1	IDS 2	IDS 3	IDA 1	IDA 2	IDA 3	IDE 1	IDE 2	IDE 3	IDE 4	IDE 5	IDE 6	ISE
IDS 1	1,00												
IDS 2	-0,51	1,00											
IDS 3	-0,94	0,73	1,00										
IDA 1	-0,98	0,56	0,96	1,00									
IDA 2	-0,99	0,39	0,90	0,97	1,00								
IDA 3	0,28	-0,67	-0,45	-0,39	-0,25	1,00							
IDE 1	-0,94	0,28	0,85	0,94	0,96	-0,12	1,00						
IDE 2	0,02	0,36	0,05	0,06	-0,04	-0,78	-0,20	1,00					
IDE 3	0,17	-0,61	-0,26	-0,11	-0,10	0,47	0,15	-0,47	1,00				
IDE 4	-0,94	0,69	0,95	0,96	0,90	-0,52	0,84	0,19	-0,27	1,00			
IDE 5	-0,99	0,59	0,98	0,99	0,97	-0,38	0,93	0,02	-0,17	0,96	1,00		
IDE 6	-0,94	0,43	0,89	0,98	0,95	-0,38	0,95	0,10	0,03	0,92	0,95	1,00	
ISE	-0,61	0,74	0,70	0,55	0,52	-0,17	0,42	-0,16	-0,58	0,63	0,61	0,38	1,00

Ferramenta de análise baseadas em lógica fuzzy, como a que foi desenvolvida no presente trabalho, permitem captar estas não linearidades através do conhecimento obtido de um especialista e das variáveis lingüísticas que permitem construir a base de conhecimento da arquitetura fuzzy.

Considerando-se que o atual sistema de desenvolvimento econômico é considerado insustentável a longo prazo, e também que a implantação de um modelo desenvolvimentista representará uma mudança significativa nos padrões de produção e consumo da humanidade, é imperativo que tenhamos ferramentas eficientes na determinação dos caminhos do desenvolvimento sustentável.

O relatório *“Iluminando o caminho: em direção a um futuro de energia sustentável”*, afirma a necessidade de se acelerar as pesquisas científicas e tecnológicas na busca de uma matriz energética mais limpa e com menos impactos no meio ambiente. Fazer esta transição é um dos desafios da humanidade ao longo do século XXI.

A idéia de sustentabilidade energética engloba não apenas assegurar o acesso aos serviços básicos energéticos a todos, mas também, evitar o aquecimento do planeta como a emissão de gases do efeito estufa e o menor impacto possível ao meio ambiente.

Pegando apenas duas dimensões do desafio da transição energética – a segurança energética e a mudança climática – as previsões mais recentes da Agência Internacional de Energia sugerem que se as coisas continuarem como estão (cenário de referência), o aumento no consumo mundial de energia entre 2005 e 2030 será de 50%.

Os combustíveis fósseis serão responsáveis por 84% desse aumento, e as emissões de dióxido de carbono (CO₂) aumentarão em 57% até 2030.

Desta forma, a elaboração de um indicador de sustentabilidade energética que englobe todas as dimensões e que seja de reconhecimento universal é um desafio grande e que deve prover um alerta (indicador antecedente) para os tomadores de decisão.

8. CONCLUSÕES

O problema efetivo de mensurar a sustentabilidade energética e por consequência a própria sustentabilidade em seu conceito mais amplo está relacionado à utilização de uma ferramenta que capture toda a complexidade do desenvolvimento, sem reduzir a significância de cada um dos indicadores utilizados na análise. Neste caso, a multidimensionalidade do conceito e dos próprios indicadores utilizados, remete à uma definição que a exemplo, Max Weber, filósofo e economista, denominava “tipo ideal”, ou seja, cada uma das dimensões auxilia na construção de um conceito, mas não o define isoladamente.

Ao final deste estudo foi construído um índice sintético do desenvolvimento sustentável energético para o Brasil, utilizando-se de uma nova ferramenta de análise e agregação de dados – a lógica fuzzy. Este índice permite ajudar no planejamento energético de qualquer país. Basta, portanto, escolher quais os indicadores que melhor reflitam as vantagens energéticas de cada país estudado. No entanto, a escolha dos indicadores estabelecidos na presente dissertação, foram amplos e ao mesmo tempo básicos para a construção de um indicador de sustentabilidade energética em qualquer país, permitindo assim estabelecer comparações.

Sendo assim, a Lógica Fuzzy mostrou-se uma boa escolha como metodologia empregada na presente dissertação, apresentando resultados satisfatórios no desenvolvimento de um hipotético índice de sustentabilidade energética e posteriormente a análise de sua evolução temporal, conforme apresentado na FIG. 38. Já a FIG. 39 nos permitiu uma análise retroativa da composição dos indicadores individualmente considerando as dimensões social, ambiental e econômica que constituem a base da teoria da sustentabilidade.

A concepção do índice (ISE) permite também uma análise comparativa regional desde que preservada a metodologia de escolha dos indicadores envolvidos.

Como benefício desta metodologia na presente aplicação, destaca-se o recurso de inclusão e/ou exclusão de variáveis assim como novos conjuntos de regras, ou até mesmo a inclusão de uma nova dimensão como exemplo, a Dimensão Institucional enriquecendo a análise dos resultados obtidos.

A principal contribuição deste trabalho consiste na condensação e correlação de informações complexas preservando a origem dos dados, traduzindo em resultados de fácil interpretação, constituindo uma valiosa ferramenta para tomada de decisão em questões de avaliação e monitoramento de políticas voltadas ao desenvolvimento sustentável nesse caso particular a sustentabilidade energética.

Cabe por fim destacar, que a solução apresentada não é a única possível. Como foi apresentado, o próprio conceito de desenvolvimento sustentável, ainda não se constitui em uma definição bem clara e delimitada. É mais um conceito, com forte conteúdo, quase que “utópico”, para um caminho que a sociedade deve trilhar que contempla a justiça social, a solidariedade para com as gerações futuras e a preservação e equilíbrio ambiental, dentro de um conceito amplo de desenvolvimento econômico.

Todavia, enxergar o desenvolvimento apenas como um processo de satisfação de necessidades restringe muito a dimensão do problema. A questão do desenvolvimento sustentável está relacionada com a possibilidade de que as gerações que estão por vir continuem o processo de expansão das liberdades (SEN, 2004). De um lado, a base material que possibilita o desenvolvimento não pode ser depredada de maneira insensata. Por outro lado, a liberdade das gerações futuras usufruírem de um meio ambiente saudável pode não ter nenhuma relação com as necessidades ou mesmo com o padrão de vida das sociedades.

Se o processo de expansão das liberdades humanas exige expansão da produção econômica, a expressão “desenvolvimento sustentável” é por si mesma contraditória, uma vez que a própria criação de valor econômico na atual sociedade leva a processos irreversíveis de degradação ambiental.

Sendo assim, a construção de ferramentas que avaliem a sustentabilidade sob qualquer ponto de vista, devem ser flexíveis, ao ponto de incorporar novos conceitos e novos indicadores, sem, no entanto perder suas características. Outro ponto importante na elaboração de novas ferramentas é inclusão cada vez maior de variáveis qualitativas e não só quantitativas.

O conceito de desenvolvimento sustentável não está só relacionado à variáveis quantitativas; a dimensão social e institucional (esta não foi abordada na presente dissertação), são bons exemplos, para associar mais variáveis qualitativas do que quantitativas. A utilização de ferramentas que incorporem dados qualitativos sem

comprometer as vantagens da utilização de indicadores quantitativos já é um grande desafio em si. Porém, acreditamos que novamente a aplicação das técnicas de lógica fuzzy permite uma grande vantagem neste campo de agregação entre variáveis quantitativas e qualitativas, já que a base de regras estabelecidas vem do conhecimento de especialistas e por sua vez é modelado através de variáveis lingüísticas.

8.1 Recomendações para trabalhos futuros

Como recomendações para trabalhos futuros, baseado nas considerações apresentadas na presente dissertação, podem-se estabelecer os seguintes tópicos:

- I. A incorporação da dimensão institucional como quarta dimensão na avaliação da sustentabilidade energética;
- II. A avaliação de impactos institucionais no ISE ao longo do tempo e do espaço;
- III. A elaboração do ISE para vários países e estabelecer comparações, procurando analisar quais os caminhos mais viáveis para cada um dos países analisados;
- IV. E o estabelecimento de uma base de regras ampla e totalmente validada que esteja alinhada com as quatro dimensões (econômica, social, ambiental e institucional), baseada em conhecimentos bem estabelecidos, determinando pesos para cada um dos indicadores selecionados. Isto permitirá verificar as conexões existente entre as dimensões e o grau de sustentabilidade de um sistema, avaliado através da lógica fuzzy.
- V. E por fim, pode-se estabelecer a construção de ISE setorial, levando em conta a demanda energética e o peso de cada setor na economia como um todo.

ANEXO I – BASE DE DADOS “IN NATURA”

	IDS 1	IDS 2	IDS 3	IDA 1	IDA 2	IDA 3	IDE 1	IDE 2	IDE 3	IDE 4	IDE 5	IDE 6
1970	0.361	0.011	47.5	66,945	27,858		3.87	0.218	18.8	22,076	22,549	14,042
1971	0.365	0.017	50.3	70,296	30,723		4.20	0.206	19.9	22,254	23,933	15,327
1972	0.364	0.016	54.1	75,309	34,192		4.58	0.197	20.3	22,441	25,622	17,280
1973	0.372	0.020	57.8	82,157	40,355		5.09	0.189	20.4	22,354	28,206	20,171
1974	0.341	0.019	59.2	87,810	44,619		5.38	0.187	21.8	22,317	29,923	22,067
1975	0.360	0.016	61.3	91,386	47,490		5.52	0.185	23.3	22,049	31,170	23,455
1976	0.377	0.016	63.9	96,138	52,018		5.95	0.176	22.4	21,937	34,145	25,258
1977	0.375	0.020	65.2	99,653	53,978		6.09	0.174	21.3	21,413	37,000	24,915
1978	0.396	0.019	66.4	105,565	59,240		6.25	0.176	22.3	20,820	38,387	27,031
1979	0.407	0.016	67.0	112,363	62,981		6.51	0.175	23.4	20,985	40,881	28,630
1980	0.411	0.020	68.5	114,761	62,387		6.95	0.164	23.6	20,957	43,244	27,509
1981	0.416	0.019	70.0	110,076	57,642		6.50	0.164	24.3	20,721	39,933	27,574
1982	0.409	0.016	71.5	112,124	58,337		6.40	0.166	23.0	19,454	40,724	28,359
1983	0.404	0.020	74.1	115,386	56,408		6.07	0.176	19.9	18,867	41,662	27,416
1984	0.411	0.019	75.2	123,343	58,276		6.26	0.178	18.9	19,170	44,732	27,778
1985	0.402	0.016	77.4	131,006	63,123		6.60	0.176	18.0	18,546	47,034	29,449
1986	0.412	0.016	78.5	136,957	67,712		6.95	0.171	20.0	17,916	49,445	33,428
1987	0.399	0.020	80.3	142,677	70,037		7.05	0.172	23.2	18,850	52,184	33,127
1988	0.384	0.019	83.7	144,438	71,594		6.91	0.174	24.3	18,706	53,299	33,655
1989	0.364	0.017	84.9	146,811	73,018		6.99	0.171	26.9	18,510	53,206	35,470
1990	0.386	0.016	86.5	142,000	72,298		6.57	0.173	20.7	18,048	49,550	35,900
1991	0.402	0.020	86.9	144,926	74,894		6.53	0.175	18.1	18,337	50,592	37,399
1992	0.417	0.019	90.3	145,929	76,488		6.39	0.177	18.4	18,568	51,530	37,629
1993	0.396	0.016	90.3	149,700	79,153		6.58	0.174	19.3	17,897	53,989	38,981
1994	0.398	0.011	90.7	157,442	83,215		6.83	0.173	20.7	17,879	56,959	40,917
1995	0.399	0.016	91.2	162,975	89,105		7.02	0.172	18.3	18,092	58,540	44,786
1996	0.398	0.016	91.7	171,771	96,825	685	7.06	0.177	16.9	18,657	60,938	48,472
1997	0.398	0.016	91.9	180,683	102,893	446	7.19	0.180	17.4	19,175	63,569	50,904
1998	0.400	0.023	92.3	185,578	107,137	362	7.08	0.185	17.0	19,797	64,914	53,196
1999	0.406	0.034	92.7	189,233	109,275	313	7.00	0.188	15.7	20,291	67,342	52,507
2000	0.405	0.037	93.1	190,615	112,376	416	7.19	0.182	16.8	20,688	68,526	52,353
2001	0.404	0.041	93.7	193,927	117,655	391	7.18	0.183	17.0	20,149	69,250	52,583
2002	0.411	0.043	94.1	198,737	116,880	323	7.27	0.182	16.4	20,681	73,185	54,098
2003	0.417	0.047	94.6	201,934	113,728	302	7.25	0.183	15.3	20,902	76,519	53,154
2004	0.428	0.047	94.8	213,744	120,103	377	7.56	0.184	16.1	21,357	80,493	56,656
2005	0.431	0.043	95.0	218,663	121,350	385	7.70	0.182	15.9	21,827	81,855	57,911
2006	0.437	0.036	95.5	226,344	124,464	392	7.92	0.182	16.4	22,090	85,308	58,901
2007	0.444	0.033	95.9	238,758	129,102	397	8.30	0.182	17.4	22,271	90,977	63,556

Indicadores	
IDS 1	Desigualdade de Renda
IDS 2	Fração da renda disponível gasta com consumo de energia
IDS 3	Percentual de domicílios sem acesso a fontes de energia modernas
IDA 1	Oferta Interna de Energia (Renovável) tep
IDA 2	Oferta Interna de Energia (Não Renovável) tep
IDA 3	Emissões de GHG (Gases do Efeito Estufa) (Mt/ CO2 eq)
IDE 1	PIB Per capita (preços 2008) - US\$ de 2008(mil) - IPEA
IDE 2	Intensidade Energética Total (tep/10 ³ US\$) - OIE/PIB
IDE 3	Taxa de Investimento (% PIB) - (a preços correntes)
IDE 4	Consumo Final Residencial de Energia (tep)
IDE 5	Consumo Final de Energia Indústria + Agropecuário (tep)
IDE 6	Consumo Final de Energia Comércio + Transportes (tep)

ANEXO II – BASE DE DADOS NORMALIZADA PELO MÁXIMO - MÍNIMO

	IDS 1	IDS 2	IDS 3	IDA 1	IDA 2	IDA 3	IDE 1	IDE 2	IDE 3	IDE 4	IDE 5	IDE 6
1970	0.194	0.002	0.000	0.000	0.000		0.000	1.000	0.307	0.920	0.000	0.000
1971	0.233	0.169	0.058	0.020	0.028		0.074	0.773	0.400	0.959	0.020	0.026
1972	0.223	0.139	0.136	0.049	0.063		0.161	0.612	0.436	1.000	0.045	0.065
1973	0.301	0.238	0.213	0.089	0.123		0.277	0.458	0.439	0.981	0.083	0.124
1974	0.000	0.204	0.242	0.121	0.166		0.340	0.418	0.567	0.973	0.108	0.162
1975	0.185	0.131	0.285	0.142	0.194		0.373	0.382	0.695	0.914	0.126	0.190
1976	0.352	0.139	0.339	0.170	0.239		0.468	0.227	0.616	0.890	0.169	0.227
1977	0.334	0.238	0.366	0.190	0.258		0.502	0.188	0.524	0.775	0.211	0.220
1978	0.535	0.204	0.390	0.225	0.310		0.536	0.217	0.603	0.645	0.231	0.262
1979	0.640	0.131	0.403	0.264	0.347		0.597	0.207	0.698	0.681	0.268	0.295
1980	0.683	0.238	0.434	0.278	0.341		0.694	0.000	0.715	0.675	0.302	0.272
1981	0.727	0.204	0.465	0.251	0.294		0.593	0.004	0.780	0.623	0.254	0.273
1982	0.656	0.131	0.496	0.263	0.301		0.571	0.036	0.665	0.345	0.266	0.289
1983	0.612	0.238	0.550	0.282	0.282		0.497	0.218	0.402	0.217	0.279	0.270
1984	0.676	0.204	0.572	0.328	0.300		0.538	0.264	0.313	0.283	0.324	0.277
1985	0.596	0.131	0.618	0.373	0.348		0.616	0.215	0.236	0.146	0.358	0.311
1986	0.689	0.139	0.640	0.407	0.394		0.694	0.127	0.409	0.008	0.393	0.392
1987	0.568	0.238	0.678	0.441	0.417		0.717	0.147	0.681	0.213	0.433	0.385
1988	0.414	0.204	0.748	0.451	0.432		0.685	0.187	0.781	0.181	0.449	0.396
1989	0.228	0.169	0.773	0.465	0.446		0.704	0.140	1.000	0.138	0.448	0.433
1990	0.438	0.139	0.806	0.437	0.439		0.609	0.175	0.465	0.037	0.395	0.441
1991	0.591	0.238	0.814	0.454	0.465		0.599	0.207	0.244	0.101	0.410	0.472
1992	0.743	0.204	0.884	0.460	0.480		0.569	0.245	0.272	0.151	0.424	0.476
1993	0.530	0.131	0.884	0.482	0.507		0.612	0.181	0.346	0.004	0.459	0.504
1994	0.549	0.000	0.893	0.527	0.547		0.667	0.175	0.472	0.000	0.503	0.543
1995	0.568	0.123	0.903	0.559	0.605		0.710	0.148	0.263	0.047	0.526	0.621
1996	0.553	0.122	0.913	0.610	0.681	1.000	0.720	0.248	0.137	0.171	0.561	0.695
1997	0.553	0.131	0.917	0.662	0.741	0.376	0.749	0.306	0.181	0.284	0.599	0.744
1998	0.572	0.332	0.926	0.690	0.783	0.157	0.725	0.394	0.146	0.420	0.619	0.791
1999	0.632	0.624	0.934	0.712	0.804	0.029	0.705	0.452	0.033	0.529	0.655	0.777
2000	0.621	0.717	0.942	0.720	0.835	0.298	0.749	0.334	0.131	0.616	0.672	0.774
2001	0.611	0.839	0.955	0.739	0.887	0.232	0.746	0.348	0.151	0.498	0.682	0.778
2002	0.677	0.896	0.963	0.767	0.879	0.055	0.766	0.342	0.096	0.614	0.740	0.809
2003	0.738	0.988	0.973	0.786	0.848	0.000	0.762	0.357	0.000	0.663	0.789	0.790
2004	0.841	1.000	0.977	0.854	0.911	0.196	0.833	0.362	0.071	0.762	0.847	0.861
2005	0.870	0.881	0.981	0.883	0.923	0.217	0.865	0.334	0.057	0.865	0.867	0.886
2006	0.933	0.699	0.992	0.928	0.954	0.235	0.912	0.326	0.099	0.923	0.917	0.906
2007	1.000	0.616	1.000	1.000	1.000	0.248	1.000	0.328	0.183	0.963	1.000	1.000

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BRUNDTLAND, Gro Harlem. *Nosso Futuro Comum*. Editorta da FGV, 1987. “*Our Common Future*”, Oxford: Oxford university Press,1987.
- [2] AYRES, A.. DAVIS, J., MEADOWS D., “*The Limits to Growth*”, Ecological Economics, Elsevier Science, UK, 2001.
- [3] SACHS, Ignacy. *Caminhos para o Desenvolvimento Sustentável*. Rio de Janeiro: Garamond 2004.
- [4] Ministério do Meio Ambiente, Agenda 21, 2003, disponível em: <http://www.mma.gov.br/agenda21>
- [5] IPEA -Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2001, Séries de Indicadores. www.ipea.gov.br.
- [6] CMMAD - *Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento: Nosso Futuro Comum*, Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro,1998.
- [7] IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, www.ibge.gov.br
- [8] VEIGA, José Eli – *Como monitorar o desenvolvimento sustentável – A resposta da Comissão Stiglitz-Sem-Fitoussi* (CMEPSP) de Junho de 2009.
- [9] IAEA, 2005. *Indicators of Sustainable Development: Guidelines and Methodologies*, 2nd. Edition, September. New York, NY, USA: United Nations Department do Economic and Social Affairs.
- [10] *Energy Indicators for Sustainable Development: Country Studies on Brazil, Cuba, Lithuania, Mexico, Russian Federation, Slovakia and Thailand*, 2007 (acessado em http://www.un.org/esa/dsd/resources/res_publsdt_ene_ind_07.shtml).
- [11] AFONSO, Cintia Maria – *Sustentabilidade: Caminho ou Utopia?*, São Paulo: Annablume, 2006.
- [12] IISD (*International Institute for Sustainable Development*) – *Assessing Sustainable Development: Principles in Practice*, Acessado em 05/12/2009 em <http://www.iisd.org/measure/principles/progress/bellagio.asp>.
- [13] MEADOWS, Dornella H. at. al. – *Limites do Crescimento: a atualização de 30 anos*. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2007.
- [14] BRASIL. Lei Federal no. 6.938, de 31 de agosto de 1981. In: MILARÉ, E. *Legislação Ambiental no Brasil*. SP, APMP, 1991. P. 144.

- [15] IUCN (*International Union for Conservation of Nature*) – *World Conservation Strategy: living resource conservation for sustainable development*. Acessado em janeiro de 2010 em: <http://data.iucn.org/dbtw-wpd/edocs/WCS-004.pdf>.
- [16] SACHS, Ignacy. – *Estratégias de transição para o século XXI: desenvolvimento e meio ambiente*. São Paulo: Studio Nobel e FUNDAP, 1993.
- [17] FILHO, João Lopes Alves. – *Matriz Energética Brasileira: da crise a grande esperança*. São Paulo: Mauad, 2003.
- [18] FAURCHAUX, S.; NÖEL, JEAN-FRANÇOIS. *Economia dos Recursos Naturais e do Meio Ambiente*. Portugal: Instituto Piaget, 1995.
- [19] VAN BELLEN, Hans Michael. *Indicadores de sustentabilidade: uma análise comparativa*. Rio de Janeiro: Editora FGV, 2005.
- [20] PARRINGS, C. – *Reserved Rationality and Precautionary Principle: Technological Change, Time and Uncertainty in Environmental Decision Making*. Ecological Economics: The Science of Management of Sustainability. New York, Columbia University Press, 1991.
- [21] BRUE, Stanley L. - *História do Pensamento Econômico*. São Paulo: Thomson Pioneira, 2004.
- [22] BENNETTI, Luciana Borba. *Avaliação do Índice de Desenvolvimento Sustentável (IDS) do Município de Lages/SC através do Método de Painel de Sustentabilidade*. Tese de doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.
- [23] ROEGEN, Nicholas Georgescu. *The Entropy Law and Economic Process*. London, Harvard University Press, 1999.
- [24] CECHIN, André D. *Georgescu Roegen e o desenvolvimento sustentável: diálogo ou anátema?* Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-graduação em Ciência Ambiental (Procam), Universidade de São Paulo, 2008.
- [25] SEN, Amartya K.. *Desenvolvimento como liberdade*. São Paulo: Cia. das Letras, 2000.
- [26] ALIER, Joan Martínez. *O Ecologismo dos Pobres*. São Paulo: Contexto, 2007.
- [27] SACHS, Ignacy. *Rumo a Ecosocioeconomia*. São Paulo: Cortez, 2007.
- [28] SCANDAR NETO, Wadih J. *Síntese que organiza o olhar: uma proposta para a construção e representação de indicadores de desenvolvimento sustentável e sua aplicação para os municípios fluminenses*. Dissertação de Mestrado – Escola Nacional de Ciências Estatísticas. Rio de Janeiro, 2006.

- [29] CSD - *Commission on Sustainable Development. Status Report on the Implementation of the CSD Work Programme on Indicators of Sustainable Development*. New York: United Nations, 1998.
- [30] LOUETTE, Anne (organizadora). *Compêndio de Indicadores de Sustentabilidade de Nações: uma Contribuição ao Diálogo da Sustentabilidade*. São Paulo: WHH – Willis Harman House, 2007.
- [31] GAMA, Margarida do Carmo F. Pereira. *Medidas de Bem-estar e Sustentabilidade: Desenvolvimento de Metodologias de Análise e Seleção de Métricas*. Dissertação de Mestrado – Universidade de Lisboa, 2010.
- [32] GOOSSENS, Y., Mäkipää, A., Schepelmann, P., & Sand, I. *Alternative progress indicators to Gross Domestic Product (GDP) as a means towards sustainable development. Beyond GDP*. Bruxelas: disponível em <http://www.beyond-gdp.eu/> (Estudo do Parlamento Europeu), 2007.
- [33] COLLEN, B., Goldfinger, S., Kalter, R., McRae, L., Kitzes, J., Wackernagel, M., et al.. *2010 And Beyond - Rising to the biodiversity challenge*. Gland, Suíça: WWF, 2008.
- [34] CIMA, Fernando Monteiro. *Utilização de Indicadores Energéticos no Planeamento Energético Integrado*. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.
- [35] RIPPEL, Ricardo. et al. *Apontamentos sobre a população, o consumo de energia e a conservação dos recursos naturais*. Campo Grande: Temas & Matizes no. 16 (PP 155-171), 2º. Semestre, 2009.
- [36] GOLDEMBERG, J. *Energia para o desenvolvimento*. São Paulo: T.A. Queiroz, 1988.
- [37] CARVALHO, J. & GOLDEMBERG J. *O Desafio do planeamento energético*. 2ª ed. Porto Alegre: Mercado Aberto, 1987.
- [38] GOLDEMBERG, J. ; LUCON, Oswaldo. *Energia, Meio Ambiente e Desenvolvimento*. São Paulo: Editora da USP, 2008.
- [37] HAMMOND, A.; ADRIAANSE, A.; RODENBURG, E.; BRYANT, D.; WOODWARD, R. *Environmental Indicators: A systematic approach to measuring and reporting on environmental policy performance in the context of sustainable development*. Washington, DC.: World Resources Institut, 1995.
- [38] Agência Portuguesa para o Meio Ambiente, *Proposta para um Sistema de Indicadores de Desenvolvimento Sustentável*, acessado em: <http://www.apambiente.pt>.

- [39] Environmental Performance Reviews: Luxembourg (2010). Acessado em: http://www.oecd.org/document/45/0,3343,en_2649_34307_44792621_1_1_1_37465,00.html
- [40] Generic Ecological Assessment Endpoints (GEAE) for Ecological Risk Assessment. Acessado em: <http://cfpub.epa.gov/ncea/cfm/recorddisplay.cfm?deid=55131>
- [41] Energia e ambiente na União Europeia, Resumo. Acessado em: http://www.eea.europa.eu/pt/publications/environmental_issue_report_2002_31-sum
- [42] SALTELLI, A. et. al. *Composite indicators - the controversy and the way forward*. Palermo, OECD World Forum on Key Indicators. 2004. 17 p. Disponível em: <<http://www.oecd.org/dataoecd/40/50/33841312.doc>>. Acesso em: mar. 2008.
- [43] CSD - *Indicators for Sustainable Development for Making Decision*. United Nations Department of Economic and Social Affairs: Division for Sustainable Development. Acessado em jan. de 2010. http://www.un.org/esa/dsd/agenda21/res_agenda21_40.shtml.
- [44] CAMARGO, A. L. B. *Desenvolvimento Sustentável: dimensões e desafios*. Campinas: Papirus, 2003.
- [45] IISD (International Institute for Sustainable Development) – *Indicators for Sustainable Development: Theory, Method, Applications*. A report to the Balaton Group. Canada: Hartmut Bossel, 1999.
- [46] OLEJ, Vladimir; OBRŠÁLOVÁ, Ilona, et al. *Modeling of Selected Areas of Sustainable Development by Artificial Intelligence and Soft Computing – Regional Level*, Czech Republic, 2009.
- [47] Balanço Energético Nacional (BEN), acesso em: <http://www.epe.gov.br/Estudos/Paginas/default.aspx?CategorialD=347>
- [48] IBGE – Pesquisa de Orçamento Familiar. Acessado em: <http://www.ibge.gov.br/home/presidencia/noticias/19052004pof2002html.shtm>
- [49] BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Banco de Informações de Geração*. Disponível em <www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=15&idPerfil=2>. Acessado em novembro de 2009.
- [50] BRASIL. MME- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. *Plano decenal de expansão de energia elétrica: 2006- 2015*. Colaboração EPE- Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME: EPE, 2006.

- [51] BRASIL. COPPE/MCT – Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa em Engenharia/Ministério da Ciência e Tecnologia. *Emissões de dióxido de carbono e de metano pelos reservatórios hidrelétricos brasileiros*. Rio de Janeiro: COPPE/MCT, 2006.
- [52] ESPARTA, Adelino. *Redução de emissão de gases de efeito estufa no setor elétrico brasileiro: a experiência do mecanismo de desenvolvimento limpo do Protocolo de Quioto e uma visão futura*. Tese apresentada ao Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia – PIPGE – da USP. São Paulo: PIPGE, 2008.
- [53] ZADEH, L. A. *Fuzzy Sets-Information and Control* 8, 338-353 (1965).
- [54] BARROS, Laércio, BASSANEZI, Rodney C. *Tópicos de Lógica Fuzzy e Biomatemática*, IME USP, 2006.
- [55] YEN, J.; Langari, R. *Fuzzy logic:intelligence, control, and information*. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ, USA, 1999.
- [56] D'ÁVVILLA, Santiago. Análise de Riscos Ambientais e Lógica Fuzzy. Scribid, acessado em: <http://www.scribd.com/doc/4809204/Analise-de-Riscos-Ambientais-e-Logica-Fuzzy>. 2009.
- [57] BRENNAN, M. et. al. Sustainability Energy Indicators by means of Fuzzy Logic. IEEE Xplore Digital Library. Acessado em: http://ieeexplore.ieee.org/xpl/freeabs_all.jsp?arnumber=4275467. Abril de 2009.