



INDICADORES DE SUSTENTABILIDADE BASEADOS EM EXERGIA E SUA RELAÇÃO COM GESTÃO AMBIENTAL

Ilê Maria Krahl (Petrobras)

khlbr@petrobras.com.br

Marco Aurélio Cabral Pinto (LATEC UFF)

macp@bndes

O presente trabalho foi desenvolvido tendo-se em vista os conceitos de desenvolvimento sustentável, sustentabilidade e exergia e sua aplicação às questões atuais que envolvem o meio ambiente global. Foi desenvolvida uma abordagem revisional sobre o debate atual em torno dos temas desenvolvimento sustentável, sustentabilidade e exergia, utilizando a base de dados bibliográfica ScienceDirect da Editora Elsevier BV. Foi estabelecido como objetivo para o trabalho a identificação de relações qualitativas ou quantitativas entre exergia e desenvolvimento sustentável e/ou exergia e sustentabilidade. Mais precisamente buscou-se identificar indicadores baseados em exergia e postulados para acompanhamento ou mensuração do desenvolvimento sustentável ou da sustentabilidade. Adicionalmente, buscou-se identificar conexões das metodologias baseadas em exergia com gestão, principalmente com gestão ambiental. A análise da literatura indicou que existe relação qualitativa entre exergia e desenvolvimento sustentável e entre exergia e sustentabilidade de processos e/ou sistemas. Esta relação, embora alvo de debates, não foi ainda quantitativamente especificada. Observou-se, ainda com base na literatura revisada, que existe relação entre exergia e gestão, sendo vários os indicadores propostos que usam exergia como base para a mensuração da sustentabilidade de processos e/ou sistemas. Em particular, verificou-se que existe relação entre exergia e gestão ambiental.

Palavras-chaves: Exergia, sustentabilidade, desenvolvimento sustentável, gestão ambiental

INTRODUÇÃO

A definição popular de desenvolvimento sustentável : “desenvolvimento que atende às necessidades do presente sem comprometer a possibilidade de as gerações futuras atenderem a suas próprias necessidades” foi oriunda da Comissão Brundtland (CMMAD, 1988).

A Eco 92 propagou o desenvolvimento sustentável como a chave para integrar as principais dimensões do desenvolvimento – social, econômica e ambiental – no planejamento e na elaboração de políticas.

O Relatório Brundtland e a ECO 92 (Rio de Janeiro, 1992) indicaram o desenvolvimento sustentável como a solução para fomentar o progresso sócio-econômico, enquanto protege o meio ambiente de suporte à vida, e tiveram o mérito de realçar a interdependência de aspectos sociais, econômicos e ambientais.

A partir daí, as comunidades acadêmicas, industriais, regulatórias, governamentais e de consumidores têm focado sua atenção no conceito de desenvolvimento sustentável.

O papel do setor de energia nas dimensões social, econômica e ambiental é crucial para o desenvolvimento de um país. Recursos energéticos e sua utilização estão intimamente relacionados com desenvolvimento sustentável. Para atingir o desenvolvimento sustentável, o aumento das eficiências energéticas dos processos desempenha um papel central.

Conceitos e métodos de análise termodinâmicos (energia e exergia) têm sido utilizados em uma variedade de disciplinas com interesse em sustentabilidade ambiental, incluindo ecologia, economia e engenharia.

A exergia (ou energia disponível) é uma propriedade termodinâmica de um sistema que tem sido amplamente utilizada por engenheiros para estudar e melhorar a eficiência de processos térmicos e químicos.

A exergia tem sido vista como um componente chave para uma sociedade sustentável, e nos últimos anos a análise exérgica tem sido amplamente utilizada no *design*, simulação e avaliação da performance de sistemas térmicos e termoquímicos.

Exergia é definida como o máximo trabalho que pode ser extraído de um sistema quando este sistema se move em direção ao equilíbrio termodinâmico com um estado de referência. Deste modo, a exergia de uma forma de energia é um tipo de energia livre de entropia que pode ser percebida como uma medida de sua utilidade ou qualidade ou potencial para causar mudança.

Exergia, em contraste com energia, não está sujeita à lei da conservação, exceto para processos reversíveis ou ideais, mas é preferivelmente consumida ou destruída devido às irreversibilidades, inevitáveis dentro de qualquer processo real. De fato, o conceito de exergia deriva de uma combinação das duas primeiras leis da termodinâmica desde que é uma medida da quantidade (Primeira Lei) e da qualidade (Segunda Lei) de diferentes fontes de energia.

A contabilização da exergia é uma metodologia útil que pode prover discernimento sobre o metabolismo de um sistema (materiais, energia e em alguns casos trabalho e capital) e sobre o efeito do sistema no meio ambiente usando um denominador comum. A exergia pode então exercer um papel significativo para o desenvolvimento de políticas em planejamento energético e desenvolvimento sustentável já que ela:

- pode endereçar o impacto da utilização de energia no meio ambiente;
- é ideal para o *design* e análise de sistemas energéticos já que sua metodologia combina a conservação da massa e energia com a Segunda Lei da Termodinâmica;
- quantifica perdas de energia e energia residual de modo que pode prover informações importantes para o uso mais eficiente de recursos.

Central à análise exérgica está o conceito de eficiência exérgica. De modo geral, um aumento na eficiência exérgica de um processo e/ou sistema implica uma queda do impacto ambiental (conversão de exergia com menos perdas) e um aumento na sustentabilidade (o processo se aproxima da reversibilidade) do processo e/ou sistema.

1 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL, SUSTENTABILIDADE E EXERGIA

Na década de 80, à medida que os problemas ambientais, tais como chuva ácida, depleção de ozônio e mudança climática global se tornaram proeminentes, o vínculo entre utilização de energia e o meio ambiente foi reconhecido, (DINCER & ROSEN, 2007).

A produção, transformação, transporte e uso de energia impactam o meio ambiente. Os impactos ambientais estão associados com emissões térmicas, químicas e nucleares, e são uma consequência necessária de processos que beneficiam a humanidade (DINCER & ROSEN, 2007).

A natureza não sustentável das atividades humanas levou à formulação do conceito de desenvolvimento sustentável e a esforços em prol do desenvolvimento de métodos para realizá-lo (DINCER & ROSEN, 2007).

A realização do desenvolvimento sustentável envolve o uso de recursos, particularmente de recursos energéticos. Atingir o desenvolvimento sustentável requer que recursos energéticos sustentáveis sejam utilizados, e que esta utilização seja eficiente (DINCER & ROSEN, 2007).

Porém, além da energia, outros fatores contribuem para alcançar o desenvolvimento sustentável. Por exemplo, para que o desenvolvimento seja sustentável (DINCER & ROSEN, 2007):

- ele precisa satisfazer as necessidades e aspirações da sociedade;
- ele precisa ser ambiental e ecologicamente benigno;
- suficientes recursos (naturais e humanos) devem estar disponíveis.

O segundo ponto reforça a importância de aspectos ambientais no desenvolvimento sustentável. Claramente, atividades que continuamente degradam o meio ambiente não são sustentáveis ao longo do tempo, enquanto aquelas que têm pequeno ou nenhum impacto sobre o meio ambiente são mais propensas a contribuir para o desenvolvimento sustentável (DINCER & ROSEN, 2007).

Métodos exergéticos são importantes já que são úteis para aumentar a eficiência. As relações entre exergia e energia e entre exergia e meio ambiente tornam claro que exergia está diretamente relacionada com desenvolvimento sustentável (DINCER & ROSEN, 2007).

Exergia é um conceito físico que quantifica a utilidade ou valor da energia, material e informação em uma medida que é ao mesmo tempo descritiva e útil. O conteúdo exergético está provavelmente correlacionado mais fortemente com dano ambiental do que a massa. A associação da exergia com valor e potencial de dano sugere que a exergia apresenta um grande potencial como indicador ecológico (GONG & WALL, 2001).

Muitos pesquisadores sugerem que a mitigação do impacto ambiental resultante da utilização de recursos energéticos e o alcance de eficiências de utilização de recursos aumentadas são melhor consideradas pelo uso de exergia (DINCER & ROSEN, 2007).

Desde que o impacto ambiental e a melhoria das eficiências são tópicos críticos no alcance do desenvolvimento sustentável, a exergia também aparece para prover a base para o

desenvolvimento de metodologias que incluem a sustentabilidade (DINCER & ROSEN, 2007).

A exergia de uma forma de energia ou de uma substância é uma medida da sua utilidade ou qualidade ou potencial para causar mudança. Isto sugere que a exergia pode ser ou prover a base para uma medida efetiva do potencial de uma substância ou forma de energia em impactar o meio ambiente (DINCER & ROSEN, 2007).

Dincer (2002) relatou os vínculos existentes entre energia e exergia, exergia e meio ambiente e energia e desenvolvimento sustentável. Ele enumerou os seguintes pontos chave para ressaltar a importância da exergia e de sua utilização:

- (a) a exergia é um instrumento primário para melhor endereçar o impacto da utilização de recursos energéticos no meio ambiente;
- (b) exergia é um método efetivo que utiliza os princípios de conservação da massa e da energia conjuntamente com a Segunda Lei da termodinâmica para o *design* e análise de sistemas energéticos;
- (c) exergia é uma técnica apropriada para perseguir a meta de uso mais eficiente de recursos de energia, já que permite determinar a localização, tipos e verdadeiras magnitudes de resíduos e perdas;
- (d) exergia é uma técnica eficiente em revelar se é ou não possível, e por quanto, projetar sistemas energéticos mais eficientes através da redução das ineficiências nos sistemas existentes;
- (e) exergia é um componente chave para obter o desenvolvimento sustentável;
- (f) exergia tem um papel crucial em atividades de formulação de políticas.

Estas assertivas de Gong & Wall, Dincer e Dincer & Rosen fazem parte de um debate acadêmico em que a relação entre exergia e desenvolvimento sustentável e/ou entre exergia e sustentabilidade é o foco central.

É bem sabido que se tem feito amplamente uso de indicadores de desenvolvimento sustentável (AMARAL, 2003; MARTINS, 2006). Vários conceitos estão relacionados à formulação, seleção e uso de tais indicadores.

O propósito da maioria dos indicadores é indicar se um desenvolvimento está próximo ou afastado da sustentabilidade (GONG & WALL, 2001). Com o objetivo de sedimentar as possíveis relações entre exergia e desenvolvimento sustentável e/ou exergia e sustentabilidade

é plausível verificar a existência de proposições e formulações, conceituais ou operacionais, de indicadores para desenvolvimento sustentável e/ou sustentabilidade baseados em exergia.

2 OBJETIVOS

Os objetivos estabelecidos para o estudo foram: (i) Identificar relações qualitativas ou quantitativas entre exergia e desenvolvimento sustentável e/ou entre exergia e sustentabilidade, e (ii) Identificar indicadores baseados em exergia e postulados para acompanhamento ou mensuração do desenvolvimento sustentável ou da sustentabilidade de processos e/ou sistemas.

O objetivo específico do estudo foi identificar conexões das metodologias baseadas em exergia com gestão, particularmente com gestão ambiental.

3 METODOLOGIA UTILIZADA

O presente trabalho foi realizado através de um *survey*, conforme definido por MacMillan (2007), cujo instrumento de pesquisa foi a revisão bibliográfica através da internet. Foi utilizada como base de dados principal a base de dados bibliográfica *ScienceDirect* (<http://www.sciencedirect.com>) mantida pela Editora Elsevier B.V., assinada e disponibilizada *on line* pela Petrobras, da qual é possível recuperar referências bibliográficas de artigos científicos publicados no período de 1823 até o presente, a partir de periódicos indexados por esta base.

A técnica de recuperação utilizou três palavras-chave: *exergy*, *sustainability* e *sustainable development*.

Em duas pesquisas feitas foram obtidas para análise sessenta e sete (67) recuperações, que foram ordenadas por data de publicação e analisadas. Após a análise, cinquenta e seis (56) referências foram identificadas como procedentes (congruentes com o tema) e compõem o *survey*.

A análise feita sobre cada artigo visou identificar sempre que possível os seguintes pontos básicos:

- o uso técnico dado à função exergia;
- o conceito de sustentabilidade ou desenvolvimento sustentável evocado;
- as relações entre exergia e desenvolvimento sustentável ou sustentabilidade;
- os indicadores baseados em exergia postulados e/ou utilizados no trabalho;
- a relação do que é proposto no trabalho com gestão, procurando identificar que tipo de gestão está implícita ou explícita no trabalho e especialmente os casos em que a gestão ambiental é utilizada ou é potencial.

4 CONCLUSÕES SOBRE A ORGANIZAÇÃO DO DEBATE

4.1 ÁREAS DE TRABALHO

Caracterizam aplicações ecológicas da exergia os trabalhos de Christensen (1995), Apaiah *et al.* (2006), Verdesca *et al.* (2006), Wan-Bin *et al.* (2006) e Brehmer *et al.* (2008).

Ossebaard *et al.* (1997) enfocam a análise exergética de sistemas térmicos em um país com base na eficiência exergética.

Ayres (1998) enfoca as relações entre termodinâmica e economia.

A análise exergética de sistemas energéticos renováveis foi abordada por Suganthi & Samuel (2000), Hepbasli & Utlu (2004), Midilli *et al.* (2005), Dincer & Rosen (2005) e Hepbasli (2008).

As relações entre exergia, meio ambiente e desenvolvimento sustentável foram abordadas por Wall & Gong (2001), Rosen & Dincer (2001), Gong & Wall (2001), Wall (2002) e Rosen *et al.* (2008).

A avaliação de tecnologias por meio de indicadores exergéticos foi abordada por Dewulf *et al.* (2001).

El-Sayed (2001) abordou o uso de termoeconomia na avaliação de um sistema de desalinização de água do mar. Também Romero-Ternero *et al.* (2005) aplicaram análise termoeconômica a um sistema de osmose reversa de água do mar, determinando a eficiência exergética do sistema.

Seager & Theis (2002) abordaram a avaliação do impacto ambiental químico através de uma nova métrica, o potencial de poluição (*Pollution Potential*).

Balocco *et al.* (2004) utilizaram Análise Exergética Estendida (EEA – *Extended Exergy Analysis*) para avaliar o impacto ambiental urbano de construções.

O papel da exergia na formulação de políticas foi abordado por Dincer (2002), recomendando o uso da exergia como ferramenta de gestão.

A análise exergética de países, regiões e setores econômicos foi abordada por Dewulf & Langenhove (2003), Federici *et al.* (2003), Haldi & Favrat (2006), Koroneos & Nanaki (2007), Utlu & Hepbasli (2007), Pulselli *et al.* (2008), Gasparatos *et al.* (2008a), Becerra-López & Golding (2008), Ukidwe & Baksi (2008) e Utlu & Hepbasli (2008).

Dewulf & Langenhove (2003) propõem um parâmetro para avaliação de tecnologias de transporte, o EMIPS (*Exergetic Material Input per Unit of Service*).

Federici *et al.* (2003) calculam eficiências exergéticas de dois sistemas de transporte distritais.

Koroneos & Nanaki (2007) usam a eficiência exergética como indicador da sustentabilidade energética e auxiliador na tomada de decisão.

Utlu & Hepbasli (2007) determinam o grau de eficiência de utilização energética e exergética no setor industrial da Turquia.

Pulselli *et al.* (2008) aplicam a Análise Exergética Estendida ao nível territorial na Província de Siena (Itália).

Gasparatos *et al.* (2008) também aplicam a Análise Exergética Estendida ao Reino Unido (UK).

Becerra-López & Golding (2008) propõem como indicador de sustentabilidade exergética o Consumo Cumulativo de Exergia.

Ukidwe & Baksi (2008) utilizam a avaliação exergética do ciclo de vida para analisar a indústria química americana em 1997, fazendo uso de dois índices.

Utlu & Hepbasli (2008) utilizam a análise exergética para avaliar o setor industrial da Turquia no ano de 2003, propondo o uso de um índice exergético.

Aplicações de exergia na indústria são exemplificadas pelos trabalhos de Bargigli *et al.* (2004) e Lampret *et al.* (2007).

Relações da exergia com os princípios da ecologia industrial são abordados por Seager & Theis (2004) e Dewulf & Langenhove (2005).

Seager & Theis (2004) propõem uma taxonomia para classificar os critérios quantitativos de sustentabilidade.

Dewulf & Langenhove (2005) apresentam um conjunto de cinco indicadores de sustentabilidade ambiental para a avaliação de produtos e rotas de produção.

Hammond (2004a, 2004b e 2007) enfoca um debate crítico sobre a relevância dos métodos termodinâmicos para a determinação de impactos ambientais e sustentabilidade.

Quiang *et al.* (2004) determinaram a eficiência exergetica de um ciclo de potência movido a gás natural liquefeito.

A análise exergetica de sistemas de bomba de calor foi abordada por Ozgener & Hepbasli (2005), Hepbasli *et al.* (2007), Akpinar & Hepbasli (2007) e Kara *et al.* (2008).

A avaliação exergetica do ciclo de vida (*Exergetic Life-Cycle Assessment - ELCA*) foi abordada por Amini *et al.* (2007), Castro *et al.* (2007) e De Meester *et al.* (2008).

A análise exergetica de cogeração é exemplificada pelo trabalho de Liu & Zhang (2007).

Nguyen & Yamamoto (2007) propõem uma modificação do método da pegada ecológica a base de exergia, incorporando recursos não-renováveis.

4.2 ENFOQUE DADO À SUSTENTABILIDADE E À GESTÃO

Com base na análise dos trabalhos considerados relevantes, foi feita uma tentativa de classificá-los segundo a forma de sustentabilidade evocada e segundo a forma de gestão mais plausível apontada ou evocada.

Christensen (1995) evoca a sustentabilidade ecológica e a gestão de ecossistemas.

Ossebaard *et al.* (1997) evocam sustentabilidade energética, econômica e ambiental. Aplica-se gestão econômica, energética e ambiental de sistemas térmicos.

Suganthi & Samuel (2000) evocam a sustentabilidade energética e a gestão do fornecimento de energia.

Wall & Gong (2001) evocam a sustentabilidade ecológica.

Dewulf *et al.* (2001) evocam a sustentabilidade tecnológica e a gestão tecnológica.

El-Sayed (2001) enfoca gestão energética.

- Gong & Wall (2001) enfocam gestão ambiental.
- Seager & Theis (2002) evocam sustentabilidade ambiental e a gestão de impactos ambientais.
- Wall (2002) enfoca a gestão de sistemas.
- Dincer (2002) discute princípios aplicáveis à gestão de forma genérica.
- Dewulf & Langenhove (2003) discutem sustentabilidade tecnológica e a gestão de recursos de transporte.
- Federici *et al.* (2003) discutem a gestão de sistemas de transporte.
- Balocco *et al.* (2004) trabalham com o conceito de sustentabilidade urbana e gestão ambiental.
- Seager & Theis (2004) discutem sustentabilidade ambiental e a forma plausível de gestão é a ambiental.
- Bargigli *et al.* (2004) discutem sustentabilidade ambiental e gestão energética.
- Hammond (2004a) enfoca sustentabilidade econômica e gestão energética.
- Hammond (2004b) centra-se em sustentabilidade energética e gestão energética.
- Hepbasli & Utlu (2004) enfocam a gestão energética.
- Dewulf & Langenhove (2005) enfocam sustentabilidade ambiental e tecnológica e gestão ambiental e tecnológica.
- Midilli *et al.* (2005) tratam de sustentabilidade energética e gestão energética.
- Romero-Ternero *et al.* (2005) enfocam sustentabilidade energética e econômica e gestão energética.
- Dincer & Rosen (2005) abordam gestão ambiental.
- Ozgener & Hepbasli (2005) enfocam sustentabilidade energética e gestão energética.
- Apaiiah *et al.* (2006) tratam de sustentabilidade alimentar e gestão ambiental.
- Verdesca *et al.* (2006) centram-se em sustentabilidade ambiental e econômica e gestão ambiental e econômica.
- Wan-Bin *et al.* (2006) discutem sustentabilidade ecológica e gestão ecológica.
- Jorgensen (2006) enfoca sustentabilidade ecológica e gestão de forma ampla.
- Haldi & Favrat (2006) evocam sustentabilidade energética e gestão energética.
- Amini *et al.* (2007) enfocam sustentabilidade ambiental e gestão de recursos e ambiental.

Liu & Zhang (2007) enfocam sustentabilidade energética.

Koroneos & Nanaki (2007) centram-se em sustentabilidade energética e gestão energética.

Utlu & Hepbasli (2007) enfocam sustentabilidade energética e gestão energética.

Castro *et al.* (2007) evocam sustentabilidade industrial e gestão de recursos e industrial.

Lampret *et al.* (2007) centram-se em gestão energética.

Pulselli *et al.* (2008) evocam sustentabilidade regional e gestão ambiental.

Rosen *et al.* (2008) tratam de gestão ambiental.

Hepbasli (2008) trata da gestão de recursos energéticos.

Brehmer *et al.* (2008) enfocam gestão ecológica.

Gasparatos *et al.* (2008a) tratam de sustentabilidade regional e gestão sócio-econômica, energética e ambiental.

Kara *et al.* (2008) enfocam gestão energética.

Becerra-López & Golding (2008) tratam de sustentabilidade regional e gestão energética.

Ukidwe & Baksi (2008) tratam de sustentabilidade ambiental.

Utlu & Hepbasli (2008) enfocam sustentabilidade energética e gestão energética.

De Meester *et al.* (2008) enfocam sustentabilidade econômica, social e ambiental e gestão ambiental e energética.

4.3 INDICADORES EXERGÉTICOS DE SUSTENTABILIDADE

4.3.1 INDICADORES GERAIS

Os parâmetros propostos como indicadores a base de exergia e identificados neste trabalho são muitos e aplicam-se a distintas áreas de gestão, como visto no item 4.2. São enumerados aqueles indicadores que são propostos como indicadores de sustentabilidade de processos e/ou sistemas, visando obter uma visão geral do que foi identificado nesta revisão bibliográfica.

Os indicadores abaixo citados são alguns dos parâmetros através dos quais exergia é proposta como indicador de sustentabilidade de processos e/ou sistemas (independente da sua natureza).

- Exergia e sua componente estrutural (Christensen, 1995);
- Quantidade de exergia estocada na Terra como depósitos de exergia (Waal & Gong, 2001);
- Eficiência exergética (Ossebaard *et al.*, 1997; Bargigli *et al.*, 2004; Hepbasli & Utlu, 2004; Balocco *et al.*, 2004; Dincer & Rosen, 2005; Apaiah *et al.*, 2006; Amini *et al.*, 2007; Liu & Zhang, 2007; Koroneos & Nanaki, 2007; Utlu & Hepbasli, 2007; Castro *et al.*, 2007; Pulselli *et al.*, 2008; Gasparatos *et al.*, 2008a);
- Consumo Cumulativo de Exergia (CExC – *Cumulative Exergy Consumption*), Consumo Cumulativo de Exergia para Construção e Abatimento (CExCA – *Cumulative Exergy Consumption for Construction and Abatement*) e Sustentabilidade S (Dewulf *et al.*, 2001);
- Destruição de exergia (El-Sayed, 2001);
- Exergia de Mistura e Potencial de Poluição (*Pollution Potential*) (Seager & Theis, 2002; Seager & Theis, 2004);
- Input exergético de material por unidade de serviço (EMIPS – *Exergetic Material Input per Unit of Service*) (Dewulf & Langenhove, 2003);
- Eficiências exergéticas de primeira e segunda ordens (Federici *et al.*, 2003; Balocco *et al.*, 2004);
- Conteúdo Cumulativo de Exergia (CEC – *Cumulative Exergy Content*) (Szargut, 2005);
- Eficiência do processo, Re-uso de materiais, Recuperação de materiais residuais, Renovação dos materiais consumidos e Toxicidade das emissões (Dewulf & Langenhove, 2005);
- Potencial de Melhoria Exergética (*Improvement Potential* – IP) (Ozgener & Hepbasli, 2005 ; Utlu & Hepbasli, 2007; Utlu & Hepbasli, 2008);
- Valor Adicionado de Informação Exergética (IEEx – *Added Value of Exergetic Information*) (Verdesca *et al.*, 2006);

- Índice de Produtividade para a Agricultura (APES) (Wan-Bin, 2006);
- Eco-exergia (Jorgensen, 2006);
- Pegada Ecológica Modificada (Nguyen & Yamamoto, 2007);
- Taxa de fluxo de custo por unidade energética ou exergetica (*cost-flow rate*) (Lampret *et al.*, 2007);
- Índice de Sustentabilidade (*Sustainability Index – SI*) (Rosen *et al.*, 2008);
- Valor Líquido de Exergia (*Net Exergy Value – NexV*)(Brehmer *et al.*, 2008);
- Indicador de Sustentabilidade Exergetica (IOExS – *Indicator of Exergetic Sustainability*) (Becerra-López & Golding, 2008);
- Consumo de Exergia Industrial Cumulativo (*Industrial Cumulative Exergy Consumption - ICEC*) e Consumo de Exergia Ecológico Cumulativo (*Ecological Cumulative Exergy Consumption – ECEC*) (Ukidwe & Bakshi, 2008);
- Exergia (De Meester *et al.*, 2008).

4.3.2 INDICADORES COM APLICAÇÃO EM GESTÃO AMBIENTAL

Dos indicadores relacionados acima são enumerados abaixo aqueles que apresentam aplicabilidade à gestão ambiental. Esta enumeração foi feita com base na classificação geral dada aos trabalhos analisados. Para os indicadores e trabalhos citados abaixo foi identificada uma relação com sustentabilidade ambiental de processos e/ou sistemas e gestão ambiental:

- Eficiência exergetica (Ossebaard *et al.*, 1997; Balocco *et al.*, 2004; Apaiah *et al.*, 2006; Amini *et al.*, 2007; Pulselli *et al.*, 2008);
- Quantidade de exergia estocada na Terra como depósitos de exergia (Waal & Gong, 2001);
- Exergia de mistura e potencial de poluição (*Pollution Potential*) (Seager & Theis, 2002);
- Eficiência do processo, Re-uso de materiais, Recuperação de materiais residuais, Renovação dos materiais consumidos e Toxicidade das emissões (Dewulf & Langenhove, 2005);
- Valor Adicionado de Informação Exergetica (IEEx – *Added Value of Exergetic Information*) (Verdesca *et al.*, 2006);

- Pegada Ecológica Modificada (Nguyen & Yamamoto, 2007);
- Índice de Sustentabilidade (*Sustainability Index – SI*) (Rosen *et al.*, 2008);
- Consumo de exergia ecológico cumulativo (*Ecological Cumulative Exergy Consumption – ECEC*) (Ukidwe & Bakshi, 2008);
- Exergia (De Meester *et al.*, 2008).

5 CONCLUSÕES

Quanto aos objetivos gerais propostos para o trabalho pode-se observar a partir da análise da literatura revisada que:

- É proposto que a sustentabilidade de um processo e/ou sistema aumenta na razão direta do aumento da eficiência exergética do processo ou sistema. Esta proposição é qualitativa, ou seja, não é comprovada de forma quantitativa;
- É proposto que existe uma relação direta entre eficiência exergética e impacto ambiental de um processo e/ou sistema: o aumento da eficiência exergética implica na diminuição do impacto ambiental do processo e/ou sistema. Esta proposição é qualitativa, ou seja, não é comprovada de forma quantitativa;
- É proposto de forma geral que o aumento da sustentabilidade implica em desenvolvimento sustentável;
- Foram identificados e enumerados indicadores quantitativos baseados em exergia e postulados para acompanhamento ou mensuração da sustentabilidade de processos e/ou sistemas;
- Apesar da complexidade do tema evidencia-se a proposição excessivamente diversificada de indicadores, o que leva a um considerável grau de confusão quanto ao seu conceito, *modus operandi* e aplicabilidade, que se repercute no entendimento, análise e seleção dos indicadores;
- Apesar de constituírem medidas técnicas baseadas em exergia, os indicadores baseados em exergia propostos para processos e/ou sistemas

ainda não se enquadram rigorosamente dentro dos critérios gerais propostos para indicadores.

Quanto ao objetivo específico proposto para o trabalho constatou-se na literatura revisada que:

- Foram identificadas relações entre exergia e gestão e, em particular, entre exergia e gestão ambiental;
- Inúmeros exemplos de práticas de gestão utilizando os indicadores baseados em exergia propostos para processos e/ou sistemas foram enumerados.

Conclui-se que, apesar da elaborada produção técnica e científica no tema, as técnicas de mensuração da sustentabilidade baseadas em exergia devem ser mais aprofundadas, até mesmo porque o debate é muito novo. O conceito de sustentabilidade submetido a medidas deve ser definido e explorado mais profundamente e a pertinência dos indicadores propostos a partir de tais medidas deve ser verificada dentro de um contexto mais amplo, ou seja, dentro de avaliações que utilizem conjuntos de indicadores para sustentabilidade já consagrados nesta mensuração e dentro de perspectiva quantitativa, ou seja, a relação proposta entre impacto ambiental, sustentabilidade e eficiência exergética deve ser verificada e expressa analiticamente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKPINAR, E. K. & HEPBASLI, A. **A comparative study on exergetic assessment of two ground-source (geothermal) heat pump systems for residential applications.** Building and Environment 42 (2007) 2004-2013.

AMARAL, S. P. **Estabelecimento de Indicadores e Modelo de Relatório de Sustentabilidade Ambiental, Social e Econômica: Uma Proposta para a Indústria de Petróleo Brasileira.** Tese de Doutorado. Planejamento Energético. COPPE. UFRJ. Rio de Janeiro: 2003.

AMINI, S. H., REMMERSWAAL, J.A.M., CASTRO, M.B. & REUTER, M.A. **Quantifying the quality loss and resource efficiency of recycling by means of exergy analysis.** Journal of Cleaner Production 15 (2007) 907-913.

APAIAH, R. K., LINNEMANN, A. R. & KOOI, H. J. van der **Exergy analysis: a tool to study the sustainability of food supply chains**. Food Research International 39 (2006) 1-11.

AYRES, R. U. **Eco-thermodynamics: economics and the second law**. Ecological Economics 26 (1998) 189-209.

BALOCCO, C., PAPESCHI, S., GRAZZINI, G. & BASOSI, R. **Using exergy to analyze the sustainability of an urban area**. Ecological Economics 48 (2004) 231-244.

BARGIGLI, S., RAUGEI, M. & ULGIATI, S. **Comparison of thermodynamic and environmental indexes of natural gas, syngas and hydrogen production processes**. Energy 29 (2004) 2145-2159.

BECERRA-LÓPEZ, H. R. & GOLDING, P. **Multi-objective optimization for capacity expansion of regional power-generation systems: Case study of far west Texas**. Energy Conversion and Management (2008).

BREHMER, B., STRUIK, P. C. & SANDERS, J. **Using an energetic and exergetic life cycle analysis to assess the best applications of legumes within a biobased economy**. Biomass and Bioenergy (2008, In Press).

CASTRO, M.B.G., REMMERSWAAL, J.A.M., BREZET, J.C. & REUTER, M.A. **Exergy losses during recycling and the resource efficiency of product systems**. Resources, Conservation and Recycling 52 (2007) 219-233.

CHRISTENSEN, V. **Ecosystem maturity – towards quantification**. Ecological Modelling 77 (1995) 3-32.

CMMAD – COMISSÃO MUNDIAL SOBRE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. **Nosso Futuro Comum**. Editora da FVG. Rio de Janeiro: 1988.

De MEESTER, B., DEWULF, J., VERBEKE, S., JANSSENS, A. & LANGENHOVE, H. B. **Exergetic life cycle assessment for resource consumption evaluation in the built environment**. Building and Environment (2008, In Press).

DEWULF, J. LANGENHOVE, H. Van DIRCKX, J. **Exergy analysis in the assessment of the sustainability of waste gas treatment systems.** *The Science of the Total Environment* 273 (2001) 41-52.

DEWULF, J. & LANGENHOVE, H. Van **Exergetic material input per unit of service (EMIPS) for the assessment of resource productivity of transport commodities.** *Resources, Conservation and Recycling* 38 (2003) 161-174.

DEWULF, J. & LANGENHOVE, H. Van **Integrating industrial ecology principles into a set of environmental sustainability indicators for technology assessment.** *Resources, Conservation and Recycling* 43 (2005) 419-432.

DINCER, I. **The role of exergy in energy policy making.** *Energy Policy* 30 (2002) 137-149.

DINCER, I. & ROSEN, M.A. **Thermodynamic aspects of renewables and sustainable development.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 9 (2005) 169-189.

DINCER, I. & ROSEN, M. A. **Exergy, energy, environment and sustainable development.** Elsevier. 1^a. Ed. 2007, 454p.

EL-SAYED, Y. M. **Designing desalination systems for higher productivity.** *Desalination* 134 (2001) 129-158.

FEDERICI, M., ULGIATI, S., VERDESCA, D. & BASOSI, R. **Efficiency and sustainability indicators for passenger and commodities transportation systems – The case of Siena, Italy.** *Ecological Indicators* 3 (2003) 155-169.

GASPARATOS, A., EL-HARAM, M. & HORNER, M. **Assessing the sustainability of the UK society using thermodynamic concepts: Part 2 .** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008a. *In Press*.

GONG, M. & WALL, G. **On exergy and sustainable development – Part 2: Indicators and methods.** *Exergy Int. J.* 1 (4) (2001) 217-233.

HALDI, P.-A. & FAVRAT, D. **Methodological aspects of the definition of a 2kW society.** Energy 31 (2006) 3159-3170.

HAMMOND, G. **Towards sustainability: energy efficiency, thermodynamic analysis, and the two cultures.** Energy Policy 32 (2004a) 1789-1798.

HAMMOND, G. P. **Engineering sustainability: thermodynamics, energy systems, and the environment.** Int. J. Energy Res. (2004b) 28 : 613-639.

HAMMOND, G. P. **Industrial energy analysis, thermodynamics and sustainability.** Applied Energy 84 (2007) 675-700.

HEPBASLI, A. & UTLU, Z. **Evaluating the energy utilization efficiency of Turkey's renewable energy sources during 2001.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 8 (2004) 237-255.

HEPBASLI, A., ERBAY, Z., ICIER, F., COLAK, N. & HANCIOGLU, E. **A review of gas engine driven heat pumps (GEHPS) for residential and industrial applications.** Renewable and Sustainable Energy Reviews (2007, *In Press*).

HEPBASLI, A. **A key review on exergetic analysis and assessment of renewable energy resources for a sustainable future.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008) 593-661.

JORGENSEN, S. E. **Eco-Exergy as sustainability.** WIT Press. 1^a. Ed. 2006.

KARA, O., ULGEN, K. & HEPBASLI, A. **Exergetic assessment of direct expansion solar-assisted heat pump systems: Review and Modelling.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008) 1383-1401.

KORONEOS, C.J. & NANAKI, E.A. **Electric energy sustainability in the eastern Balkans.** Energy Policy 35 (2007) 3826-3842.

LAMPRET, M., BUKOVEC, V., PATERNOST, A., KRIZMAN, S., LOJK, V. & GOLOBIC, I. **Industrial energy-flow management.** Applied Energy 84 (2007) 781-794.

LIU, M. & ZHANG, N. **Proposal and analysis of a novel ammonia-water cycle for power and refrigeration cogeneration.** Energy 32 (2007) 961-970.

MACMILLAN **Macmillan English Dictionary for Advanced Learners.** Second Edition, 2007

MARTINS, Ana Raquel Paiva. **Desenvolvimento Sustentável: Uma Análise das Limitações do Índice de Desenvolvimento Humano para refletir a Sustentabilidade Ambiental.** Dissertação de Mestrado. Engenharia de Produção, UFF. Niterói: 2006.

MIDILLI, A., AY, M., DINCER, I. & ROSEN, M.A. **On hydrogen and hydrogen energy strategies I: current status and needs.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 9 (2005) 255-271.

NGUYEN, H.X. & YAMAMOTO, R. **Modification of ecological footprint evaluation method to include non-renewable resource consumption using thermodynamic approach.** Resources, Conservation and Recycling 51 (2007) 870-884.

OSSEBAARD, M. E., WIJK, A. D. J. M. VAN & WEES, M. T. VAN. **Heat Supply in the Netherlands: A System analysis of costs, exergy efficiency, CO₂ and NO_x Emissions.** Energy Vol. 22, No. 11, p 1087-1098 (1997).

OZGENER, O. & HEPBASLI, A. **Experimental performance analysis of a solar assisted ground-source heat pump greenhouse system.** Energy and Buildings 37 (2005) 101-110.

PULSELLI, F. M., CIAMPALINI, F., LEIPERT, C. & TIEZZI, E. **Integrating methods for the environmental sustainability : The SPIn-Eco Project in the province of Siena (Italy).** Journal of Environmental Management 86 (2008) 332-341.

QIANG, W., YANZHONG, L. & JIANG, W. **Analysis of Power cycle based on cold energy of liquefied natural gas and low-grade heat source.** Applied Thermal Engineering 24 (2004) 539-548.

ROMERO-TERNERO, V., GARCÍA-RODRÍGUEZ, L. & GÓMEZ-CAMACHO, C. **Thermoeconomic analysis of wind powered seawater reverse osmoses desalination in the canary islands.** Desalination 186 (2005) 291-298.

ROSEN, M. A. & DINCER, I. **Exergy as the confluence of energy, environment and sustainable development.** Exergy Int. J. 1 (1) (2001) 3-13.

ROSEN, M. A., DINCER, I. & KANOGLU, M. **Role of exergy in increasing efficiency and sustainability and reducing environmental impact.** Energy Policy 36 (2008) 128-137.

SEAGER, T. P. & THEIS, T. L. **Exergetic pollution potential: Estimating the revocability of chemical pollution.** Exergy, an International Journal 2 (2002) 273-282.

SEAGER, T. P. & THEIS, T. L. **A taxonomy of metrics for testing the industrial ecology hypotheses and application to design of freezer insulation.** Journal of Cleaner production 12 (2004) 865-875.

SUGANTHI, L. & SAMUEL, A. A. **Exergy based supply side energy management for sustainable energy development.** Renewable Energy 19 (2000) 285-290.

SZARGUT, J. **Exergy Method : Technical and Ecological Applications.** WIT Press. 1^a. Ed. 2005.

UKIDWE, N. U. & BAKSI, B. R. **Resource intensities of chemical industry sectors in the United States via input-output network models.** Computers and Chemical Engineering 32 (2008) 2050-2064.

UTLU, Z. & HEPBASLI, A. **A review and assessment of the energy utilization efficiency in the Turkish industrial sector using energy and exergy analysis method.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 11 (2007) 1438-1459.

UTLU, Z. & HEPBASLI, A. **Energetic and exergetic assessment of the industrial sector by varying dead (reference) state temperatures: A review with an illustrative example.** Renewable and Sustainable Energy Reviews 12 (2008) 1277-1301.

VERDESCA, D., FEDERICI, M., TORSELLO, L. & BASOSI, R. **Exergy-economic accounting for sea-coastal systems: A novel approach.** Ecological Modelling 193 (2006) 132-139.

WALL, G. & GONG, M. **On exergy and sustainable development – Part 1: Conditions and concepts.** Exergy Int. J. 1 (3) (2001) 128-145.

WALL, G. **Conditions and tools in the design of energy conversion and management systems of a sustainable society.** Energy Conversion and Management 43 (2002) 1235-1248.

WAN-BIN, Z., HUA-JIAO, Q., XIN, C. & XU, C. **The Concept of Agricultural Productivity on Ecosystem Scale and its measurement.** Agricultural Sciences in China 2006, 5 (9) 707-712.