

**DESENVOLVIMENTO DE ÍNDICE DE COMPARAÇÃO DE ECOEFICIÊNCIA A PARTIR DE ECOINDICADORES***DEVELOPMENT OF ECO-EFFICIENCY COMPARISON INDEX FROM ECO-INDICATORS***Camila Pesci Pereira<sup>a</sup>; Daniel Proaze Paes<sup>a</sup>; Diego Martinez Prata<sup>a</sup>; Luciane Pimentel Costa Monteiro<sup>a</sup>**<sup>a</sup> Universidade Federal Fluminense (UFF), Niterói, RJ, Brasil – Departamento de Engenharia Química e Petróleo**Resumo**

A ecoeficiência é um objetivo comum das empresas que almejam sustentabilidade e está baseada na avaliação de ecoindicadores. Entretanto, geralmente a sustentabilidade ambiental não é claramente observada quando as avaliações destes ecoindicadores são realizadas isoladamente e, portanto, torna-se necessária uma avaliação conjunta. Deste modo, para uma avaliação mais completa, é necessário o desenvolvimento de um índice ambiental. É neste panorama que o presente trabalho foi desenvolvido, com o objetivo de propor um índice de comparação de ecoeficiência como ferramenta útil de avaliação global de ecoeficiência e tarefas de tomada de decisão.

**Palavras-Chave:** ecoeficiência, ecoindicador, índice, unidade industrial.**Abstract**

*Eco-efficiency is a common goal of companies that seeking sustainability and is based on the evaluation of eco-indicators. However, the environmental sustainability is not clearly observed when these evaluations are performed separately and, therefore, it becomes necessary to assess the eco-indicators jointly. Thus, for a more complete evaluation, it is necessary the development of environmental index. In this scenario, the present work has been developed with the aim to propose an index for eco-efficiency comparison, as a useful tool for assessing eco-efficiency and decision-making tasks.*

*Keywords: eco-efficiency, eco-indicator, index, industrial facility.*

**1. INTRODUÇÃO**

O conceito de ecoeficiência emergiu como uma valiosa ferramenta para atingir o desenvolvimento sustentável. Segundo o *World Business Council for Sustainable Development* (WBCSD), ecoeficiência é competitividade na produção e colocação no mercado de bens ou serviços que satisfazem às necessidades humanas, melhorando a qualidade de vida, minimizando os impactos ambientais e a intensidade do uso de recursos naturais, considerando o ciclo inteiro de vida da produção (WBCSD, 2000).

Atualmente, as empresas alinhadas com os conceitos e princípios do desenvolvimento sustentável atuam para minimizar os impactos ambientais e sociais provocados por suas operações. Ecoeficiência é um objetivo comum das

empresas que visam sustentabilidade e está baseada na avaliação de ecoindicadores, globais ou não.

Os ecoindicadores representam uma relação de uma variável ambiental e um elemento econômico (produção ou custo de produção). Um dos principais objetivos dos ecoindicadores é melhorar a tomada de decisões, de modo que monitoramento e a informação que eles trazem ajudem na diretriz de decisões economicamente e ambientalmente seguras, além de permitir a avaliação dos impactos gerados.

Tratando-se de uma única empresa, visa-se melhorar seu desempenho diminuindo o valor do ecoindicador por meio de ações ou melhorias no processo e tecnologia, tornando-a mais ecoeficiente. Normalmente, esta comparação é realizada entre períodos, por exemplo, mensal ou anual. Quando utilizado para comparar duas ou mais empresas do mesmo ramo, ou ainda, duas ou mais unidades de seguimento comum de uma organização, indicará a de maior ecoeficiência.



Geralmente, a sustentabilidade ambiental não é claramente observada quando as avaliações são realizadas em um único indicador de ecoeficiência e, portanto, torna-se necessária a avaliação conjunta de ecoindicadores. Entretanto, cabe ressaltar a dificuldade na avaliação comparativa quando, de fato, são utilizados conjuntamente diversos ecoindicadores (consumo de água e energia, geração de efluentes e resíduos e emissão de CO<sub>2</sub>, por exemplo) para sustentabilidade, uma vez que é inconsistente afirmar, categoricamente, qual o ecoindicador é mais importante.

Produção ecoeficiente é uma fonte de inovação ambiental, além de nova tendência de mercado, voltada para um consumidor cada vez mais ecologicamente consciente, constituindo um dos mais importantes desafios socioambientais atuais.

O presente trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de uma metodologia de comparação de eficiência global (índice de comparação de ecoeficiência) com base em indicadores desenvolvidos para avaliação ambiental. Como resultado, é possível realizar melhorias, por ações de engenharia, agregando valor ao produto final além de contribuir para o desenvolvimento de um modelo de produção sustentável.

## 2. DESENVOLVIMENTO

### 2.1. Ecoindicadores

Desde que foi iniciada a preocupação com os assuntos ambientais, como a realização do “*Our Common Future*” em 1987 e da Agenda 21 em 1992, governantes de muitos países, organizações interessadas e até mesmo muitas empresas têm enfatizado a importância de se encaixar no conceito de sustentabilidade, que engloba a integração dos pilares econômicos, sociais e ecológicos (Cote *et al.*, 1995; Lowe *et al.*, 1995; Charmondusit, 2009).

De acordo com Welford (1995), o desenvolvimento sustentável se baseia em três questões inter-relacionadas e voltadas para a indústria. Primeiramente, “o meio ambiente deve ser avaliado como parte integral do processo econômico e não tratado como um bem livre”, portanto as empresas devem se esforçar para usar os recursos naturais de maneira mais inteligente, sendo estes renováveis ou não, ou seja, deve-se conservar o ecossistema. Em segundo lugar, cita “a necessidade de lidar com a equidade, não somente em relação aos países desenvolvidos ou em desenvolvimento, mas também entre as pessoas em um país”, o que implica não só no desenvolvimento econômico, mas também no desenvolvimento humano. E, por último, “o desenvolvimento sustentável requer que a sociedade, as empresas e os grupos particulares operem em uma escala de tempo diferente do que opera na economia”, isto é, visando um panorama satisfatório em longo prazo, conservado e construído para a geração atual e as futuras,

adotando planejamentos e estratégias políticas de negócios mais proativos e menos reativos.

Ecoeficiência é um instrumento para a análise da sustentabilidade nas indústrias, indicando uma relação nas atividades econômicas entre o valor dos recursos naturais e o impacto ambiental. A fim de alcançar as metas de sustentabilidade, o conceito de campo ecológico industrial foi introduzido (Charmondusit, 2009).

É neste panorama que os ecoindicadores são desenvolvidos como ferramentas que oferecem informações de modo simples e objetivo com o intuito de auxiliar na tomada de decisões para melhorar o desempenho de um grupo, país ou empresa. Com os ecoindicadores, ou indicadores de ecoeficiência (como também são denominados), deve-se trabalhar tanto os conceitos de custo-benefício como os princípios de eficiência produtiva (Callens *et al.*, 1999).

A questão da sustentabilidade não pode ser definida de forma rígida e conceituada de uma única forma, pois esta depende de diversos fatores a serem avaliados e de difícil controle, por isso a importância dos indicadores de ecoeficiência; estes irão fornecer os dados para avaliação do ambiente. Por este motivo, estes ecoindicadores devem ser constantemente monitorados e atualizados. Neste ponto, as empresas devem desempenhar um papel importante na realização de metas sustentáveis.

As informações apresentadas nos ecoindicadores possibilitam a avaliação da situação estudada de modo que se possam tomar decisões mitigadoras ou estudar a implantação de medidas técnicas através da elaboração de projetos ou conhecimentos científicos para melhorar o desempenho do processo de uma indústria, por exemplo. Ou ainda de desenvolver acordos voluntários, validados e efetivados em encontros que objetivam a sustentabilidade da criação ou aprimoramento de leis e regulamentações ambientais etc., todas essas medidas podem ser aperfeiçoadas usando as informações obtidas nesses indicadores (Callens *et al.*, 1999).

As análises empíricas, medição de dados e conhecimento teóricos oferecem informações importantes sobre o entendimento do meio ambiente no meio empresarial, entretanto as informações e experiência tanto dos altos setores administrativos quanto dos funcionários de uma indústria que lidam diretamente com o processo são essenciais para a compreensão das atividades que desenvolvem as características ambientais. O levantamento de dados através de entrevistas tanto com funcionários quanto com o alto setor administrativo pode fornecer informações importantes para o desenvolvimento de ecoindicadores. Portanto a integração entre conhecimento técnico-científico, embasamento teórico e troca de experiência possibilita a criação de ferramentas importantes para o desenvolvimento de ecoindicadores.



Outro ponto importante a ser adotado dentro de um ambiente empresarial é a orientação dos funcionários e dos gestores, assim como do consumidor. Desta forma, os funcionários e gestores conscientes trabalham para o melhor desempenho do processo, qualidade de vida do ser humano e do meio ambiente. Do mesmo modo, consumidores que têm pleno conhecimento da importância de se ter boas condições ambientais, exigem das empresas atitudes de acordo com seus interesses.

Entretanto, mesmo com o esforço das empresas ou grupos interessados em desenvolver o ecoindicador como uma ferramenta útil para analisar a performance ambiental, muitas vezes a sustentabilidade não é claramente observada quando se avalia os ecoindicadores isoladamente e, portanto, torna-se necessária uma avaliação conjunta, de forma que seja possível analisar o progresso (ou regresso) de uma mesma unidade industrial ou empresas em períodos diferentes. Isto também se aplica a organizações diferentes, do mesmo ramo, de modo comparativo.

Assim, para uma avaliação mais completa, é necessário o desenvolvimento de um índice ambiental de comparação de ecoeficiência.

## 2.2. Conceitos e Métodos para a Construção de Ferramentas Ambientais

A literatura científica apresenta vários conceitos e metodologias que, embora muitas vezes sejam muito mais teóricos do que práticos, se mostram de extrema valia para avaliar o comportamento das empresas, da sociedade e do meio ambiente mediante as constantes mudanças globais

no que diz respeito à sustentabilidade. Estes conceitos e métodos, que nem sempre são especificamente voltados para a análise do desenvolvimento sustentável, são adaptados e ajudam a compor métodos a fim de facilitar o estudo.

A seleção apropriada dos indicadores ambientais é a mais importante decisão para a avaliação da sustentabilidade de uma indústria (Nordheim *et al.*, 2007). Segundo Veleva *et al.* (2001), a construção de indicadores deve ser estruturada a partir de cinco critérios:

- i) Determinação da unidade de medida para o cálculo do indicador;
- ii) Tipo de medição, que pode ser absoluto (medir um montante total, por exemplo, o total de energia usada por ano em kWh) ou relativo (como, por exemplo, energia utilizada por unidade de produto);
- iii) Período da medição, que é o espaço de tempo em que o indicador é calculado e monitorado;
- iv) Desenvolvimento de objetivos e metas e
- v) Limites, que determinam o quanto uma empresa deseja abranger para medir os indicadores (por exemplo, produto de linha, instalações, fornecedores, distribuidores, todo ciclo de vida de um material ou produto e etc.).

Em muitos casos, nota-se certa dificuldade de avaliar a ecoeficiência de maneira individual ou absoluta em um determinado sistema. A multiplicidade de resultados individuais muitas vezes não transmite clareza e representatividade e torna-se de difícil interpretação.

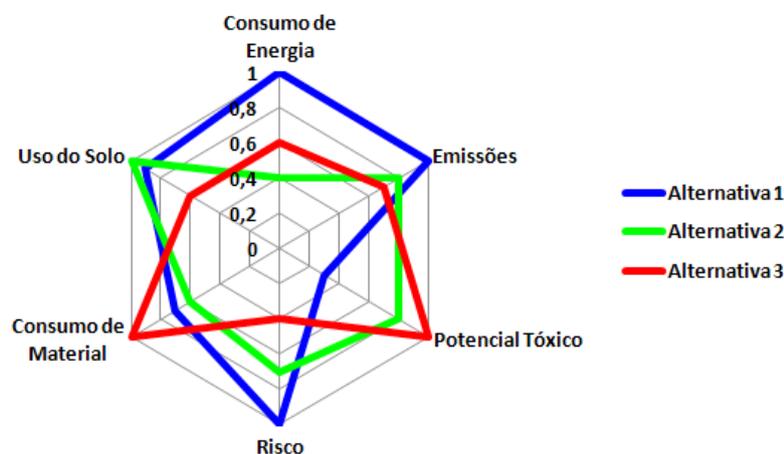


Figura 1. Exemplo Fictício do Método *Fingerprint* para três alternativas 1, 2 e 3.

Neste contexto, a empresa BASF desenvolveu um método, baseado no que é chamado de “*Environmental Fingerprint*”, para a avaliação de sustentabilidade, através do qual os parâmetros ecológicos são representados em um mesmo sistema de coordenadas e sua ecoeficiência fornece apenas

valores comparativos, dispensando os valores absolutos devidos a sua falta de representatividade na análise (Saling *et al.*, 2002).

O *Fingerprint* é representado graficamente pelo gráfico tipo “radar”, conforme ilustrado na Figura 1, e



apresentado na literatura (Bidoki *et al.*, 2006; Garcia-Serna *et al.*, 2007). Basicamente, é dividido em seis indicadores para sustentabilidade: Consumo de Energia, Emissões, Potencial Toxicológico, Risco, Consumo de Material (como matéria prima, insumos, e outros) e Uso do Solo, disponibilizados de forma adimensional, para avaliar a melhor alternativa, como um novo produto, por exemplo. Na metodologia da BASF, o *Fingerprint* não é utilizado separadamente. Pois, como é possível verificar na Figura 1, os indicadores são disponibilizados conjuntamente, mas pode ser difícil avaliar qualitativamente a melhor alternativa (1, 2 ou 3) somente pela figura geométrica formada, principalmente quando estas são aparentemente semelhantes. Desta forma, para o processo de tomada de decisão para avaliação de ecoeficiência, a BASF também se utiliza do chamado “Portfólio”, o qual agrega os dados reportados do *Fingerprint*, aos fatores de ponderação, que são atribuídos de acordo com critérios importantes (como, por exemplo, ponderações sociais ou científicas) para um desempenho ecoeficiente (Saling *et al.*, 2002), apresentando de forma conjunta as informações de impacto ao meio ambiente e custo da alternativa, o que permite uma análise quantitativa.

Assim, são apresentados os conceitos para construção de ferramentas ambientais e da metodologia *Fingerprint* para avaliação de ecoeficiência, base para a metodologia a ser proposta no presente trabalho, adaptada à realidade industrial.

### 2.3. Ecoindicadores na Indústria

Ecoindicadores como ferramenta de avaliação de Ecoeficiência têm sido reportados na literatura em aplicações diversas na indústria: alumínio (Nordheim *et Barrasso*, 2007), ferro (Kharel *et Charmondusit*, 2008), aço (Siitonen *et al.*, 2010), Petroquímica (Charmondusit *et Keartpanpraek*, 2011), amônia (Zhou *et al.*, 2010), dentre outros conforme revisado por Pereira (2013). Foi possível verificar maior atenção despendida aos ecoindicadores de Consumo de Energia e Emissão de CO<sub>2</sub>. O primeiro, muito relacionado às condições de operação ótima da planta industrial e, conseqüentemente, aos fatores econômicos. O segundo, fortemente relacionado às leis ambientais e ao efeito estufa.

Pereira (2013) aponta as cinco principais categorias de ecoindicadores para indústria: Consumo de Água, Consumo de Energia, Emissão de CO<sub>2</sub>, Geração de Efluentes e Geração de Resíduos.

O ecoindicador é sempre expresso de forma relativa: uma razão entre uma variável ambiental e uma variável econômica. Com base no trabalho de Siitonen *et al.* (2010) e tomando a variável econômica como a produção, estes ecoindicadores podem ser definidos como:

- Consumo de Água – Razão do total de água consumida em um período pela produção total equivalente. Unidade m<sup>3</sup>/t.
- Consumo de Energia – Razão do total de energia (toda a matriz energética, incluindo energia elétrica) consumida em um período pela produção total equivalente. Unidade GJ/t.
- Emissão de CO<sub>2</sub> – Razão do total de emissão de CO<sub>2</sub> (combustão, indireta e fugitiva) em um período pela produção total equivalente. Unidade t/t.
- Geração de Efluentes – Razão do total de efluentes líquidos gerados em um período pela produção total equivalente. Unidade m<sup>3</sup>/t.
- Geração de Resíduos – Razão do total de resíduos sólidos gerados em um período pela produção total equivalente. Unidade kg/t.

Pereira (2013) desenvolveu metodologia abrangente para a contabilização destes ecoindicadores, para qualquer indústria, por meio do cálculo da quantidade (gerada ou consumida) do parâmetro ambiental, com base nos dados dos balanços de massa e energia, e divididos pela quantidade de produto produzida. O autor também apresentou a aplicação destes ecoindicadores para uma unidade industrial petroquímica no Brasil (vide Figura 2), diariamente e acumulado (Ac.) mensalmente, para um período de monitoramento de sete meses.

A Figura 2 ilustra de maneira geral uma indústria petroquímica. Na Figura 2, são apresentadas suas entradas: matéria-prima e fontes de energia externa (energia elétrica e gás natural), as unidades de processamento (craqueamento e separação/reação), unidade de geração energética (caldeira), a qual recebe também fontes de energia interna (metano, hidrogênio e óleo combustível), as saídas: tancagem de produtos e subprodutos, carretas, e de diversas válvulas de processo e de alívio para *flare* (tocha). É possível observar, também, as diversas fontes de emissão de CO<sub>2</sub>. Com estas variáveis, é possível desenvolver os ecoindicadores industriais.

As Figuras 3 e 4 ilustram o ecoindicador de Consumo de Energia diário e a distribuição da utilização da matriz energética para o mês de junho de 2012, respectivamente. A matriz energética é composta por: gás metano, gás hidrogênio impuro (mistura de hidrogênio e metano), gás natural, energia elétrica e óleo combustível.

As Figuras 5 e 6 ilustram o ecoindicador de Emissão de CO<sub>2</sub> diário e a distribuição da utilização da matriz de Emissão de CO<sub>2</sub> para o mês de junho de 2012, respectivamente. A matriz de Emissão de CO<sub>2</sub> é composta pelos mesmos elementos da matriz energética, acrescido do alívio para *flare*. Isto é, contempla a emissão por combustão, indireta e fugitiva.

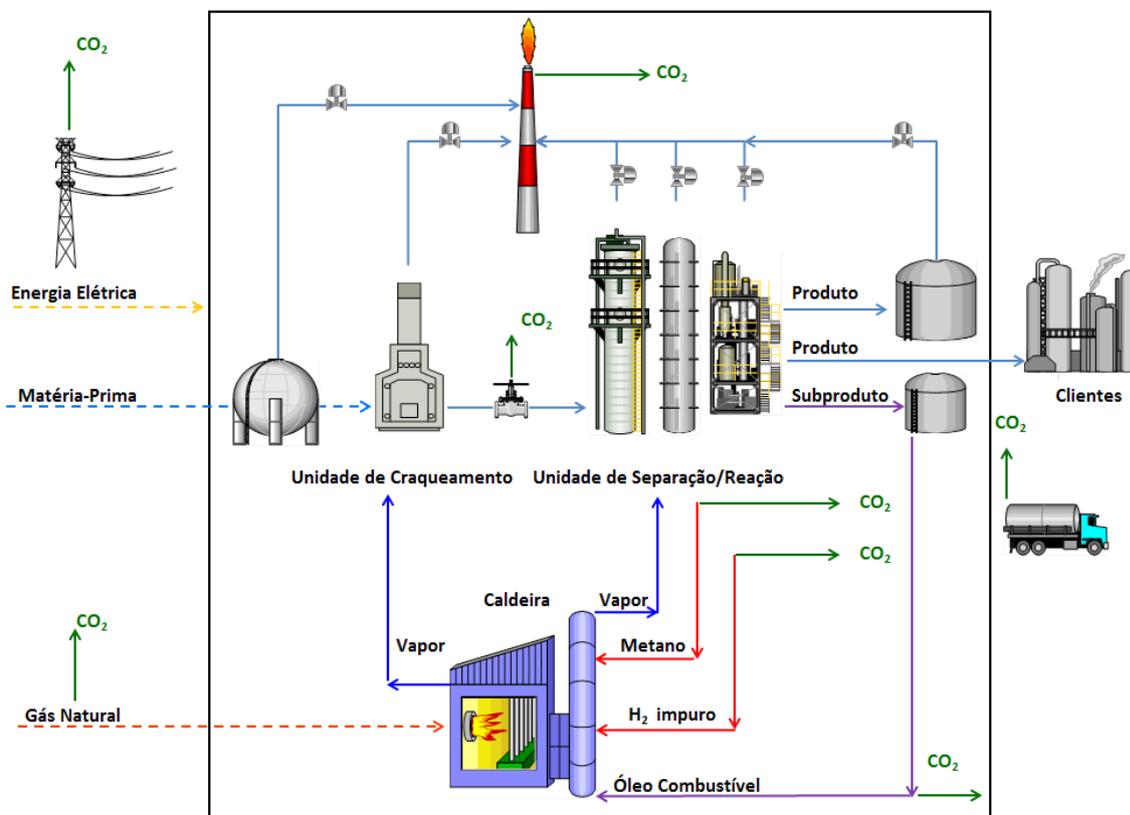


Figura 2. Visão Geral de uma indústria petroquímica, suas fontes energéticas e de emissão de CO<sub>2</sub>.

Fonte: Pereira (2013).

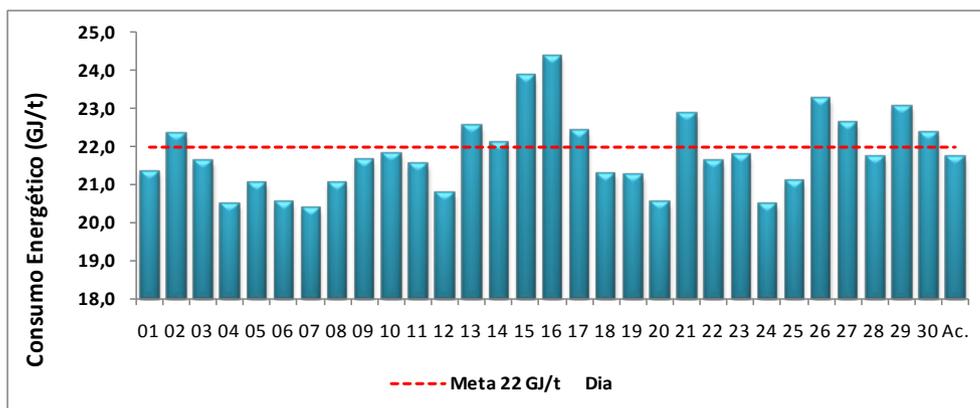


Figura 3. Ecoindicador de Consumo de Energia Industrial.

Fonte: Pereira (2013).

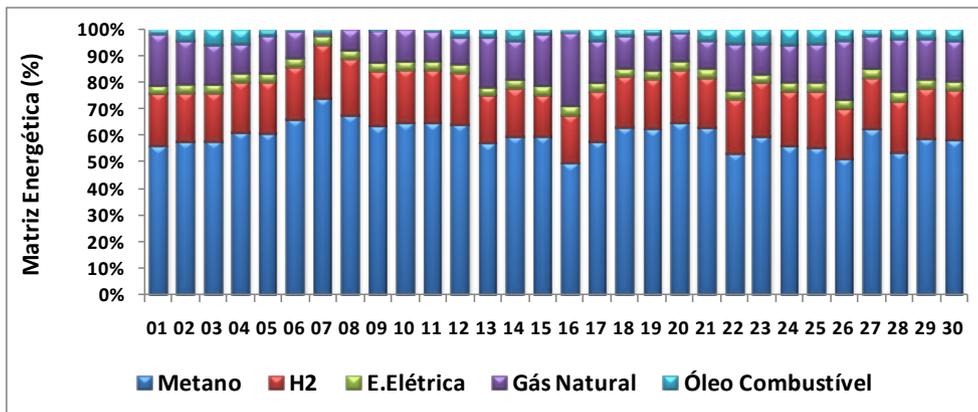


Figura 4. Matriz Energética para o Ecoindicador de Consumo de Energia Industrial.

Fonte: Pereira (2013).

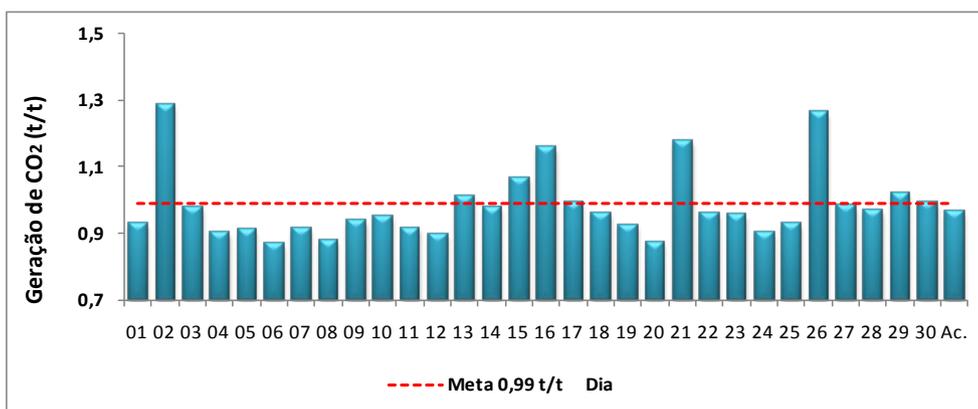


Figura 5. Ecoindicador de Emissão de CO<sub>2</sub> Industrial.

Fonte: Pereira (2013).

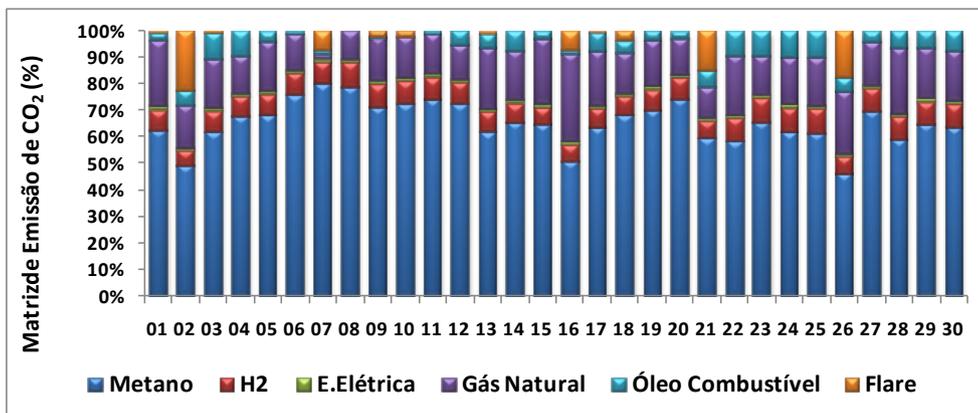


Figura 6. Matriz de Emissão de CO<sub>2</sub> para o Ecoindicador de Emissão de CO<sub>2</sub> Industrial.

Fonte: Pereira (2013).



Para exemplificar como os ecoindicadores são utilizados no cotidiano industrial, ressaltar-se-á o dia 2 de junho. Neste dia, observa-se na Figura 3 que o ecoindicador de consumo de energia estava elevado (acima de 22GJ/t), a matriz energética apresentada na Figura 4 estava bem distribuída, incluindo consumo de óleo combustível produzido na unidade industrial. Entretanto, observa-se na Figura 5 que o ecoindicador de emissão de CO<sub>2</sub> estava muito elevado. Isto foi devido a uma falha na especificação de um dos produtos, com necessidade de envio para *flare* de parte da produção, o que pode ser corroborado pela Figura 6, na qual se destaca na matriz de emissão de CO<sub>2</sub> a elevada porcentagem de *flare*. Este cenário ocorreu novamente nos dias 21 e 26. Nos dias 15 e 16, os ecoindicadores estão elevados devido à redução momentânea na produção, para ajuste de inventário.

Estes são exemplos de dois ecoindicadores diários utilizados na indústria para monitoramento do processo e tomadas de decisão com base no cumprimento de valores/meta – em destaque nas Figuras 3 e 5 – calculados com valores históricos. Maiores detalhes sobre estes ecoindicadores, durante sete meses de monitoramento, podem ser encontrados em Pereira (2013).

Entretanto, além de observações e comparações simples entre categorias de ecoindicadores, a indústria, geralmente, realiza a avaliação de ecoeficiência, e isto envolve comparação entre:

1. Períodos diferentes para uma mesma empresa, ou seja, monitoramento. Geralmente o período analisado é mensal e, posteriormente, anual. Utilizado para avaliação de ecoeficiência entre os períodos e comparativo individual de cada categoria de ecoindicador com as metas especificadas: redução de 10% nos ecoindicadores históricos, por exemplo. (Pereira, 2013).
2. Mesmo período para unidades diferentes de uma mesma empresa; desde que sejam utilizados os mesmos ecoindicadores e que estes sejam contabilizados de forma compatível. Isto auxilia na tomada de decisão de melhorias por ações de engenharia ou modificação de tecnologia, ou até mesmo ampliação (revamp), para as unidades de menor ecoeficiência.
3. Mesmo período para empresas diferentes; desde que sejam utilizados os mesmos ecoindicadores e que estes sejam contabilizados de forma compatível. Isto é chamado de *benchmark* empresarial.

Entretanto, para a avaliação de ecoeficiência geralmente as categorias de ecoindicadores são tabelas e algumas métricas são desenvolvidas para avaliação global, quase sempre uma média ponderal. Isto pode não ser o mais correto, devido às ordens de grandeza distintas entre alguns ecoindicadores.

Com base no exposto, o presente trabalho foi desenvolvido com o objetivo de propor um índice de comparação de ecoeficiência como ferramenta útil de avaliação global de ecoeficiência, monitoramento de processos e tarefas de tomada de decisão para aplicações na indústria.

### 3. METODOLOGIA

Nas seções que se seguem, são descritos os elementos para o método de comparação de ecoeficiência baseado no conjunto de ecoindicadores desenvolvidos pela empresa e agregados em um único sistema de coordenadas representado pelo gráfico radar (índice).

#### 3.1. Ideia Geral

Ecoindicadores são indicadores calculados pela relação de uma variável ambiental e uma variável econômica e devem apresentar informações simples, claras e objetivas. Entretanto, muitas vezes as informações isoladamente não têm representatividade quando é necessário fazer comparações entre empresas ou períodos diferentes, por exemplo. Uma solução para possibilitar essas análises seria a junção das informações fornecidas pelos indicadores em índices.

Ecoindicadores podem ser agrupados e padronizados para que seja possível a construção de gráficos radares que possibilitem a comparação de períodos diferentes para analisar o desempenho ambiental de uma unidade industrial, por exemplo.

Estes gráficos fazem o papel de índice e servem como ferramentas comparativas. Assim, o desempenho da unidade industrial em certo período pode ser comparado em relação a outro por meio da área do polígono, gerado no gráfico. No polígono formado, cada eixo de mesma origem representa um ecoindicador.

A empresa BASF desenvolveu um método em que os parâmetros ecológicos são representados em um mesmo sistema de coordenadas e sua ecoeficiência fornece apenas valores comparativos (Saling *et al.*, 2002). Em alguns aspectos, o método desenvolvido pela BASF é semelhante à proposta deste trabalho, principalmente no que diz respeito à ferramenta *ecological fingerprint*, uma vez que, neste, a ferramenta comparativa de ecoeficiência é baseada na plotagem dos dados em gráfico radar, e também pelo fato dos valores serem normalizados antes da plotagem.

Os gráficos do presente trabalho comparam ecoeficiência de um conjunto de ecoindicadores em períodos diferentes, funcionando como um índice. Isto é feito através da área formada pela figura poligonal do gráfico. Assume-se que todos os ecoindicadores apresentam o mesmo peso (importância), pois todos são operacionais.



Apadronização é realizada com base no adimensionamento muito utilizado em procedimentos numéricos em que cada variável é dividida por um valor de referência (o maior valor) que, neste caso, representa o pior cenário ambiental. Desta forma, será garantido que os valores dos ecoindicadores estarão na forma adimensional, eliminando as unidades de medida e os efeitos de escala e, portanto, apresentam-se inseridos em um intervalo padronizado entre ]0;1].

Assim, o pior valor para os indicadores normalizados é 1, que representa o pior cenário ambiental, e melhor será o valor quanto mais próximo de 0. Conseqüentemente, quanto menor a área apresentada no gráfico radar (que representa o conjunto de indicadores), melhor será o desempenho ambiental da planta petroquímica no período.

### 3.2. Área do Gráfico Radar

A área formada pela figura poligonal do gráfico radar foi calculada pela Lei dos Senos. De modo que esta área é dada pela soma das áreas dos  $n$  triângulos formados no gráfico.

Para este cálculo, é necessário conhecer os lados dos triângulos (aqui representados pelos valores dos ecoindicadores de cada eixo do gráfico e os respectivos eixos adjacentes) e o ângulo formado pelo eixo e seu eixo adjacente (de maneira que todos os ângulos dos triângulos são iguais e conhecidos de valor  $2\pi/n$ ). A curva que limita o gráfico unindo os pontos dos eixos (valores dos eixos) representa o terceiro lado de cada triângulo, porém não tem significado para o cálculo.

Um exemplo da descrição acima é um gráfico que apresenta cinco eixos equidistantes ( $n = 5$ ), nos quais cada um representa um ecoindicador diferente, formando ângulos de  $72^\circ$  ( $2\pi/5$ ). Portanto, é composto por cinco triângulos cuja soma resulta no polígono convexo pentágono.

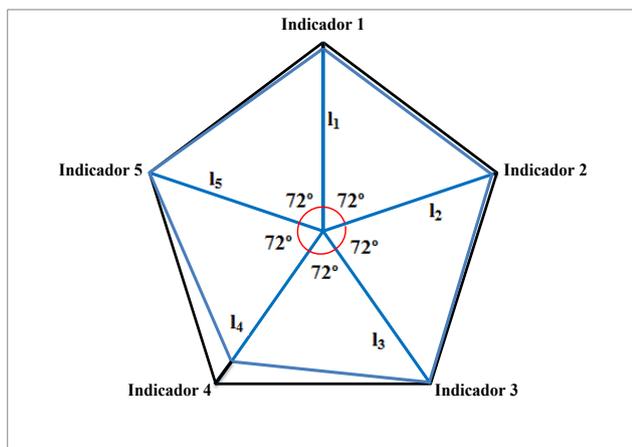


Figura 7. Representação do polígono no gráfico radar, para cinco categorias de indicadores.

Fonte: Pereira (2013).

A Figura 7 representa o exemplo da descrição supracitada de um pentágono formado pelos cinco triângulos disposto no gráfico tipo radar. Os lados dos triângulos são representados respectivamente por  $l_1$ ,  $l_2$ ,  $l_3$ ,  $l_4$  e  $l_5$ , que são os valores dos indicadores 1 até 5.

### 3.3. Lei dos Senos

Para calcular a área dos triângulos que formam o polígono destes gráficos de, pelo menos, 2 lados e 1 ângulo conhecidos, foi utilizada a Lei dos Senos.

A Figura 8 representa um triângulo ABC qualquer, de lados  $l_A$ ,  $l_B$  e  $l_C$  e apoiado sobre o lado  $l_C$ , apresenta altura  $h$ . O ângulo  $\theta$  é o ângulo formado pelos lados  $l_A$  e  $l_B$ .

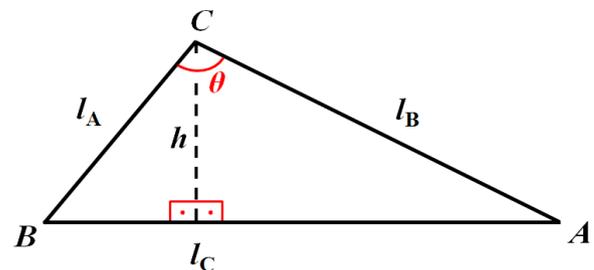


Figura 8. Representação do triângulo ABC qualquer.

Fonte: Abramowitz et Stegun (1972).

A área do triângulo pode ser calculada pelas Equações (1) e (2):

$$S_{ABC} = \frac{h \cdot l_C}{2} \quad (1)$$

$$S_{ABC} = \frac{l_A \cdot l_B}{2} \cdot \text{sen} \theta \quad (2)$$

A Equação (2) representa a conhecida Lei dos Senos, e será utilizada na metodologia proposta, uma vez que, ao disponibilizar os ecoindicadores pelo gráfico radar, são conhecidos apenas os lados e o ângulo central.

### 3.4. Cálculo da Área do Gráfico Radar

A Equação (2), apresentada anteriormente, pode ser aplicada para o cálculo dos triângulos que formam o gráfico radar que representa o índice o qual compara o desempenho ambiental de uma unidade industrial em períodos diferentes.

A padronização dos ecoindicadores é realizada pela divisão dos valores de cada mês (ou período) pelo mês (ou período) com o maior valor do respectivo ecoindicador



(o pior cenário), de forma que os valores padronizados apresentem-se em um intervalo ]0;1] e o mês (ou período) de pior desempenho apresentando, conseqüentemente, o valor 1. É considerado, nesta metodologia, que cada ecoindicador tem a mesma importância, peso. Portanto, a escala dos eixos do gráfico (cada eixo de mesma origem representa um ecoindicador) apresentam valores no intervalo ]0;1].

Aplicando a Equação (2) ao triângulo formado pelos lados  $l_1$  e  $l_2$  da Figura 7, por exemplo, tem-se a Equação (3).

$$S_2 = \frac{l_1 \cdot l_2}{2} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi}{5}\right) \quad (3)$$

Repetindo o procedimento para os triângulos  $S_{23}, S_{34}, S_{45}, S_{51}$  e somando estes ao  $S_{12}$ , obtém-se a área do pentágono ( $S_T$ ) formado, conforme apresentado na Equação (4).

$$S_T = S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_1 \quad (4)$$

Obtendo-se, assim, o índice de Ecoeficiência para os ecoindicadores considerados.

Para  $n$  ecoindicadores, a expressão da ecoeficiência pode ser generalizada pela Equação (5).

$$S_T = \frac{1}{2} \cdot \text{sen}\left(\frac{2 \cdot \pi}{n}\right) \cdot \left(l_1 \cdot l_n + \sum_{i=1}^{n-1} l_i \cdot l_{i+1}\right) \quad (5)$$

Entretanto, este índice só tem sentido prático quando houver ao menos dois conjuntos de ecoindicadores, uma vez que os valores adimensionais dependem dos valores máximos para cada categoria dentro dos conjuntos de ecoindicadores analisados.

Para apresentar o Índice Comparativo de Ecoeficiência, são ilustradas as Figuras 9 e 10. Estas figuras apresentam o índice (área do polígono) de ecoeficiência dos meses de março e junho de 2012, respectivamente, para os ecoindicadores padronizados de Consumo de Energia, Emissão de  $CO_2$ , Consumo de Água, Indústria (Pereira, 2013). A padronização foi calculada pelo valor acumulado do mês dos respectivos ecoindicadores, dividido pelo acumulado do mês de pior cenário para cada categoria no período de estudo.

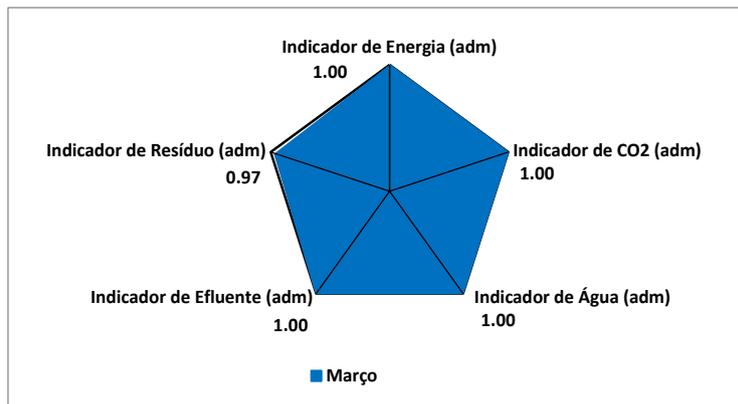


Figura 9. Índice de Ecoeficiência do mês de março de 2012.  
 Fonte: Pereira (2013).

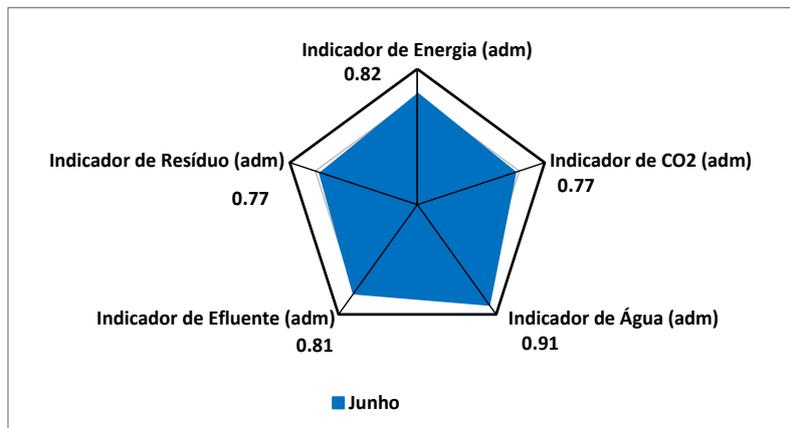


Figura 10. Índice de Ecoeficiência do mês de junho de 2012.  
 Fonte: Pereira (2013).



Para uma análise comparativa, é necessário avaliar os gráficos radares (índices) de períodos diferentes, por exemplo. Assim, será possível julgar se houve uma melhora ou piora na ecoeficiência ao longo dos períodos. O gráfico com maior área representa o pior cenário ambiental. A maior área possível para este gráfico é quando todos os eixos apresentam o valor 1, ou seja, todos os ecoindicadores se apresentam em seu pior cenário.

Portanto, se forem calculados pelas Equações (3) e (4), os valores de área (índice) dos meses de março e junho foram de 2,348 e 1,584, respectivamente. Ao compará-los, nota-se que houve um ganho em ecoeficiência do mês de junho em comparação ao mês de março de 2012, uma vez que a área total ( $S_T$ ) do polígono da Figura 10 é menor que a área do mês de pior cenário ambiental (que será representado por  $S_T^*$ ) do polígono da Figura 9.

Assim, apresenta-se a ferramenta do Índice Comparativo de Ecoeficiência – ICE – para contabilizar quantitativamente, este ganho em ecoeficiência, conforme Equação (6).

$$ICE = \left( 1 - \frac{S_T}{S_T^*} \right) \times 100\% \quad (6)$$

Que representa um ganho de 32,51% em ecoeficiência para o mês de junho, comparado ao mês de março.

A ferramenta ICE pode ser ampliada para quaisquer números de ecoindicadores e variações; e representa a contribuição deste trabalho à área de ecoindicadores.

#### 4. Resultados

Para melhor apresentar o método ICE, são disponibilizados na Tabela 1 os resultados apresentados por Pereira (2013) durante o monitoramento do processo com base nos ecoindicadores para uma indústria petroquímica, localizada no Brasil, em um período de estudo de 7 meses para os meses de março a agosto de 2012. O início do monitoramento foi no mês de abril, sendo os meses de fevereiro e março utilizados para avaliação histórica. Dentro deste período, não houve variação expressiva de produção.

Tabela 1. Cálculo da área polígonos normalizados acumulados em cada mês.

Categoria de Ecoindicadores	Fevereiro	Março	Abril	Maiο	Junho	Julho	Agosto
Consumo de Energia (GJ/t)	25,587	26,454	24,650	24,592	21,741	22,438	21,050
Emissão de CO <sub>2</sub> (t/t)	1,234	1,270	1,132	1,139	0,979	1,010	0,932
Consumo de Água (m <sup>3</sup> /t)	5,560	5,617	5,190	5,081	5,135	4,959	4,962
Geração de Efluente (m <sup>3</sup> /t)	1,611	1,885	1,622	1,608	1,528	1,499	1,508
Geração de Resíduo (kg/t)	5,086	4,926	4,003	4,056	3,903	4,397	4,161
Consumo de Energia (adm)	0,967	1,000	0,932	0,930	0,822	0,848	0,796
Emissão de CO <sub>2</sub> (adm)	0,972	1,000	0,891	0,897	0,770	0,795	0,733
Consumo de Água (adm)	0,990	1,000	0,924	0,905	0,914	0,883	0,883
Geração de Efluente (adm)	0,855	1,000	0,860	0,853	0,811	0,796	0,800
Geração de Resíduo (adm)	1,000	0,969	0,787	0,798	0,767	0,865	0,818
Índice (Área do Polígono)	2,173	<b>2,348</b>	1,835	1,825	1,584	1,664	1,543
ICE	7,43%	*	21,83%	22,25%	32,51%	29,12%	34,29%

\* Mês de referência (pior cenário). Fonte: Pereira (2013).

Na Tabela 1, são apresentados os ecoindicadores de Consumo de Energia, Emissão de CO<sub>2</sub>, Consumo de Água, Geração de Efluentes e Geração de Resíduos, bem como seus valores adimensionais, conforme discutido na metodologia. Dentre as cinco categorias de ecoindicadores, o mês de março apresentou os maiores valores, com exceção do ecoindicador de Geração de Resíduos (mês de fevereiro).

Durante o adimensionamento, o mês de março tem os valores para estes ecoindicadores 1, conforme também apresentado graficamente na Figura 9. Por isto, este é o mês tomado como referência para avaliação comparativa.

Desta forma, calculou-se o índice de cada mês pelas Equações (3) e (4), bem como foi possível calcular o ICE para os demais meses, tomando o mês de março como referência.



Pode-se observar, na Tabela 1, que houve um ganho de ecoeficiência a partir do monitoramento e utilização dos ecoindicadores e ferramenta ICE para avaliação de ecoeficiência e desempenho operacional do processo.

Pereira (2013) relata que diversos fatores contribuíram para a melhoria da ecoeficiência do processo:

- Monitoramento diário do processo através de ecoindicadores e suas relações com as demais variáveis de processo;
- Reuniões de grupos multidisciplinares (produção, processo, automação, meio-ambiente e operação) para melhor tomada de decisão;
- Conscientização sobre sustentabilidade;
- Engajamento das pessoas, principalmente do grupo de operação;
- Melhorias pontuais (não houve grandes investimentos);
  - Substituição de válvulas, com maiores chances de vazamento;
  - Ajuste em malhas de controle de segurança, para alívio para *flare*;
  - Detecção de vazamentos no sistema de água de refrigeração;
  - Detecção de vazamentos em linhas de vapor;
  - Detecção de vazamento nas linhas de efluentes;
  - Troca dos separadores de óleo/água, por modelos mais eficientes;
  - Calibração e utilização de instrumentos de medição redundantes para as principais variáveis dos ecoindicadores.
  - Substituição dos queimadores da caldeira para possibilitar a queima de combustível líquido – óleo combustível, subproduto do processo sem grande valor comercial, ou seja, mudança na matriz energética, diminuindo a importação de gás natural (combustível externo de custo elevado);
  - Melhor aproveitamento dos resíduos recicláveis, diminuindo o descarte.

Com os ecoindicadores, foi possível observar o processo produtivo globalmente e agir localmente, visando melhorias ecoeficientes. Isto contribuiu para uma produção sustentável.

A Ferramenta ICE foi fundamental para a contabilização dos avanços.

## 5. CONCLUSÃO

A ecoeficiência nas empresas tem se mostrado um grande desafio. Combinar o uso de recursos naturais com melhoria na qualidade de vida e da saúde ambiental é uma tarefa quase que incompatíveis. O papel das empresas é monitorar seu processo para tomada de decisões, de modo a diminuir sempre que possível o consumo de recursos naturais e o impacto ambiental. Ecoeficiência é baseada na avaliação de ecoindicadores.

Geralmente, a sustentabilidade ambiental não é claramente observada quando as avaliações são realizadas em um único indicador de ecoeficiência. Portanto, há a necessidade de desenvolver métodos de avaliação agregando conjunto de ecoindicadores, de modo a revelar o estado de um sistema ou fenômeno e servir de ferramenta para tomada de decisões.

A utilização de ecoindicadores no monitoramento do processo auxilia na tomada de decisões, sobretudo sustentáveis.

O desenvolvimento da ferramenta de comparação, que engloba o conjunto destes ecoindicadores, resultando no que aqui foi denominado índice de comparação de ecoeficiência – ICE – possibilita avaliar o desempenho ambiental em períodos diferentes, ou ainda, a comparação de unidades industriais diferentes em um mesmo período, desde que estas trabalhem com os mesmos ecoindicadores.

## 6. REFERÊNCIAS

- Abramowitz, M., Stegun, I. A. (1972), Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Tables, 9th printing. New York: Dover, 1046p.
- Bidoki, S.M., Wittlinger, R., Alamdar, A.A., Burger, J. (2006), "Eco-efficiency Analysis of Textile Coating Materials", *Journal of the Iranian Chemical Society*, Vol. 3, No. 4, pp. 351-359.
- Callens, I., Tyteca, D. (1999), "Towards indicators of sustainable development for firms A productive efficiency perspective", *Ecological Economics*, Vol. 28, No. 1, pp. 41-53.
- Charmondusit, K. (2009), "Development of eco-efficiency indicators for assessment of industrial estate", In: *International Conference on Green and Sustainable Innovation*. Chiang Rai, Tailândia, Dezembro.
- Charmondusit, K., Keartpakpraek, K. (2011), "Eco-efficiency evaluation of the petroleum and petrochemical group in the map Ta Phut Industrial Estate, Thailand", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 19, No. (1,2), pp. 241-252.
- Cote, R. P., Hall, J. (1995), "Industrial parks as ecosystems", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 3, No.(1, 2), pp 41-46.



Garcia-Serna, J., Pérez-Barrigón, L., Cocero, M. J. (2007), "New trends for design towards sustainability in chemical engineering: Green engineering", *Chemical Engineering Journal*, Vol. 133, No. (1-3), pp. 7-30.

Kharel, G.P., Charmondusit, K. (2008), "Eco-efficiency evaluation of iron rod industry in Nepal", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 16, No. 13, 1379-1387.

Lowe, E., Evans, L. K.(1995), "Industrial ecology and industrial ecosystems". *Journal of Cleaner Production* Vol. 3, No. (1, 2), pp 47-53.

Nordheim, E., Barrasso, G. (2007), "Sustainable development indicators of the European aluminium industry". *Journal of Cleaner Production*. Vol. 15, No. 3, p. 275 – 279.

Pereira, C., P. (2013), *Desenvolvimento e Avaliação de Índice de Comparação de Ecoindicadores em uma Unidade Industrial*, Dissertação de Mestrado em Engenharia Química, Universidade Federal Fluminense, Niterói, RJ.

Saling, P., Kicherer, A., Dittrich-Krämer, B., Wittlinger, R., Zombik, W., Schmidt, I., Schrott, W., Schmidt, S. (2002), "Eco-efficiency analysis by BASF: The method". *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 7, No. 4, pp. 203-218.

Siitonen, S., Tuomaala, M., Ahtila, P. (2001), "Variables affecting energy efficiency and CO<sub>2</sub> emissions in the steel industry", *Energy Policy*, Vol. 38, No. 5, pp. 2477–2485.

Veleva, V., Ellenbecker, M. (2001), "Indicators of sustainable production: framework and methodology". *Journal of Cleaner Production*. Vol.9, No.6, pp. 519-549.

Welford, R. (1995), *Environmental Strategy and Sustainable Development. The Corporate Challenge for the 21st Century*. London: Routledge, 224p.

World Business Council for Sustainable Development (WBCSD). 2000. In: *Measuring Eco-Efficiency: A guide to reporting company performance*. World Business Council for Sustainable Development, disponível em: <http://www.gdrc.org/sustbiz/measuring.pdf> (Acesso em: 08/06/2014).

Zhou, W., Zhu, B., Li, Q., Ma, T., Hu., S., Griffy-Brown, C. (2010), "CO<sub>2</sub> emissions and mitigation potential in China's ammonia industry", *Energy Policy*, Vol. 38, No. 7, pp. 3701–3709.



### NOMENCLATURA

Símbolo	Descrição	Unidade
$h$	Altura do triângulo	adm
$ICE$	Índice Comparativo de Ecoeficiência	%
$I_1$	Eixo 1 do gráfico radar que representam os lados do triângulo	adm
$I_2$	Eixo 2 do gráfico radar que representam os lados do triângulo	adm
$I_3$	Eixo 3 do gráfico radar que representam os lados do triângulo	adm
$I_4$	Eixo 4 do gráfico radar que representam os lados do triângulo	adm
$I_5$	Eixo 5 do gráfico radar que representam os lados do triângulo	adm
$I_A$	Lado do triângulo	-
$I_B$	Lado do triângulo	-
$I_C$	Lado do triângulo	-
$n$	Número de ecoindicadores	-
$S_{12}$	Área do triângulo que compõe o polígono do gráfico radar (eixos $I_1$ e $I_2$ )	adm
$S_{23}$	Área do triângulo que compõe o polígono do gráfico radar (eixos $I_2$ e $I_3$ )	adm
$S_{34}$	Área do triângulo que compõe o polígono do gráfico radar (eixos $I_3$ e $I_4$ )	adm
$S_{45}$	Área do triângulo que compõe o polígono do gráfico radar (eixos $I_4$ e $I_5$ )	adm
$S_{51}$	Área do triângulo que compõe o polígono do gráfico radar (eixos $I_5$ e $I_1$ )	adm
$S_{ABC}$	Área do triângulo ABC de lados $I_A$ , $I_B$ e $I_C$	-
$S_T$	Área total do polígono formado no gráfico radar	adm
$S_T^*$	Área total do polígono formado no gráfico radar – pior cenário	adm
$\theta$	Ângulo formado pelos lados $I_A$ e $I_B$	rad