

# DESENVOLVIMENTO DE ECOINDICADOR DE EMISSÃO DE CO<sub>2</sub> EM UMA UNIDADE INDUSTRIAL

*Camila Pesci Pereira<sup>1</sup>*

*Daniel Proaze Paes<sup>2</sup>*

*Diego Martinez Prata<sup>3</sup>*

*Luciane Pimentel Costa Monteiro<sup>4</sup>*

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo a criação de um indicador de emissão de CO<sub>2</sub> para uma unidade industrial, que será utilizado no acompanhamento diário da planta. Os valores de correntes de hidrocarbonetos e consumo de energia elétrica foram utilizados para o cálculo da emissão de CO<sub>2</sub> equivalente e juntamente com os valores de produção, pôde-se calcular o indicador de emissão de CO<sub>2</sub> em uma indústria petroquímica. Desta forma, o monitoramento e a possibilidade de redução das emissões por meio de ações de engenharia, além de contribuir para o desenvolvimento de um modelo de produção sustentável, agregarão valor ao processo e ao produto final, contribuindo no controle de emissões ambientais da planta e como exemplo para outras unidades industriais.

**Palavras Chave:** Eco-indicador, ecoeficiência, créditos de carbono.

## ABSTRACT

This work aims to create an indicator of CO<sub>2</sub>-emissions for an industrial unit, which will be used for daily monitoring of the facility. The values of hydrocarbon streams and electricity consumption were used to calculate the CO<sub>2</sub> equivalent emissions and along with the production values, we could calculate the CO<sub>2</sub> emission indicator in a petrochemical industry. Thus, the monitoring and the possibility of reducing emissions through engineering actions, besides contributing to the development of a sustainable production model, will add value to the process and to the final product, contributing to the control of environmental emissions from the plant and as an example for other industrial units.

**Keywords:** *eco-indicator, eco-efficiency, carbon credits.*

---

<sup>1</sup>camila\_@hotmail.com, Mestrado Eng. Química-UFF

<sup>2</sup>dproaze@hotmail.com, Eng<sup>o</sup> produção- Brasken

<sup>3</sup>pratadiego@gmail.com, Dept. Eng. química e petróleo-UFF

<sup>4</sup>lucianemonteiro@predialnet.com.br, Depart. Eng. Química e Petróleo-UFF

## 1-INTRODUÇÃO

A preocupação em torno do aquecimento global tem aumentado e com o passar dos anos mais tem se falado sobre os efeitos da emissão excessiva de gases poluidores na atmosfera, principalmente com respeito ao CO<sub>2</sub>, que embora não seja o gás mais potente, é um dos mais preocupantes devido à alta quantidade de emissão global. Além disso, o aumento da população e do consumo tem levado à tomada de novas medidas para a resolução dos problemas ambientais, que podem impactar no desenvolvimento econômico e social (Callens e Tyteca, 1999).

Segundo a *International Energy Agency* (IEA), melhorar a eficiência energética é uma das medidas mais promissoras para a redução da emissão global de CO<sub>2</sub>. Esta medida é a mais considerável para as indústrias, principalmente as ditas energeticamente intensivas, uma vez que elas representam um setor de alto consumo energético, cerca de um terço do consumo global de energia (IEA, 2008).

Algumas empresas, como, por exemplo, Dupont, Shell e P&G desenvolvem relatórios ambientais e indicadores de ecoeficiência para avaliar o impacto de suas atividades sobre o meio-ambiente (Azapagic e Perdan, 2000). Entretanto, esta prática resulta em uma variedade de métodos que dificultam uma uniformidade para que seja possível comparar os índices entre elas ou até mesmo entre setores industriais (Tahara et al., 2005).

Assim, fica evidente que há necessidade de um novo modelo uniforme preocupado com as questões ambientais e o gerenciamento dos impactos no meio ambiente.

Nesse sentido, o monitoramento dos impactos gerados pelo processo produtivo das empresas contribui para o desenvolvimento do requerido modelo, já que dessa maneira, pode-se qualificar e compreender os problemas, propor ações para a sua mitigação, e ainda, agregar valor ao processo e ao produto final.

O IEA estabelece no relatório do *World Energy Outlook* (WEO) de 2009 que em 2030, a economia de energia e redução da emissão de CO<sub>2</sub> alcançadas pelas políticas nacionais e medições comparadas para linha de base de emissões serão maiores no setor industrial do que em qualquer outro setor final de consumo energético. A maior redução da emissão comparada com a emissão de linha de base pode ser alcançada nos setores de ferro, aço e cimento: mais da metade da redução de energia global da indústria relacionada com a emissão de CO<sub>2</sub> (IEA, 2009).

Recentemente Brown et al. (2012) apontaram que 40% da emissão global de CO<sub>2</sub> é proveniente da indústria, como, por exemplo, as indústrias de ferro e aço, cimento e cerâmica, papel e celulose, alumínio, ferro, química e petroquímica.

A indústria petroquímica representa um dos mais importantes setores industriais no Brasil, por sua diversidade, complexidade e principalmente pelo volume de produção, que tende a se expandir nos próximos anos com novas construções de unidades petroquímicas e pólos integrados (Rio de Janeiro - Comperj, Ceará, Maranhão e Pernambuco). Em particular, as atividades da indústria petroquímica geram, intrinsecamente, emissões de grandes quantidades de CO<sub>2</sub> para atmosfera.

Na impossibilidade de eliminar totalmente a emissão de CO<sub>2</sub>, um eco-indicador de CO<sub>2</sub> em uma planta petroquímica brasileira foi desenvolvido neste trabalho para auxiliar no monitoramento e mitigação dos impactos das atividades desta indústria sobre o meio-ambiente, com dados de 2012.

O fato de existirem poucos trabalhos relatados sobre o desenvolvimento de ecoindicadores na área industrial talvez seja em parte devido às restrições de confidencialidade praticadas pelas indústrias, sendo esta uma motivação para o desenvolvimento deste trabalho.

Portanto, este trabalho tem por objetivos desenvolver um em

ecoindicador de CO<sub>2</sub> na indústria petroquímica, visando sustentabilidade, contribuir para o enriquecimento do material referente ao tema dentro da literatura e mostrar a possibilidade de atenuar o impacto ambiental proveniente das atividades da indústria sobre o meio ambiente.

## **2-ECONOMIA COM BAIXA EMISSÃO DE CARBONO**

Atualmente, é perceptível certa preocupação, por parte das empresas e organizações responsáveis, em melhorar a qualidade ambiental, não só no que diz respeito à emissão de CO<sub>2</sub>, mas também em diversos outros fatores que contribuem para a poluição de um modo geral.

Um bom exemplo que ilustra a iniciativa em buscar a adesão, por parte das empresas, em tornarem-se mais sustentáveis é a criação do Índice *Dow Jones* de Sustentabilidade (*Dow Jones Sustainability World Indexes* – DJSI). Este índice foi originado por meio de uma parceria entre a *Sustainable Asset Management* (SAM) e o *Dow Jones & Company* em 1999, no qual criaram o primeiro *benchmarking* de monitoramento das empresas líderes em sustentabilidade (Salgado, 2007).

O crescimento rápido da produção das indústrias levou ao inevitável aumento da emissão de CO<sub>2</sub>. Entretanto, atualmente há um esforço para reduzir esse potencial de emissão através de melhorias do processo industrial, campanhas e acordos internacionais (Liu et al., 2011).

Para desenvolver uma economia com baixa emissão de carbono algumas etapas precisam ser realizadas: mensurar, gerir, reduzir e ao final, conseguir a compensação das emissões de gases de efeito estufa (GEE). O Programa *Greenhouse Gas Protocol* Brasil (GHG PROTOCOL BRASIL, 2008) está relacionado com a etapa de mensuração.

A mensuração dos gases emitidos pelo negócio traz vantagens como:

- Cria vantagem competitiva em termos de ecoeficiência – expressão criada pelas organizações a partir do conceito de sustentabilidade, aplicada de modo a integrar os benefícios ambientais, econômicos e sociais – que mede o desempenho ambiental da organização com seu desempenho financeiro (*United Nations Conference on Trade and Development* – UNCTAD, 2004). Calculando e gerenciando suas emissões de GEE, a empresa garante sustentabilidade ao seu negócio trazendo melhorias aos seus processos.

- De acordo com o *GHG Protocol Internacional*, as informações podem ser aplicadas aos relatórios e questionários como o *Carbon Disclosure Project* (CDP), Índice BM&FBovespa de Sustentabilidade Empresarial (ISE) e *Global Reporting Initiative* (GRI), por exemplo.

- Redução da emissão de GEE por meio de ações agregando valor ao processo e ao produto final. Em países que assumiram o compromisso de reduzir as emissões de GEE através do Protocolo de Quioto há possibilidade de se estabelecer um “comércio de emissões”. Os países que reduzirem as suas emissões e estiverem abaixo da meta estabelecida podem comercializar esse excesso de capacidade (créditos de carbono) para países que não tiveram o mesmo êxito. Como o CO<sub>2</sub> é o gás em maior quantidade em relação aos outros GEE, dá-se o nome de “mercado do carbono” (Unidade de Redução de Emissão), conforme o artigo 6º do protocolo de Quioto, intitulado “Transferência e aquisição de Unidades de Redução de Emissões”.

As empresas passam a ter maior conhecimento de como seu negócio interfere no meio ambiente podendo se adiantar frente a futuras regulamentações ambientais que possam vir a surgir.

Através dessa análise do cenário, as empresas passam a serem capazes de estudar e promover medidas mitigadoras (Liu et al., 2011).

Dentro desse contexto, com o aumento da produção das empresas e o

surgimento da necessidade de se promover um desenvolvimento sustentável, tem-se a avaliação do desempenho ambiental de cada empresa como passo estratégico (Azapagic e Perdan, 2000; Cerdan et al., 2009). Para tal, usam-se ferramentas, como por exemplo, os indicadores ambientais.

### 3-INDICADORES E ECO-INDICADORES

A Organização de Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) no seu relatório sobre indicadores ambientais em 2002 define o indicador como sendo uma ferramenta de avaliação de um estado ou fenômeno, que deve ser completado com informações qualitativas e científicas para explicar fatores que originam uma modificação do valor desse indicador (OCDE, 2002).

A *European Environment Agency* (EEA) define os indicadores do seguinte modo: “(...) uma medida, geralmente quantitativa, que pode ser usada para ilustrar e comunicar um conjunto de fenômenos complexos de uma forma simples, incluindo tendências e progressos ao longo do tempo” (EEA, 2005).

A definição de Bossel (1999) diz que o indicador é um objeto do nosso dia a dia:

“Os indicadores são a nossa ligação ao mundo. Eles condensam a sua enorme complexidade numa quantidade manejável de informação significativa, para um subgrupo de observações que informam as nossas decisões e direcionam as nossas ações. (...) Os indicadores representam informação valiosa”.

Para Veleva e Ellenbecker (2001) o indicador é uma variável de uma representação operacional:

“O indicador pode ser considerado como uma variável, que é uma representação operacional do atributo

(qualidade, característica, propriedade) de um sistema”.

Segundo Veleva e Ellenbecker (2001), é possível, também, detectar as análises de tendências, análises comparativas além de elaborar relatórios sobre a conformidade ou as melhores práticas em gestão ambiental.

Um indicador deve ser utilizado para informar o desempenho ou mesmo, monitorar, de forma sintética, plantas e equipamentos, preservando o essencial dos dados originais e utilizando apenas as variáveis que melhor servem os objetivos e não todas as que podem ser medidas ou analisadas. Desta forma, a informação pode ser facilmente utilizada por *stakeholders*, políticos, gestores, grupos de interesse ou público em geral. Sendo assim, Lee e Dale (1998) recomendaram a utilização da informação pelos gestores na realização de correções de desempenho que visam melhoria contínua.

Em suma, os conceitos definidos para indicador se relacionam à medida que se referem à síntese de um fenômeno através de sua quantificação.

Os indicadores criados para reportar a ecoeficiência são chamados de ecoindicadores. Pela definição da UNCTAD, tem-se a definição dos ecoindicadores uma relação de uma variável ambiental e um elemento econômico, ou seja, um item ambiental dividido por um item financeiro. A UNCTAD descreve os três principais objetivos dos ecoindicadores (UNCTAD, 2004):

- Fornecer informação sobre o desempenho ambiental de uma empresa em relação ao seu desempenho financeiro.

- Melhorar a tomada de decisões, de modo que, o acompanhamento dos ecoindicadores e a informação que eles trazem ajudem na diretriz de decisões economicamente e ambientalmente seguras, além de permitir a avaliação dos impactos de suas decisões.

- Complementar as demonstrações financeiras, projetando os impactos de

problemas ambientais atuais e futuros sobre o desempenho financeiro.

A seleção de ecoindicadores adequados a um determinado processo é um dos passos mais importantes na avaliação do desenvolvimento sustentável na indústria (Nordheim e Barrasso, 2007).

Isto permite a organização com Sistema de Gestão Ambiental (SGA) avaliar a sustentabilidade de seu negócio em relação ao meio ambiente e às pessoas. Portanto, pode-se introduzir a metodologia para o cálculo do ecoindicador.

#### 4-METODOLOGIA

Diferentes abordagens para medição de ecoeficiência, com base em ecoindicadores, foram introduzidas na literatura por Tyteca (1996). Entretanto, conforme relatado por Oggioni *et al.* (2011) a maioria deles são indicadores simples (por exemplo, a razão entre duas variáveis: uma econômica e outra ambiental) que aproximam a ecoeficiência a uma perspectiva limitada, já que utilizam alguns poucos fatores do processo produtivo. Esta pode ser uma abordagem viável quando se deseja iniciar a implantação em alguma unidade industrial onde não há um acompanhamento quantitativo. Indicadores mais sofisticados (globais, por exemplo) podem, então, ser posteriormente desenvolvidos após a disseminação da cultura e do monitoramento.

A metodologia aplicada é baseada no recente trabalho de Siitonen *et al.*

(2010) que calcularam o indicador de CO<sub>2</sub> para uma indústria de produção de aço localizada na Europa. Para a indústria petroquímica inseriu-se emissões fugitivas para as válvulas de alívio para *flare*, uma das principais fontes de emissão.

Assim, tal método foi utilizado para o desenvolvimento de um ecoindicador de CO<sub>2</sub> em uma indústria petroquímica adotando o mesmo conceito de razão entre a quantidade total emitida de CO<sub>2</sub> equivalente (em toneladas) e a respectiva produção (em toneladas) dentro de um mesmo período, conforme a Equação (1):

$$I_{CO_2} = \frac{\text{Emissão de CO}_2 \text{ Equivalente}}{\text{Produção}} \quad (1)$$

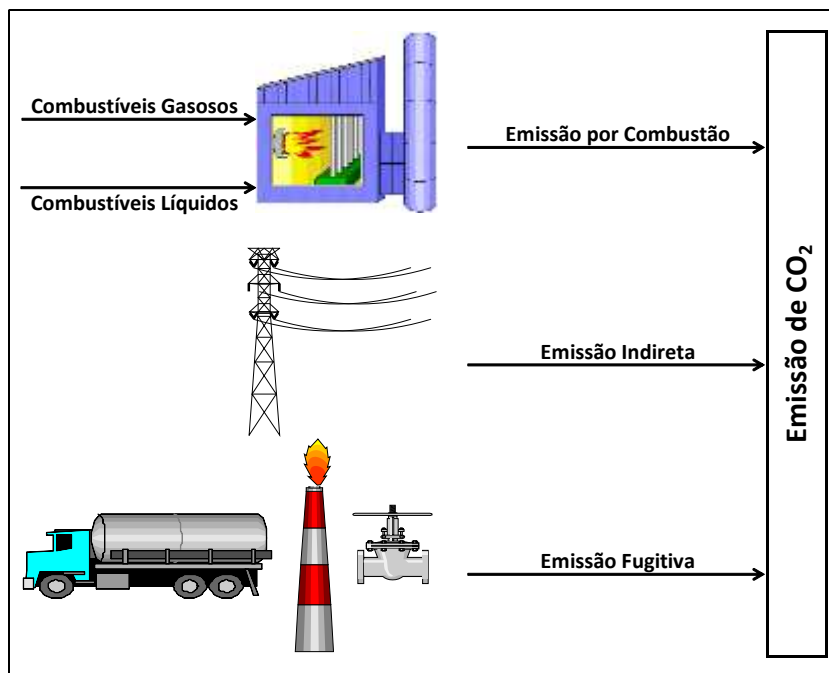
Desta forma é necessário entender quais são as fontes geradoras de CO<sub>2</sub> equivalente na planta petroquímica. Para isto segmentou-se em diferentes fontes emissoras conforme ilustrado na Figura 1.

Observa-se na Figura 1 a subdivisão das fontes emissoras quanto à procedência.

**Emissão por Combustão:** Proveniente da queima dos combustíveis gasosos e líquidos utilizados no processo.

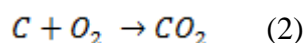
**Emissão Indireta:** Proveniente de fontes externas de energia (principalmente energia elétrica e vapor).

**Emissão Fugitiva:** Proveniente de pequenos e indesejados vazamentos em equipamentos (válvulas, flanges e etc.), de veículos de transportes de insumos e produtos, bem como, as emissões geradas por alívio para *flare*.



**Figura 1.** Segmentação das fontes de emissão de CO<sub>2</sub>.

Com exceção da emissão indireta, a geração de CO<sub>2</sub> pode ser generalizada com base na Equação (2) de conversão:



Assim, em todas as demais fontes é realizada a contabilização do CO<sub>2</sub> equivalente com base no chamado “pior cenário” onde se admite conversão total do hidrocarboneto à CO<sub>2</sub>.

Devido à variedade dos combustíveis utilizados, uma forma genérica de se obter o CO<sub>2</sub> emitido pela combustão é definida com base no percentual de carbono (%C) presente na corrente de hidrocarboneto ( $f_c$ ) e na estequiometria da Equação (2), onde a relação de 44/12 representa a razão de massa molar do CO<sub>2</sub> e carbono, resultando na Equação (3a):

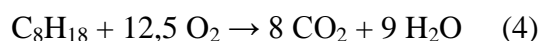
$$\text{Toneladas de } CO_2 = f_c \cdot \%C \cdot \frac{44}{12} \quad (3a)$$

Cabe ressaltar que esta equação é válida para hidrocarbonetos em que a composição seja conhecida. Deve-se ter cautela na contabilização de óleos combustíveis, misturas de hidrocarbonetos saturados e insaturados, por exemplo, C<sub>9</sub><sup>+</sup>, que pode ser queimado como combustível em caldeiras. Neste

caso pode-se assumir que todo o combustível é saturado (C<sub>9</sub>H<sub>20</sub>) e composto apenas de cadeias com 9 carbonos, mesmo sabendo que existem cadeias maiores e insaturações nas cadeias.

Uma contabilização equivalente quantidade de CO<sub>2</sub> por emissões diretas (queima de combustíveis líquidos e gasosos) é, também, possível por meio da estequiometria da reação de queima completa de hidrocarbonetos. Desta forma, pode-se relacionar a quantidade de CO<sub>2</sub>, em toneladas, presente na queima do combustível. Esta relação mássica ( $p_c$ ) é ilustrada na Tabela 1, onde apresentam-se os principais hidrocarbonetos queimados na indústria petroquímica.

Para explicar a metodologia, foi usada como exemplo a combustão da gasolina (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>), vide Equação (4):



Uma vez que a massa molar da gasolina (C<sub>8</sub>H<sub>18</sub>) é de 114 g/mol e a massa molar do dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) é de 44 g/mol, a relação mássica de CO<sub>2</sub> e hidrocarboneto queimado por combustão ( $p_c$ ) pode ser calculada conforme a Equação (5):

$$p_c = \frac{8 \cdot 44}{114} = 3,088 \text{ gCO}_2 / \text{g}_{\text{hidrocarboneto}} \quad (5)$$

Portanto, é possível calcular a quantidade mássica de CO<sub>2</sub> nos hidrocarbonetos que são queimados na planta, multiplicando-se  $p_c$  pela quantidade mássica de hidrocarboneto  $f_c$ , apresentada na Equação (3b):

$$\text{Toneladas de CO}_2 = f_c \cdot p_c \quad (3b)$$

**Tabela 1.** Principais hidrocarbonetos queimados na indústria petroquímica.

Hidro-carboneto	Reações de Conversão				P <sub>c</sub> (tCO <sub>2</sub> /t)
	Reagentes / Produtos				
Metano	CH <sub>4</sub> + 2 O <sub>2</sub> → CO <sub>2</sub> + 2 H <sub>2</sub> O				2,750
Etano	2 C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> + 7 O <sub>2</sub> → 4 CO <sub>2</sub> + 6 H <sub>2</sub> O				2,933
Propano	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> + 5 O <sub>2</sub> → 3 CO <sub>2</sub> + 4 H <sub>2</sub> O				3,000
Eteno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> + 3 O <sub>2</sub> → 2 CO <sub>2</sub> + 2 H <sub>2</sub> O				3,143
Propeno	2 C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> + 9 O <sub>2</sub> → 6 CO <sub>2</sub> + 6 H <sub>2</sub> O				3,143
Butano	2 C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> + 9 O <sub>2</sub> → 8 CO <sub>2</sub> + 10 H <sub>2</sub> O				3,034
Gasolina	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> + 12,5 O <sub>2</sub> → 8 CO <sub>2</sub> + 9 H <sub>2</sub> O				3,088
Óleo Combustível	C <sub>9</sub> H <sub>20</sub> + 14 O <sub>2</sub> → 9 CO <sub>2</sub> + 10 H <sub>2</sub> O				3,094
Gás Natural	Meta no	Etano	Propano	Butano	2,766
	0,900	0,056	0,035	0,007	

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos (basicamente metano, etano, propano e butano), e o seu  $p_{c(\text{Gás Natural})}$  pode ser estimado levando em consideração a composição destes hidrocarbonetos e seus respectivos valores de  $p_c$ . Podem-se usar os valores típicos encontrados na indústria petroquímica (vide Tabela 1, são os valores típicos da planta avaliada neste estudo), que resultam  $p_{c(\text{Gás Natural})} = 2,766$  (tCO<sub>2</sub>/t), ou utilizar análise em linha da concentração, se esta estiver disponível. Para fins práticos, pode-se considerar o gás natural como metano.

Para a contabilização das emissões indiretas, provenientes da compra de energia elétrica (CEE) em MWh, é usado o coeficiente médio do ano anterior de emissão de CO<sub>2</sub> por quantidade de energia elétrica  $\gamma_{\text{CO}_2/\text{MWh}}$  (Ministério da Ciência e tecnologia, 2013).

Assim a conversão é descrita na Equação (6):

$$\text{Toneladas de CO}_2 = \text{CEE} \cdot \gamma_{\text{CO}_2/\text{MWh}} \quad (6)$$

A emissão fugitiva é dividida em três partes: a primeira é referente ao inventário de emissões provenientes dos pequenos vazamentos indesejados e inerentes a gaxetas, selos e pontos de amostragem da unidade, que são determinados através de estudos anuais (os pontos de emissão podem chegar aos milhares); a segunda é proveniente da emissão de CO<sub>2</sub> dos veículos transportadores de insumos e produtos, e a terceira fonte é determinada por abertura das válvulas de alívio para *flare*.

A Equação (7) sintetiza os três tipos de emissões fugitivas:

$$\text{Emissão Fugitiva} = \text{Vazamento} + \text{Transporte} + \text{Flare} \quad (7)$$

Uma emissão fugitiva industrial por vazamentos é caracterizada por liberação difusa e não desejada de Compostos Orgânicos Voláteis (VOC) por meio dos seus equipamentos, na atmosfera. Nem sempre podem se detectadas por meio de inspeções visuais e requer equipamentos especiais, metodologia específica e pessoal devidamente capacitado para sua estimativa. Geralmente o monitoramento é realizado na medida de concentração de poluente, chamada de Valor Representativo de Concentração (VCR), que é a máxima concentração do poluente em torno da fonte de emissão fugitiva, detectada por um analisador portátil (Surprenant, 1990; Schaich, 1991).

Segundo Wallace (1979) em plantas industriais se destaca o monitoramento na fonte. O

monitoramento nas fontes pode ser pontual, onde toda emissão é concentrada num único ponto, ou não pontual, em fontes múltiplas, espalhadas por toda a planta.

São exemplos de fontes pontuais as chaminés de exaustão de fornos e caldeiras e alívios dos tanques de estocagem. São exemplos de fontes não pontuais múltiplas os equipamentos e componentes que integram o fluxo de transporte de produto dentro do processo, tais como: compressores, flanges, eixos de bombas e hastes de válvulas, sendo estas duas últimas as mais importantes. Ainda podem ser incluídos como fontes múltiplas os pontos de drenos e de amostragem da planta, onde a emissão ocorre durante a retirada da amostra (Wallace, 1979).

As emissões fugitivas são estimadas, geralmente por empresas especializadas nas principais fontes de emissões que utiliza um analisador de gases portátil para determinação de VOC, com características apropriadas, intrinsecamente seguro para operação em atmosferas explosivas e cuja calibração é feita em função do fluido a ser medido. A quantidade anual estimada é mantida fixa para o próximo ano (ou até outra avaliação), sendo contabilizada diariamente.

A Equação (7a) representa o cálculo da quantidade anual de emissão fugitiva por vazamento (EFV) de CO<sub>2</sub> em toneladas/dia.

$$EFV = \frac{f_{VFAnual}}{365} \cdot \gamma_{CO2/ptq} \quad (7a)$$

Onde  $f_{VFAnual}$  representa a estimativa da quantidade mássica de vazamento fugitivo de petroquímicos em toneladas (por exemplo, todos os encontrados na Tabela 1) por ano e  $\gamma_{CO2/ptq}$  é o coeficiente de emissão de CO<sub>2</sub> por quantidade de vazamento fugitivo de petroquímicos. Para fins práticos, considerando que na própria estimativa de  $f_{VFAnual}$  existe incerteza, e que são diferentes hidrocarbonetos, o valor de  $\gamma_{CO2/ptq}$  pode ser assumido constante.

Com base na Tabela 1, o valor de 3,00 tCO<sub>2</sub>/t é utilizado como aproximação para fins práticos. O valor de 365 no denominador representa a quantidade de dias no ano, para contabilização diária uniforme.

No transporte de produtos e insumos, geralmente por meio de transporte rodoviário em veículos pesados, carretas ou caminhão com peso superior a 15 toneladas (GHG PROTOCOL BRASIL, 2008), as emissões fugitivas são estimadas com base no combustível diesel e distância percorrida. São utilizados os valores de 2,761 kgCO<sub>2</sub> por litro de diesel e o consumo de 3,17 km por litro de diesel, (GHG PROTOCOL BRASIL, 2008). O fator direto de emissão de CO<sub>2</sub> (em toneladas) por distância percorrida (em km) pode ser obtido pela multiplicação da emissão de CO<sub>2</sub> por consumo de diesel pelo inverso do consumo de diesel pela distância percorrida, que é representado por ( $\gamma_{CO2/km}$ ) e corresponde ao valor de  $0,8426 \cdot 10^{-3}$  tCO<sub>2</sub>/km.

A Equação (7b) representa a emissão fugitiva por transporte (EFT) que contabiliza as emissões fugitivas de CO<sub>2</sub> em toneladas/dia por transporte dos  $n_t$  veículos de insumos e produtos, de acordo com suas respectivas distâncias  $S_l$  percorridas em km, em base diária.

$$EFT = \sum_{l=1}^{n_t} \gamma_{CO2/km} \cdot S_l \quad (7b)$$

A emissão fugitiva de alívio para *flare* (EFF) é descrita na Equação (7c).

$$EFF = \sum_j^{n_{flare}} \sum_k^{n_k} f_{flarej} \cdot C_{k/Flarej} \cdot P_{k,j} \quad (7c)$$

A Equação (7c) representa a estimativa da quantidade mássica de CO<sub>2</sub> em toneladas/dia, pela queima de hidrocarbonetos nas  $j$ -ésimas válvulas de *flare*, cuja vazão em toneladas de hidrocarbonetos por dia é representada por  $f_{flarej}$ , onde  $n_{flare}$  representa o número de válvulas.  $C_{k/Flarej}$  representa a composição mássica do hidrocarboneto  $k$



na corrente de  $f_{flarej}$ .  $P_{k,j}$  representa a relação mássica de  $CO_2$  e do hidrocarboneto  $k$  presente na corrente  $f_{flarej}$  e queimado no *flare*  $j$  (vide Tabela 1).  $k$  é o número de hidrocarbonetos presentes na corrente de  $f_{flarej}$ , onde  $n_k$  é o número de hidrocarbonetos. Como as válvulas de alívio para *flare* estão no topo de vasos, reatores ou colunas de destilação,  $n_k$  é considerado no máximo 2 (1 produto puro, 2 para corrente binária, no topo das colunas de destilação).

Para amostragens de 1 minuto ao dia, as vazões de hidrocarbonetos ( $f_c$ ) e ( $f_{flare}$ ) queimados nas caldeiras (emissão direta por combustão) e no *flare*, via válvula de alívio, (emissão fugitiva) podem ser calculados pelas Equações (9a) e (9b), respectivamente:

$$f_c = \sum_{i=1}^{n_{min}} m_{c,i} \cdot \Delta t \quad (9a)$$

$$f_{flarej} = \sum_{i=1}^{n_{min}} m_{flarej,i} \cdot \Delta t \quad (9b)$$

Nas Equações (9a) e (9b),  $\Delta t$  é intervalo de amostragem no dia (1min/dia) e  $n_{min}$  é o número de minutos ao longo do dia (1440 minutos) e  $m_{c,i}$  e  $m_{flarej,i}$  são as vazões mássicas de hidrocarbonetos amostradas em 1 minuto na caldeira e na  $j$ -ésima válvula de *flare*. A Equação (9a) é utilizada para todos os hidrocarbonetos queimados por combustão nas caldeiras.

Para a contabilização das emissões por alívio das válvulas de *flare* é necessária desenvolver um modelo matemático de cada válvula (seus parâmetros são intrínsecos, variando pelo tipo, dimensão e produto), uma vez que, por restrições de custos, as indústrias não dispõem de medidores mássicos (quantidade) e cromatógrafos em linha (concentração de cada componente) em cada linha de alívio para *flare*.

O alívio para *flare* ocorre na fase gasosa, por isso, é necessário desenvolver a modelagem da quantidade mássica de gás que passa através da válvula, considerando escoamento turbulento.

A Equação (10) é utilizada para estimar a vazão de gás através de uma válvula (Lipták, 2006).

$$m_{flare} = C_v \cdot N_6 \cdot F_p \cdot Y \cdot \sqrt{\Delta P \cdot \mu_1} \quad (10)$$

Na Equação (10),  $m_{flare}$  é a vazão mássica de gás através da válvula,  $F_p$  é o fator de geometria da tubulação, utilizado devido à diferença de diâmetro entre a válvula (menor) e a tubulação.  $Y$  é o fator de expansão e corrige a variação de massa específica do gás quando este passa através da válvula (gás é um fluido compressível).  $\Delta P$  é queda de pressão na válvula.  $\mu_1$  é a massa específica do gás à montante (subscrito 1) da válvula.  $N_6$  é uma constante para ajuste de unidades e tem o valor de 2,73 quando  $m_{flare}$  está em kg/h ou  $4,55 \cdot 10^{-5}$  para  $m_{flare}$  em t/min,  $\mu_1$  em  $kg/m^3$  e  $\Delta P$  em kPa, seus valores encontram-se tabelados (Lipták, 2006).  $C_v$  é o coeficiente de válvula, e para dimensionamento da válvula é considerado  $C_{vMáx}$  (coeficiente de válvula máximo, considerando abertura máxima da válvula), utilizado para descrever a capacidade de vazão de uma válvula. Para líquidos (fluidos incompressíveis), corresponde a passagem de 1 galão americano (3,79 litros) por minuto de água a 60 graus °F (15,6 graus °C) para a queda de pressão de 1 psi. A unidade do  $C_v$  é  $gpm/psi^{1/2}$  ( $gpm$  = galões por minuto). Para gases (fluidos compressíveis), corresponde a passagem de 1 pé cúbico padrão por hora (SCFH) de ar seco a 60 graus °F (15,6 graus °C) para a queda de pressão de 14,7 psi (1 atm). Entretanto,  $C_v$  varia em resposta a uma mudança na posição (abertura) da válvula, que depende do diâmetro da tubulação (onde a válvula está instalada) e da característica inerente de vazão da válvula (abertura rápida, linear ou porcentagem igual), sendo necessário obter a equação que o vincula com  $C_{vMáx}$  e a % de abertura da válvula. Esta relação pode ser encontrada em forma de tabela nos manuais de cada válvula, onde também se encontra o valor de  $C_{vMáx}$ . Deve-se adicionar a relação 0%  $C_v$  para

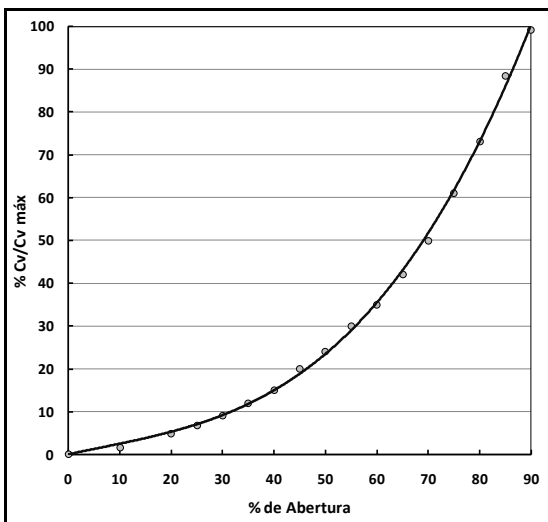
0% de abertura, que representa a válvula fechada, assumindo total vedação. Desta forma, com os valores tabelados é possível fazer uma regressão linear ou não linear nos dados, dependendo da característica da abertura da válvula e obter sua equação em função da abertura da válvula, ilustrada aqui, genericamente por  $f(\text{abertura \% válvula})$ . As Equações (11a), (11b) e (11c), representam as relações típicas de  $C_v$  com  $C_{v\text{Máx}}$  e o percentual de abertura das válvulas para características de abertura rápida, linear e porcentagem igual, respectivamente (Lipták, 2006).

$$C_v = C_{v\text{máx}} \cdot f(\text{abertura \% válvula})^{0.5} \quad (11a)$$

$$C_v = C_{v\text{máx}} \cdot f(\text{abertura \% válvula}) \quad (11b)$$

$$C_v = C_{v\text{máx}} \cdot f(\text{abertura \% válvula})^3 \quad (11c)$$

A Figura (2) ilustra uma relação típica entre  $C_v/C_{v\text{Máx}}$  e a abertura % da válvula de característica de porcentagem igual.



**Figura 2.** Relação típica de %  $C_v/C_{v\text{Máx}}$  e % abertura. Válvula Fisher Vee-Ball 200 de 8" e de abertura de porcentagem igual.

Em países que utilizam o Sistema Internacional (SI) é comum substituir  $C_v$  em  $\text{gpm}/\text{psi}^{1/2}$  por  $K_v$  em  $\text{m}^3/\text{h}/\text{bar}^{1/2}$ , considerando queda de pressão de 1 bar

na válvula (Lipták, 2006), a relação é definida na Equação (12):

$$C_v = 1,17 \cdot K_v \quad (12)$$

Assim, substituindo-se as Equações (11 a ou b ou c, dependendo do tipo de válvula), (10), (9b) em (7c) é possível estimar a vazão mássica de um gás através de uma válvula de alívio para *flare*. Para  $C_{k/\text{Flare}j}$  que representa a composição mássica do hidrocarboneto  $k$  na corrente de  $f_{\text{flare}j}$  na Equação (7c) é possível utilizar a composição de projeto (fins práticos) ou utilizar análise em linha da concentração, se esta estiver disponível.

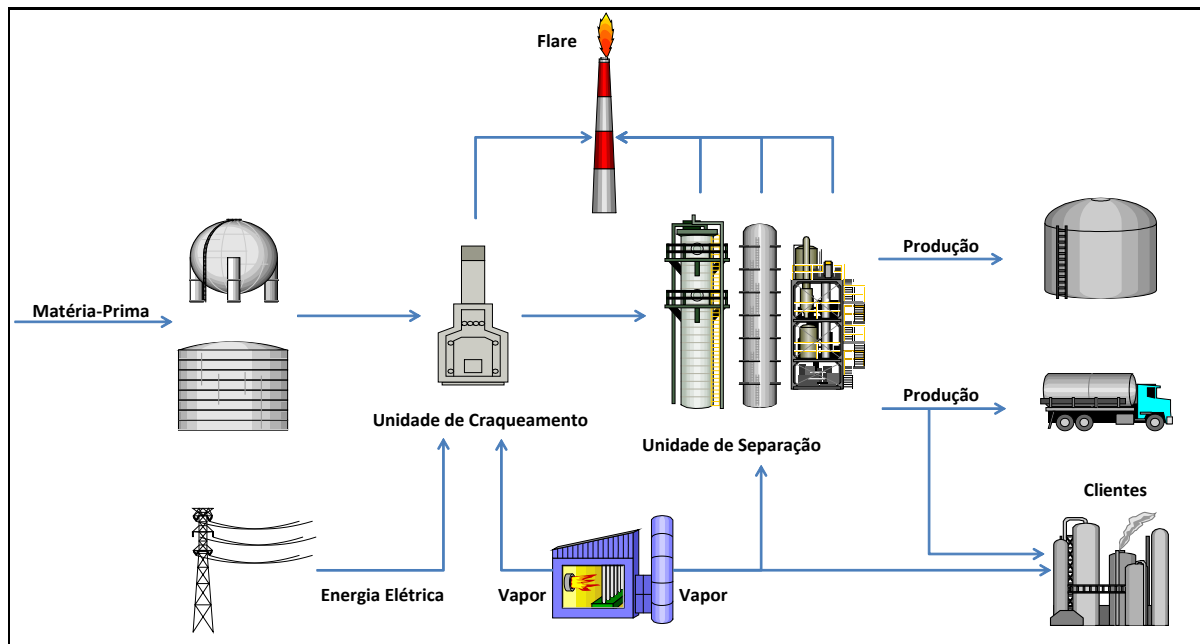
Assim, a soma das Equações (7a), (7b) e (7c), que resultam na Equação (7), determinam o valor mássico estimado das emissões fugitivas de  $\text{CO}_2$  em toneladas por dia (acompanhamento diário).

No caso de haver produção de vapor na unidade e esta vir a ser comercializada, a quantidade de  $\text{CO}_2$  gerada para produção deverá ser descontada da emissão total. Para isto, é contabilizada a quantidade de combustível necessária para a produção deste vapor, levando em consideração a eficiência da geração (caldeira, trocador, etc.), e então utilizada a Equação (3).

Desta forma, contabilizando as emissões diretas por combustão (combustíveis líquidos e gasosos), indiretas (proveniente da energia elétrica) e fugitivas (por vazamento, transporte e alívio de *flare*) é possível estimar a quantidade total mássica de  $\text{CO}_2$  equivalente gerado (em toneladas por dia), o que corresponde a soma das Equações (3b), (6), (7a), (7b) e (7c).

## 5-PROCESSO INDUSTRIAL

Com base na metodologia proposta foi desenvolvido o ecoindicador de geração de  $\text{CO}_2$  para uma indústria petroquímica, localizada no Brasil, ilustrada na Figura 3.



**Figura 3.** Diagrama simplificado da planta petroquímica.

Devido à condição de confidencialidade o processo será descrito de maneira sucinta. A matéria-prima (derivado de petróleo) é enviada para estocagem e depois processada na unidade de craqueamento, onde ocorre a reação de quebra da cadeia do hidrocarboneto (as moléculas originais dos hidrocarbonetos são quebradas, recombinadas ou modificadas) resultando nos produtos desejados. A corrente resultante é resfriada e segue para unidade de separação, onde há a separação dos produtos petroquímicos desejados por processos de compressão e destilação que podem ser enviados diretamente ao cliente ou armazenados para posterior envio. A produção é contabilizada diariamente e basicamente dividi-se na contabilização via dutos que é totalizada pelos medidores (em sua maioria do tipo mássico) e carretas (carregadas nas unidades de tancagem e armazenamento) por pesagem. Os combustíveis gasosos ou líquidos enviados à caldeira geram vapor que juntamente com a energia elétrica e outros insumos (gás natural, nitrogênio, e outros) são utilizados por toda a unidade. Inerentemente ao processo produtivo de uma unidade petroquímica são gerados emissões de CO<sub>2</sub> como discutido na Seção 4 e desta forma contabilizada.

## 6-RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram coletados dados reais de uma planta industrial durante seis meses consecutivos. A aquisição dos dados é realizada por meio de uma interface de captura dos dados do sistema digital de controle distribuído (SDCD) da unidade que transfere esta informação para planilha em Excel<sup>®</sup>, com amostragens de 1 minuto ao longo do dia, onde os dados são previamente filtrados quanto a inconsistências (falhas de comunicação, valores negativos, dados corrompidos em geral) e em seguida é calculada a quantidade de CO<sub>2</sub> equivalente diariamente.

Para o cálculo do CO<sub>2</sub> equivalente por fonte direta de combustão são necessárias 5 variáveis que compõem a emissão por combustão (combustíveis líquidos e gasosos), especificamente, metano (CH<sub>4</sub>), gás natural, óleo combustível residual (C<sub>9</sub><sup>+</sup>), hidrogênio impuro, hidrogênio residual, queimados na caldeira. Os hidrogênios contêm metano em sua composição. É necessário saber a composição de metano na corrente de metano e de metano nas correntes de hidrogênio, respectivamente  $C_{CH_4/CH_4}$ ,  $C_{CH_4/H_2imp}$  e  $C_{CH_4/H_2res}$ . Para o

gás natural é necessário saber as composições de metano, etano, propano e butano nesta corrente, respectivamente  $C_{CH4/GN}$ ,  $C_{C2H6/GN}$ ,  $C_{C3H8/GN}$  e  $C_{C8H10/GN}$ . Para o óleo combustível residual, utiliza-se o valor de  $P_c$  apresentado na Tabela 1. Para o cálculo do  $CO_2$  equivalente por emissão em fonte indireta, é utilizada a energia elétrica consumida no qual é usado o fator médio  $\gamma_{CO_2/MWh}$  para a conversão de energia elétrica em  $CO_2$ , conforme apresentado na metodologia e que para o ano de 2011 corresponde ao valor de 0,0292 t $CO_2$ /MWh (Ministério da Ciência e Tecnologia, 2013).

Para a contabilização de  $CO_2$  equivalente por emissões fugitivas, são necessários o estudo anual de vazamentos, 15 variáveis que

contemplam o monitoramento das válvulas de alívio para *flare* (alívios de segurança de tanques, esferas, reatores e colunas de destilação), e o número de carretas de insumos e produtos, incluindo a distância média percorrida e o tipo combustível, conforme detalhado na metodologia.

A quantidade total de emissão de  $CO_2$  (combustão, indireta e fugitiva) é contabilizada e dividida pela produção diária (vide Equação 1).

Assim, o ecoindicador de  $CO_2$  para uma unidade petroquímica foi desenvolvido e os resultados diários obtidos para seis meses consecutivos são apresentados nas Figuras 4 até 9.

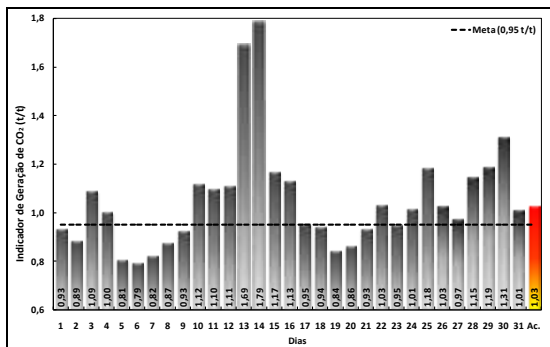


Figura 4. Indicador de  $CO_2$  ( $t_{CO_2}/t$ ) – Mês 1.

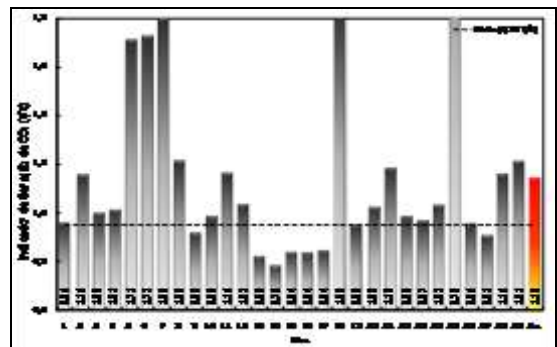


Figura 5. Indicador de  $CO_2$  ( $t_{CO_2}/t$ ) – Mês 2.

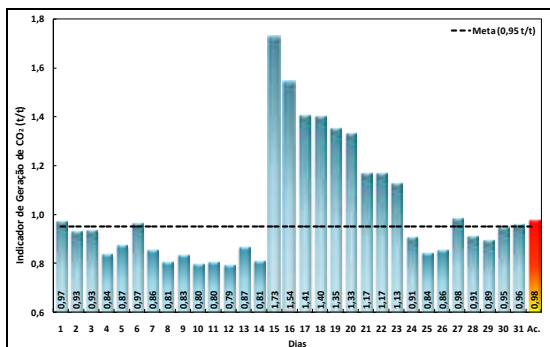


Figura 6. Indicador de  $CO_2$  ( $t_{CO_2}/t$ ) – Mês 3.

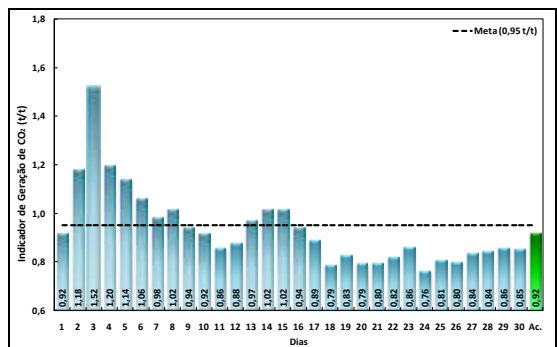


Figura 7. Indicador de  $CO_2$  ( $t_{CO_2}/t$ ) – Mês 4.

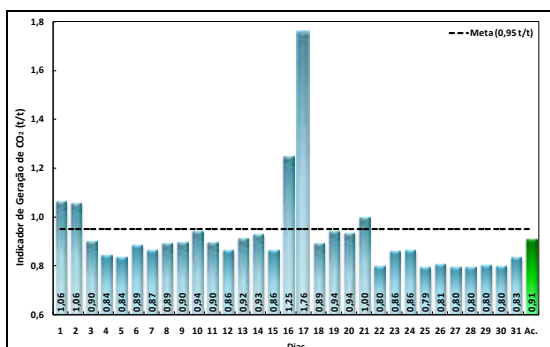


Figura 8. Indicador de  $CO_2$  ( $t_{CO_2}/t$ ) – Mês 5.

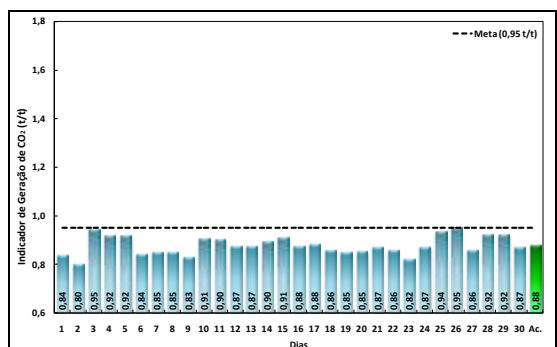


Figura 9. Indicador de  $CO_2$  ( $t_{CO_2}/t$ ) – Mês 6.

As Figuras 4 e 5 ilustram os dois meses anteriores à implantação da metodologia de acompanhamento do ecoindicador de CO<sub>2</sub>. São observados os valores diários para o ecoindicador de CO<sub>2</sub>, o valor acumulado (Ac.) do mês (ampliando-se o período de contabilização de diário para mensal) onde são contabilizadas toda a geração mensal de CO<sub>2</sub> e a produção correspondente. Os valores acumulados foram 1,03  $t_{CO_2}/t_{produto}$  e 1,15  $t_{CO_2}/t_{produto}$ , respectivamente. O total acumulado neste bimestre foi de 1,09  $t_{CO_2}/t_{produto}$  (este valor é obtido ampliando-se o período de contabilização de mensal para bimestral) onde são contabilizadas toda a geração bimestral de CO<sub>2</sub> e a produção correspondente. Estipulou-se uma meta de 0,95  $t_{CO_2}/t_{produto}$ , ou seja, gerar mais produto petroquímico do que CO<sub>2</sub> equivalente, com base no valor acumulado do primeiro bimestre.

Na Figura 4 os valores elevados para o indicador nos dias 13 e 14 são resultado da perda de especificação de um dos produtos com consequente envio para *flare* do produto, e diminuição da produção diária com inventário de produtos nas unidades de destilação antecedentes. Já nos dias 28, 29 e 30 houve redução de produção em virtude da indisponibilidade de matéria-prima. É necessário ajuste na produção, para redução adequada, e a unidade perde eficiência energética com carga baixa.

Na Figura 5 os valores elevados para o indicador nos dias 5, 6 e 7 são também decorrentes da perda de especificação em um dos produtos, com consequente envio para *flare*. Isto ocorreu devido à qualidade da matéria-prima recebida (teor de contaminante acima do especificado). Já no dia 18 ocorreu erro operacional, ajustou-se a produção para um nível menor, com mais recirculação. Especificamente no dia 25 ocorreu queda da caldeira, por problemas nos queimadores, foi necessário ajustar a matriz energética, reduzir a produção e realizar o envio para *flare* de matéria-

prima e produto. O indicador atingiu o valor elevado de 2,78  $t_{CO_2}/t_{produto}$ .

As Figuras 6 até 9 ilustram os meses de implantação do monitoramento do ecoindicador de CO<sub>2</sub> desenvolvido, com o intuito de mitigar por meio de ações de engenharia e engajamento das pessoas, com base nos princípios de sustentabilidades as emissões de CO<sub>2</sub>. Os valores acumulados foram de 0,98  $t_{CO_2}/t_{produto}$ , 0,92  $t_{CO_2}/t_{produto}$ , 0,91  $t_{CO_2}/t_{produto}$  e 0,88  $t_{CO_2}/t_{produto}$ , respectivamente. São observados os valores diários para o ecoindicador de CO<sub>2</sub>, o valor acumulado (Ac.) do mês e a meta de 0,95  $t_{CO_2}/t_{produto}$ .

Na Figura 6 os valores elevados para o indicador dos dias 15 até 23 são resultantes da redução brusca de produção devido à obstrução de um trocador de calor de grande porte. Foi necessário intervenção da manutenção e durante o período houve envio para *flare* que foi sendo minimizado até o retorno do equipamento. Neste mês foram realizadas as primeiras reuniões com as equipes de engenharia e elaborado um plano de ações mitigadoras.

Na Figura 7 o valor elevado para o indicador no dia 3 foi devido à atuação inadequada da malha de controle no topo de uma coluna de destilação com um dos produtos, com consequente envio de produto para *flare*. Neste mês foram realizadas mais três reuniões com a equipe de engenharia, com participação da operação para designação das ações do plano de melhorias. Na segunda quinzena deste mês ocorreu a troca dos queimadores da caldeira.

Na Figura 8 o valor elevado nos dias 16 e 17 foram decorrentes a parada brusca de uma das bombas elétricas de bombeio de produto. Grande parte da produção foi enviada para armazenamento, outra inventariada na própria unidade e uma parcela menor foi enviada para *flare*. A bomba principal turbinada estava em manutenção. Neste mês foram realizadas mais três reuniões com a equipe de engenharia, com

participação da operação para designação das ações do plano de melhorias.

Observa-se na figura 9 que não houve indicador diário de CO<sub>2</sub> elevado. Alguns fatores foram relevantes, como o aumento de produção de 9% (maior denominador reduz o indicador). Disponibilidade de matéria-prima, incluindo quantidade desta na unidade de armazenamento. Ajuste na matriz energética utilizando-se mais óleo combustível do que gás natural. Não houve eventos menores como quedas de bombas, entupimentos de trocadores ou ainda perda de especificação de produto. Não houve eventos maiores como quedas de compressores, caldeira, ou falha de interrupção súbita de energia elétrica.

A Tabela 2 mostra os valores do ecoindicador de CO<sub>2</sub> para cada mês e os valores acumulados a cada período para ilustrar melhor as melhorias obtidas ao longo destes quatro meses de monitoramento (os dois primeiros foram anteriores à implementação do ecoindicador de CO<sub>2</sub>).

**Tabela 2.** Monitoramento do ecoindicador.

Mês	tCO <sub>2</sub> / t produto	Período (meses)	tCO <sub>2</sub> / t produto Acumulado	Meta
1	1,03	-	-	0,95
2	1,15	1, 2	<b>1,09</b>	0,95
3	0,98	1, 2, 3	1,05	0,95
4	0,92	1, 2, 3, 4	1,02	0,95
5	0,91	1, 2, 3, 4, 5	1,00	0,95
6	0,88	Todos.	<b>0,97</b>	0,95

Observa-se na Tabela 2, a redução gradativa do ecoindicador mensal acumulado, durante os meses de monitoramento.

O valor acumulado do ecoindicador total foi de 0,97 tCO<sub>2</sub>/t<sub>produto</sub>, um valor maior do que meta estipulada de 0,95 tCO<sub>2</sub>/t<sub>produto</sub>, considerando os seis meses. Se fosse considerado o valor acumulado dos quatro meses de monitoramento o valor acumulado do ecoindicador no período equivale a 0,92 tCO<sub>2</sub>/t<sub>produto</sub> um valor menor ou igual aos últimos três meses e menor do que a meta estipulada de 0,95 tCO<sub>2</sub>/t<sub>produto</sub>.

Isto mostra que a metodologia de monitoramento e ações de melhoria com base no ecoindicador desenvolvido mostrou-se uma importante ferramenta na mitigação de emissões de CO<sub>2</sub> em uma unidade petroquímica.

Alguns fatores contribuíram para o resultado positivo, tais como:

- Ajuste e sintonia na malha de controle de uma válvula de alívio para *flare* na unidade de separação. Isto corresponde a um ganho em ambos: não redução da produção e menor geração de emissões fugitivas.

- Ajuste na operação da caldeira, evitando-se trabalhar com excesso de oxigênio. Para isto substituiu-se os queimadores antigos, de modo a aumentar a eficiência da caldeira, na impossibilidade de troca deste equipamento, sem grande investimento financeiro.

- Ajuste na matriz energética evitando-se consumir gás natural em excesso, optou-se por queimar mais óleo combustível na caldeira sempre que possível. Estuda-se a possibilidade de construção de mais um tanque de armazenamento de óleo combustível.

O gerenciamento é de suma importância e uma planilha de ações de engenharia foi também desenvolvida, permitindo acompanhar os valores mensais e o acumulado. Em caso de não atendimento da meta a planilha calcula o quanto deverá ser a redução e conseqüentemente a nova meta, para cada mês posterior, e com isto é possível prever se as ações de engenharia propostas, cada uma com seus respectivos ganhos, serão suficientes.

Um resultado importante foi o trabalho em grupo entre engenharia, operadores e pesquisadores, bem como a disseminação da cultura com base no modelo sustentável. Embora, tratando-se de melhorias em processos industriais exista a expectativa de grandes modificações, os resultados mostraram que pequenos ajustes também são significativos com uma redução de 11% nas emissões (1,09 tCO<sub>2</sub>/t<sub>produto</sub> para 0,97

$t_{CO_2}/t_{produto}$ ), sem grandes investimentos financeiros.

## 7-CONCLUSÃO

O indicador de emissão de gases CO<sub>2</sub> para uma planta petroquímica foi satisfatoriamente desenvolvido, com base em uma metodologia simples; entretanto de grande extensão, consolidando muitas variáveis do processo. Os resultados mostram que o monitoramento diário foi introduzido na rotina operacional, após treinamento e conscientização dos operadores e engenharia sobre os princípios da sustentabilidade. Desta forma, modificações operacionais foram introduzidas, principalmente àquelas que dizem respeito às mudanças de hábitos referentes às ações sobre variáveis de controle e operacionais. A aceitação da metodologia por parte do comprometimento humano também é um fator importante que pode ser implementado, tornando possível, futuramente, introduzir outras ações e modificações no processo de modo a melhorar continuamente o desempenho no tocante a mitigação da geração e controle de emissões ambientais, o que agrega valor ao processo e ao produto final.

Os dados históricos poderão ser utilizados para inferir a ecoeficiência desta unidade em relação ao desempenho próprio e com outras unidades do ramo, uma vez que a metodologia pode ser reproduzida.

## 8-REFERÊNCIAS

AZAPAGIC, A., PERDAN, S. Indicators of sustainable development for industry: A general framework. *Process Safety and Environmental Protection*, v. 78, n. 4, p. 243–261, 2000.

BOSSSEL, H. *Indicators for sustainable development: theory, method, applications: a report to the Balaton Group*, International Institute for Sustainable Development. Canada, 1999.

ENGEVISTA, V. 16, n. 2, p.204-220, Junho 2014

BROWN, T., GAMBHIR, A., FLORIN, N., FENNEL, P., *Reducing CO<sub>2</sub> emissions from heavy industry: a review of technologies and considerations for policy makers*. Grantham Institute for Climate Change - Imperial College London, n° 7, 2012.

CALLENS, I., TYYECA, D. Towards indicators of sustainable development for firms A productive efficiency perspective, *Ecological Economics*, v. 28, n.1, p. 41-53, 1999.

CERDAN, C., GAZULLA, C., RAUGEI, M., MARTINEZ, E., PALMER-I-FULLANA, P. Proposal for a new quantitative eco-design indicators: a first case study, *Journal of Cleaner Production*, v. 17, n.18, p. 1638-1643, 2009.

COMISSÃO MUNDIAL SOBRE O MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO. *Nosso futuro comum. Comissão Mundial sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento*, Editora da Fundação Getúlio Vargas, Rio de Janeiro, 1988.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY. *EEA core set of indicators – guide*, 2005.

GHG PROTOCOL BRASIL. *Contabilização, Quantificação e Publicação de Inventários Corporativos de Emissões de Gases de Efeito Estufa*, 2008. Disponível em: <<http://www.ghgprotocolbrasil.com.br>>. Acesso em: 23 jan. 2013.

IEA, 2008. In: *Energy Technology Perspectives 2008, Scenarios & Strategies to 2050*. OECD/IEA, Paris, p. 471-517.

IEA, 2009. In: *World Energy Outlook 2009, Part B. Post-2012 Climate Policy Framework*. OECD/IEA, Paris, p. 165-361.

- LEE, R., DALE, B. Policy deployment: an examination of the theory. *International Journal of Quality and Reliability Management*, v. 15, n. 5, p. 520-540, 1998.
- LIPTÁK, B.G. *Instrument Engineering Handbook: Process Control and Optimization*, volume 2. 4ª Ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. 2464 p.
- LIU, X., ZHU, B., ZHOU, W., HU, S., CHEN, D., GRIFFY-BROWN, C., “CO<sub>2</sub> emission in calcium carbide industry: An analysis of China’s mitigation potential”, *international Journal of Greenhouse Gas Control*, v. 5, n.5, p. 1240-1249, 2011.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA. *Fatores de Emissão*, 2013. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>>. Acesso em: 02 fev. 2013.
- NORDHEIM, E., BARRASSO, G. Sustainable development indicators of the European aluminium industry. *Journal of Cleaner Production*. v. 15, n. 3, p. 275 – 279, 2007.
- OGGIONI, G., RICCARDI, R., TONIELLI, R. Eco-efficiency of the world cement industry: A data envelopment analysis. *Energy Policy*, v. 39, n.5, p. 2842-2854, 2011.
- ORGANIZAÇÃO DE COOPERAÇÃO E DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO. *Rumo a um desenvolvimento sustentável: indicadores ambientais*. Tradução de Ana Maria Teles. Salvador: Série Cadernos de referência ambiental; v.9, 244 p, 2002.
- SACHS, I. Desenvolvimento Sustentável – desafio do século XXI. *Ambiente & Sociedade*, v. 7, n. 2, p. 214-216, 2004.
- SALGADO, V. G., *Indicadores de ecoeficiência e o transporte de gás natural*. Rio de Janeiro: Interciência, 2007. 117p.
- SCHAICH, J. R. Estimate Fugitive Emissions from Process Equipment, *Chemical Engineering Progress*, v. 87, n.8, p. 31-35, 1991.
- SIITONEN, S., TUOMAALA, M., AHTILA, P. Variables affecting energy and CO<sub>2</sub> emissions in the steel industry. *Energy Policy*, v. 38, n. 5, p. 2477-2485, 2010.
- SURPRENANT, N. Shutting off fugitive emissions. *Chemical Engineering*, v. 97, n.9, p. 199-202, 1990.
- TAHARA, K., SAGISAKA, M., OZAWA, T., YAMAGUCHI, K., INABA, A., “Comparison of ‘CO<sub>2</sub> efficiency’ between company and industry”, *Journal of Cleaner Production*, v. 13, n. 13-14, p. 1301-1308, 2005.
- TYTECA, D. On the measurement of the environmental performance of firms – a literature review and a productive efficiency perspective. *Journal of Environmental Management*, v.46, n. 3, p.281-308, 1996.
- UNITED NATIONS CONFERENCE ON TRADE AND DEVELOPMENT. *A Manual for the Preparers and Users of Eco-efficiency Indicators*, 2004.
- VELEVA, V. & ELLENBECKER, M. Indicators of sustainable production: framework and methodology. *Journal of Cleaner Production*. v.9, n.6, p. 519-549, 2001.
- WALLACE, M. J. Controlling fugitive emissions, *Chemical Engineering*, v.86, n.18, p. 78-92, 1979.



## Nomenclatura

Símbolo	Descrição	[Quantidade] e Unidade de Medida
$C$	Hidrocarboneto genérico	-
$\%C$	Concentração do carbono na corrente de hidrocarboneto	% mássica (t/t)
$CEE$	Compra de Energia Elétrica	MWh/dia
$C_{k/flare\ j}$	Concentração do hidrocarboneto $k$ na corrente $f_{flare\ j}$ do <i>flare</i> $j$	% mássica (t/t)
$C_v$	Coefficiente da válvula em função da % de abertura	gpm/psi <sup>1/2</sup>
$C_{v\ máx}$	Coefficiente máximo da válvula para 100% de abertura	gpm/psi <sup>1/2</sup>
$EFV$	Emissão Fugitiva por Vazamento	tCO <sub>2</sub> /dia
$EFT$	Emissão Fugitiva por Transporte	tCO <sub>2</sub> /dia
$f_c$	Vazão mássica de hidrocarboneto na corrente de combustão	t/dia
$f_{flare\ j}$	Vazão mássica de hidrocarboneto na corrente do <i>flare</i> $j$	t/dia
$EFF$	Emissão Fugitiva por alívio para Flare	tCO <sub>2</sub> /dia
$F_p$	Fator de geometria da tubulação	-
$f_{VAnnual}$	Quantidade mássica de vazamento fugitivo de petroquímicos anual	t <sub>petroquímicos</sub> /ano
$I_{CO_2}$	Indicador de emissão de CO <sub>2</sub>	tCO <sub>2</sub> /t <sub>produto</sub>
$I$	Contador de minutos no dia	-
$J$	Contador de válvulas de alívio para <i>flare</i>	-
$k$	Contador de componentes na corrente de hidrocarbonetos para <i>flare</i>	-
$l$	Contador de veículos de transporte de insumos e produtos	-
$C_{CH_4/CH_4}$	Concentração de metano na corrente de metano	[0,950] % mássica (t/t)
$C_{CH_4/H_2imp}$	Concentração de metano na corrente de hidrogênio impuro	[0,410] % mássica (t/t)
$C_{CH_4/H_2res}$	Concentração de metano na corrente de hidrogênio residual	[0,720] % mássica (t/t)
$C_{CH_4/GN}$	Concentração de metano na corrente de gás natural	[0,900] % mássica (t/t)
$C_{C_2H_6/GN}$	Concentração de etano na corrente de gás natural	[0,056] % mássica (t/t)
$C_{C_3H_8/GH}$	Concentração de propano na corrente de gás natural	[0,035] % mássica (t/t)
$C_{C_4H_{10}/GH}$	Concentração de butano na corrente de gás natural	[0,007] % mássica (t/t)
$m_{c,i}$	Vazão mássica de hidrocarboneto na corrente $f_c$ no tempo $i$	t/min
$m_{flare\ j,i}$	Vazão mássica de hidrocarboneto na corrente $f_{flare\ j}$ no tempo $i$	t/min
$N_6$	Constante numérica para ajuste de unidades	[4,55 · 10 <sup>-5</sup> ] -
$n_k$	Número de hidrocarbonetos na corrente $f_{flare\ j}$	-
$n_{flare}$	Número de válvulas de alívio para <i>flare</i>	[15] -
$n_{min}$	Número de minutos no dia	[1440] -
$n_t$	Número de caminhões	-
$P_c$	Relação mássica de CO <sub>2</sub> e de hidrocarboneto na corrente $f_c$	tCO <sub>2</sub> /t
$P_{k/flare\ j}$	Relação mássica de CO <sub>2</sub> e hidrocarboneto $k$ na corrente $f_{flare\ j}$	tCO <sub>2</sub> /t
$S_l$	Distância percorrida pelo caminhão/carreta $l$ (peso > 15t)	Km
$K_v$	Coefficiente da válvula em função da % de abertura	m <sup>3</sup> /h/bar <sup>1/2</sup>
$Y$	Fator de expansão do gás através da válvula	-
$\mu_{1j}$	Massa específica do gás na válvula para <i>flare</i> $j$ à montante <sup>1</sup>	kg/m <sup>3</sup>
$\gamma_{CO_2/km}$	Coefficiente de emissão de CO <sub>2</sub> por distância percorrida em km	[0,8426 · 10 <sup>-3</sup> ] tCO <sub>2</sub> /km
$\gamma_{CO_2/MWh}$	Coefficiente médio de emissão de CO <sub>2</sub> por quantidade de energia elétrica em MWh com base no ano de 2011	[0,0292] tCO <sub>2</sub> /MWh
$\gamma_{CO_2/ptq}$	Coefficiente de emissão de CO <sub>2</sub> por quantidade de vazamento fugitivo de petroquímicos em geral	[3,00] tCO <sub>2</sub> /t <sub>petroquímicos</sub>
$\Delta P$	Queda de pressão na válvula	psi/kPa
$\Delta t$	Intervalo de amostragem	[1] min/dia