

# **ANÁLISE DA CAPACIDADE DE AMORTIZAÇÃO DOS PASSIVOS ENERGÉTICOS E AMBIENTAIS DOS PAINÉIS FOTOVOLTAICOS**

Geraldo Lúcio Tiago Filho<sup>1</sup>

Carlos Adriano Rosa<sup>2</sup>

## **RESUMO**

O presente trabalho utiliza de ferramenta de análise do ciclo de vida para estudar os impactos ambientais decorridos desde a exploração das jazidas dos minerais utilizados na fabricação dos principais componentes até a fabricação do painel. A esse estudo é acrescentada a quantificação da emissão de diversos gases, emitidos no processo de fabricação do módulo fotovoltaico, expressos em Toneladas de CO<sub>2</sub> Equivalente, decorrente de todo o processo e em função do local, ou país, onde o painel é fabricado. Por fim, é feito estudo de amortização do passivo ambiental, de forma a permitir a determinação da sua vida útil como fonte de energia limpa, principalmente em função da sua origem, ou seja, de acordo com matriz energética do local, ou país, onde foi fabricado.

Palavras-chave: Amortização Energética, Passivo Ambiental , Energia Solar

---

1 Doutor em Engenharia Hidráulica, Mestre em Máquinas de Fluxo e Engenheiro Mecânico, IRN/UNIFEI –Av. BPS, 1303- Pinheirinho – Itajubá – CEP- 37500903 - Minas Gerais -(35) 3629 - 1443 - tiago@unifei.edu.br

2 Mestre em Engenharia da Energia, Engenheiro Eletricista CERPCH/UNIFEI - Av. BPS, 1303- Pinheirinho – Itajubá – CEP- 37500903 - Minas Gerais - (35) 3629 -1439 - adrianorosa@unifei.edu.br



## 1. INTRODUÇÃO

A afirmação de que o uso da energia solar através de painéis fotovoltaicos constitui uma fonte limpa de energia tem se consolidado ao longo dos últimos anos. Esta afirmativa tem como base, na maioria dos casos, a consideração apenas da geração de energia elétrica pelo painel depois de sua fabricação e instalação. Porém, quando é levado em conta que para ser fabricado e até que esteja pronto para o funcionamento é necessário que uma série de atividades seja realizada dentro de seu processo de fabricação, de acordo com a matriz energética do país onde estas atividades são desenvolvidas, uma quantidade maior ou menor de emissões de CO<sub>2</sub> ocorrerá, além de outros tipos de degradações ambientais.

Utilizando-se de ferramentas de gestão ambiental, pode-se estudar estes impactos desde a origem do painel até o término de seu tempo de vida útil e com isto complementar a verificação da capacidade do módulo em amortizar das emissões de CO<sub>2</sub>. Os impactos causados por sua fabricação, além de amortizar a energia elétrica gasta no processo. Com isto é possível verificar a viabilidade ou não da produção e/ou operação dos módulos em um determinado local frente ao seu gasto energético, suas emissões de CO<sub>2</sub> e o seu potencial de amortização do passivo ambiental por ele gerado em sua fabricação, considerando todo o tempo de vida útil do painel fotovoltaico e os locais de fabricação e operação do módulo fotovoltaico.

## 2. OBJETIVO

O objetivo deste estudo é realizar uma análise da capacidade de amortização dos custos energéticos das emissões de CO<sub>2</sub> e do passivo ambiental gerados pela fabricação dos módulos fotovoltaicos.

## 3. METODOLOGIA

Não se pode considerar a qualidade ambiental como um custo, mas sim como algo rentável e inteiramente válido dentro do contexto das ferramentas de gestão ambiental. Entre as ferramentas utilizadas para avaliação ambiental existentes, as mais adequadas para o proposto neste estudo são a análise do ciclo de vida e o levantamento do passivo ambiental, aliadas a análise de amortização energética e ao levantamento das emissões de CO<sub>2</sub> do processo de fabricação do módulo PV.

Para o processo de fabricação de painéis fotovoltaicos, o que será levado em consideração são os aspectos de sua produção que causam as maiores cargas de passivo ambiental. Nestes termos, o levantamento será limitado pelos dados na literatura sobre os processos de fabricação das células fotovoltaicas de silício, do alumínio para a moldura do painel, a bateria de chumbo-ácido e do vidro plano utilizado sobre a placa de células de silício do painel. A inclusão da bateria de chumbo-ácido na análise é justificada em virtude dos riscos ambientais decorrentes da fabricação, utilização e deposição deste tipo de bateria.

A análise de ciclo de vida - ACV estuda os aspectos ambientais e impactos potencial a eles associados ao longo de toda a sua cadeia de produção desde a aquisição de sua matéria prima até a disposição, passando por sua produção e uso. Com estas características a ACV pode auxiliar na identificação de oportunidades de melhoria nos aspectos ambientais do produto em vários trechos de seu ciclo de vida. Além de auxiliar na tomada de decisões em indústrias e/ou organizações e na seleção de indicadores de desempenho ambiental, ou ainda no “marketing” do produto ou processo. Esta técnica possui um conjunto de normas oficializadas pela Associação Brasileira De Normas Técnicas (ABNT), as normas NBR ISO 14040, ISO 14041, ISO 14042, ISO 14043, ISO 14047, ISO1408, ISO 14049. A figura 1, Ometto (2005), mostra os principais estágios do ciclo de vida de um produto.

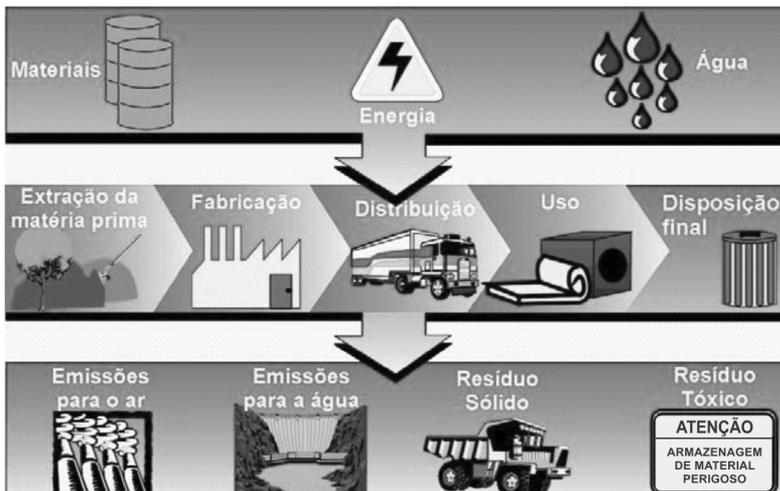


Figura 1 - Principais estágios do ciclo de vida de um produto



No caso analisado, o sistema foi limitado ao processo de produção da célula fotovoltaica, placa de vidro plano e a armação em alumínio (desde a extração de matéria prima até a montagem final do módulo fotovoltaico, com exceção dos dados relativos ao transporte de material). Este procedimento se justifica pela limitação das fronteiras do sistema analisado (produção de apenas quatro itens que compõe o painel) e devido à quantidade de estudos de ACV de painéis fotovoltaicos existentes na literatura. Sendo assim, não compete a este estudo trazer uma inovação em uma ACV de painéis fotovoltaicos, mas sim utilizar as já existentes na literatura como base de dados para alcançar o objetivo proposto.

Ao ser gerada, a eletricidade produzida pelo painel fotovoltaico não emite nenhum tipo de poluição ou gás de efeito estufa - GEE, além de utilizar uma fonte infinita para funcionar. Porém, mesmo que estes sejam benefícios de ordem ambiental consideráveis, para que um módulo fotovoltaico possa funcionar adequadamente é necessário gastar energia para se produzir energia e também para economizar energia. Este conceito, gastar pra economizar, recebe o nome de “amortização ou reembolso energético”, ou seja, quanto tempo um sistema fotovoltaico tem que operar para gerar a mesma quantidade de energia que foi gasta para sua fabricação, montagem, instalação e deposição ao final de sua vida útil. Outro termo utilizado neste tipo de análise é “*Energy Pay-Back Time*” ou simplesmente EPBT. Assim conhecendo-se a quantidade de energia necessária para se produzir o painel, é possível referenciar este resultado em emissões de CO<sub>2</sub> de acordo com a quantidade de CO<sub>2</sub>/kWh emitido pela fonte energética utilizada na produção dos módulos. Logo, de acordo com a matriz energética do país de origem, a fabricação do painel pode-se mostrar mais ou menos vantajosa em termos de impacto ambiental e de emissões de GEE. O mesmo ocorre com o país de destino, ou seja, país onde este painel irá operar, dependendo da qualidade de sua matriz energética o uso do painel como fonte “limpa” de energia pode se mostrar mais ou menos vantajoso.

De acordo com Alsema & Nieuwlaar (1997) o EPBT é definido por

$$EPBT = ER = \frac{\text{Eutilizada}}{\text{Economizada}} \quad (1)$$

Onde:

EPBT = ER -> Tempo de reembolso de energia

Eutilizada -> Contribuição de energia durante o ciclo de vida do

módulo, incluindo o uso de energia para fabricar e instalar, utilização de energia durante operação e deposição ao final da vida útil do equipamento.

Economizada -> É a economia de energia devido à energia elétrica produzida pelo painel durante seu funcionamento ao longo de um ano.

Para realizar as análises propostas, serão consideradas as matrizes energéticas de quatro países, a saber, Brasil, Japão, Alemanha e Estados Unidos da América. Salienta-se que no caso do Brasil, o país será dividido em dois subsistemas: o Sistema Interligado (BrasilSINT) e Sistema Isolado (BrasilSISO). Esta divisão se justifica devido a diferença da matriz energética utilizada por ambos, uma menos poluente (Sistema Interligado) e outra mais poluente (Sistema Isolado). A escolha destes países se justifica tanto pelo tipo de matriz energética que possuem, quanto pela produção de módulos fotovoltaicos nos mesmos.

Dentro do exposto, a análise energética servirá para comparar o processo de produção de painéis fotovoltaicos entre os quatro países: Brasil, Alemanha, Japão e EUA, verificando qual a viabilidade em se fabricar painéis fotovoltaicos em países com uma matriz energética similar a do Brasil em comparação com países que tem uma matriz energética similar a dos países analisados e vice-versa. Os resultados encontrados serão utilizados para verificar o equilíbrio energético, bem como o seu potencial de mitigação de  $\text{CO}_2$  e sua capacidade em amortizar o passivo ambiental gerado por sua produção em seu ciclo de vida. Deve ser considerada também a existência de um custo ambiental associado ao uso da energia gasta em sua produção e que esta energia afetará a estrutura ambiental de produção dos módulos fotovoltaicos. Além disto, impactos ambientais são causados ao longo de toda a cadeia produtiva do painel.

Um fato a ser considerado é o de que para calcular os efeitos de mitigação de  $\text{CO}_2$ , se os limites utilizados pelo ciclo de vida do sistema alcançarem apenas um nível nacional, os resultados podem se mostrar úteis dentro do processo nacional de mitigação de  $\text{CO}_2$ , mas podem não ser úteis para o processo de mitigação do conteúdo de gás carbônico da atmosfera em uma escala global. Quando a análise leva em conta um limite nacional é deixado de lado o fato de que os locais de produção e operação do módulo podem não ser os mesmos, principalmente quando se trata de um mercado global.

Embora os gastos específicos com energia elétrica para a produção



do módulo fotovoltaico não variem de modo considerável para a maioria das instalações industriais na sua fabricação, o mesmo não se pode afirmar sobre as emissões específicas de  $\text{CO}_2$ . Este fato ocorre porque estas emissões dependem muito do tipo de fonte de energia utilizada na geração de eletricidade de cada país, sejam elas de origem fóssil como as termelétricas, ou as de fonte renovável como as hidrelétricas ou ainda as nucleares. Assim, de acordo com a composição da matriz energética de cada país, tem-se um maior ou menor potencial de mitigação de  $\text{CO}_2$  pelos sistemas fotovoltaicos fabricados.

#### 4. RESULTADOS

Neste estudo foram levantados os processos de produção do alumínio, vidro e das células de silício, bem como a ACV de cada um destes processos para averiguação dos dados sobre o passivo ambiental, gastos energéticos e emissões ocorridas no processo de fabricação do módulo PV. O primeiro item a ser abordado é a fabricação do alumínio. A conversão do minério de alumínio, a bauxita ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), em alumínio primário é um dos processos industriais que mais consome energia no mundo. Salienta-se que no caso da extração de bauxita para a produção de alumínio, é necessário a extração de 4 a 5 toneladas de bauxita para se produzir 2 toneladas de alumina que por sua vez resulta na produção de 1 tonelada de alumínio primário. De acordo com o relatado por KIM et al (2000) o alumínio primário é produzido em três estágios:

1. Extração do minério de Bauxita;
2. Obtenção da Alumina em grau metalúrgico pelo processo Bayer, e
3. Obtenção do alumínio anodizado pelo processo Hall

O próximo item a ser abordado é a produção do vidro utilizado na fabricação do módulo fotovoltaico. No caso é utilizado o vidro plano temperado com baixo teor de ferro.

De acordo com KIM et al (2000), o processo passa pelas seguintes etapas:

1. Peneiramento dosagem e purificação das matérias primas básicas (Secagem);
2. Mistura;
3. Fusão;

4. Têmpera e estiramento;
5. Recozimento;
6. Acabamento, e
7. Corte.

Com relação a produção das células de silício, de acordo com o tipo de material semiconductor que forma as células fotovoltaicas, elas se classificam em diversos grupos. Os tipos mais comuns de células são as formadas de silício mono-cristalino (m-Si) e poli-cristalino (p-Si). O procedimento clássico de fabricação das células m-Si utiliza um método conhecido por Método Czochralski (Cz), que obtém o Si a partir do beneficiamento da sílica. A produção das células de m-Si segue os seguintes passos, de acordo com ALSEMA & NIEUWLAAR (1997):

1. Mineração e refino de sílica;
2. Redução da sílica para silício;
3. Produção de Silício de alto grau de pureza;
4. Produção da célula de silício;
5. Montagem dos "Wafers" (bolachas) de Silício;
6. Gravação e texturização dos "wafers";
7. Formação do emissor P-N;
8. Metalização;
9. Camada anti-reflexiva;
10. Teste das células, e
11. Encapsulamento.

Assim, além dos levantamentos sobre a produção de alumínio, vidro e das células de silício, dentro do escopo deste estudo, cabe o levantamento sobre a produção e deposição das baterias de chumbo-ácido e o passivo ambiental gerado durante seu processo de fabricação e deposição destas após o fim de sua vida útil. Este procedimento é justificado pelo potencial de geração de passivos ambientais causados principalmente, pela deposição destas baterias no ambiente. Como estas baterias têm um ciclo de vida muito menor do que o dos painéis fotovoltaicos, de 2 a 5 anos, durante a vida útil do painel cerca de 4 baterias serão utilizadas e des-



cartadas no ambiente. Com isso uma série de problemas ambientais pode ocorrer e, portanto devem ser considerados com atenção.

No caso do Brasil, o país quase não possui reservas minerais de chumbo, assim para um posterior aumento de produção é necessário que o Brasil importe o chumbo primário ou secundário para garantir a produção. No caso da produção da bateria não será considerado a fase de extração de matéria prima (chumbo). O processo a ser considerado tem seu limite de estudo estabelecido a partir do recebimento dos lingotes de chumbo até a produção da bateria, passando pelas seguintes fases, Diniz (2001):

1. Refino do chumbo;
2. Produção do óxido de chumbo (empastação);
3. Processamento do óxido de chumbo;
4. Produção das placas;
5. Produção das grades de chumbo;
6. Processamento das placas;
7. Fabricação das conexões;
8. Fabricação da tampa e da caixa de polipropileno;
9. Fabricação dos separadores de polietileno, e
10. Montagem da bateria.

MINGACHO (2003), diz que a bateria de chumbo-ácido é um componente crítico de um sistema fotovoltaico autônomo. Isto ocorre porque as baterias deste tipo apresentam um consumo de energia entre 6,94 a 13,89 kWh/kg. As estimativas mais baixas são relativas apenas ao consumo energético associado consumo de materiais, não considerando a energia consumida durante o processo de manufatura da bateria que fica entre 2,5 e 4,44 kWh/kg. Para efeito de cálculo o valor adotado será o da média simples dos valores citados anteriormente. Logo para o consumo de material tem-se o valor médio de 10,42 kWh/kg e para o consumo durante o processo de manufatura o valor médio de 3,47 kWh/kg. Totalizando um consumo de 13,89 kWh/kg de bateria fabricada. Neste estudo é considerada uma bateria automotiva comum de 12 V de tensão e corrente de 45 Ah e um peso de 12 kg. De acordo com os valores admitidos para cálculo, o gasto energético para a fabricação de uma bateria será de:

$$12\text{K kg} \times 13,89 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 166,68\text{kWh} \quad (2)$$

O próximo passo é realizar a análise do equilíbrio energético e da mitigação do passivo ambiental gerado pela produção do módulo fotovoltaico, deste modo os aspectos ambientais relativos ao uso da energia empregada em sua fabricação devem ser considerados, já que de acordo com o tipo de energia utilizada no processo, diferentes tipos de impactos ambientais podem ser gerados. Além de um custo/benefício aceitável, a energia produzida pelo módulo durante sua vida útil deve ser maior do que a adicionada ao ciclo de vida deste para a sua produção.

No caso das células de silício foram consideradas as células mono cristalinas e poli cristalinas, já que foram estes os tipos de células utilizadas para a produção da maioria dos módulos nas últimas décadas. Assim, nos próximos anos, uma grande quantidade de módulos e de baterias estará com seu ciclo de vida finalizado e os materiais que formam estes sistemas serão lançados no ambiente, gerando os passivos ambientais pertinentes a cada componente do sistema. A seguir as tabelas de 1 a 9 mostram um resumo dos resultados obtidos para o reembolso energético e a mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> do processo de fabricação de um m módulo fotovoltaico padrão.

Tabela 1 – Características do módulo analisado

<b>Características do módulo PV</b>	
Comprimento módulo (cm)	105
Largura do módulo (cm)	54,6
Área do módulo (m <sup>2</sup> )	0,58
Perímetro do módulo (cm)	3,20
Área das células (m <sup>2</sup> )	0,49
Número de células	32
<b>Energia total do painel</b>	
Potência do painel [Wp]	74,00
Horas diárias de uso	6,00
Vida Útil estimada para o painel (anos)	25,00
Produção de energia durante 1 ano (kWh)	162,06



Os dados referentes aos gastos energéticos da fabricação do módulo PV foram obtidos na literatura e tomados de acordo com diversos autores, conforme a tabela 2 elaborada de acordo com WILD-SCHOLTEN & ALSEMA (2006), KIM et al (2000) e MINGACHO (2003). Estes valores foram recalculados, quando necessário, de acordo com os parâmetros utilizados pelo módulo estudado.

Tabela 2 – Levantamento do gasto energético da fabricação do módulo PV

<b>Gasto Energético (kWh)</b>			
<b>Material para montagem de um módulo fotovoltaico (dados por autor)</b>	<b>Patrícia C. Mingacho</b>	<b>Kim et al</b>	<b>Valor adotado</b>
Vidro (5,2 kg)	----	73,55	73,55
Alumínio (2,6 kg)	----	146,04	146,04
04 Baterias de chumbo-ácido (12 kg)	666,72	----	666,72
Produção das células e do módulo	<b>Wild-Scholten / Alsema</b>	<b>Kim et al</b>	----
Silício grau metalúrgico (32 células)	----	55,00	55,00
Silício semiconductor (32 células)	432,42	----	432,42
Célula de Silício e painel fotovoltaico			
<b>TOTAL [kWh]</b>			<b>1373,72</b>

Fonte: modificados.

Para o cálculo do reembolso energético foi utilizada a fórmula (1) e os dados das tabelas 1 e 2, e os resultados obtidos demonstram que o reembolso energético da produção do módulo fotovoltaico é dado por:

$$EPBT [\text{anos}] = E_{\text{utilizada}} / E_{\text{economizada}} = 8,48$$

Assim, o período necessário de funcionamento do painel para que ele possa amortizar seus gastos energéticos de produção é de 8,48 anos. Com isto restariam 16,52 anos de vida ambientalmente útil após o módulo atingir seu equilíbrio energético com relação aos gastos energéticos de sua produção.

Após estas considerações, resta ainda verificar a capacidade de mitigação do passivo ambiental e das de emissões de CO<sub>2</sub> gerados durante a produção do módulo.

Para analisar a capacidade do módulo fotovoltaico em equilibrar as emissões de  $\text{CO}_2$  de seu processo de produção, ou ainda sua capacidade em auxiliar na mitigação das emissões de  $\text{CO}_2$  na produção de energia, é preciso fazer um levantamento mais apurado tanto das emissões ocorridas em seu processo de produção quanto das emissões de  $\text{CO}_2$  das fontes energéticas utilizadas. Neste estudo serão consideradas tanto as emissões diretas (emissões advindas da produção do alumínio, vidro, das células fotovoltaicas, baterias de chumbo-ácido e durante a fabricação do módulo), quanto às emissões indiretas (emissões equivalentes de kg de  $\text{CO}_2/\text{kWh}$  emitido na geração da energia utilizada na produção do módulo).

Para o cálculo das emissões diretas de  $\text{CO}_2$  foram consideradas as emissões equivalentes de  $\text{CO}_2$  das fases de fabricação do alumínio, vidro, célula de silício e bateria de chumbo-ácido. Para obter as emissões equivalentes de  $\text{CO}_2$  destes processos foi utilizada a tabela 3 de conversão de algumas emissões para seu equivalente em kg de  $\text{CO}_2$ .

Tabela 3 - Conversão de alguns gases em kg eq -  $\text{CO}_2$ .

Tabela de equivalência de $\text{CO}_2$ (kg)			
Elemento	Kg $\text{CO}_2$ -eq/kg (kg)	Elemento	Kg $\text{CO}_2$ -eq/kg (kg)
SF <sub>6</sub>	24500	CFC-116	6200
SO <sub>2</sub>	270	Halon-1211	4900
NO <sub>2</sub>	270	Halon-1301	1900
CF <sub>4</sub>	6500	Tetracloroeto de Metila	1300
C <sub>2</sub> F <sub>6</sub>	9200	1,1,1 - Tricloroetano	100
N <sub>2</sub> O	270	HCFC - 123	90
CFC (hard)	7100	HCFC - 141b	580
CFC (soft)	1600	HCFC - 142b	1800
CFC-11	3400	HCFC - 124	440
CFC-12	7100	HCFC - 22	1600
CFC-13	13000	HFC - 125	3400
CFC-14	4500	HFC - 134	1200
CFC-113	4500	HFC - 152	150
CFC-114	7000	C	3,67
CFC-115	7000	-----	-----



O total de emissões diretas (ED) é o resultado da soma dos valores de emissão de CO<sub>2</sub> e de diversos outros gases, convertidos em seus equivalentes em CO<sub>2</sub>, durante a produção de materiais utilizados na fabricação do módulo. Para o cálculo de ED foi elaborada a tabela 4 montada de acordo com os valores de equivalente de CO<sub>2</sub> da tabela. 3

Tabela 4 - Cálculo de emissão direta em equivalente de CO<sub>2</sub> para a produção do módulo

<b>EMIÇÃO DIRETA EQUIVALENTE - CO<sub>2</sub> (kg)</b>	
Elemento	eq -CO <sub>2</sub> (kg)
Total parcial (Si)	3,714
Total parcial (Al)	18,324
Total parcial (Vidro)	3,943
Total parcial ( 4 Baterias)	115,200
Total emissões diretas – ED (kg eq. -CO <sub>2</sub> )	141,181

Para os cálculos das emissões indiretas, ou seja, as emissões de CO<sub>2</sub> provenientes da geração da energia elétrica necessária para a fabricação do módulo fotovoltaico, é necessário considerar o tipo de matriz energética utilizada para a geração desta energia. Para isto deve ser considerada a quantidade de CO<sub>2</sub> emitido para cada kWh de energia produzida em cada país analisado. Para isto é utilizado o chamado Fator de Emissão de CO<sub>2</sub> - (FE), este nada mais é do que a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida por kWh de energia gerada, de acordo com a matriz energética de cada país. Como mostrado na tabela 5, elaborada de acordo com os seguintes autores (1) Ministério de Minas e Energia, (2) Krauter & Ruther (2003), (3) EnergyStar (2006) [www.energystar.gov](http://www.energystar.gov) e (4) Tiago Filho et al (2006).

Tabela 5 – Composição dos fatores de emissão equivalentes em kg de CO<sub>2</sub>/kWh para a matriz energética de diferentes países

<b>País</b>	<b>Fator de Emissão de CO<sub>2</sub> da produção de eletricidade (kg-CO<sub>2</sub>/kWh)</b>
BrasilSINT	0,054(1)
Japão	0,439(2)
Alemanha	0,530(2)
EUA	0,703(3)
BrasilSISO	0,821(4)

Salienta-se ainda que, de acordo com o Departamento de Desenvolvimento Energético (DDE) do Ministério de Minas e Energia - MME, não estão disponíveis oficialmente um valor único relativo ao fator de emissão no Brasil, embora exista um estudo em andamento, realizado pelo MME, Ministério de Ciência e Tecnologia – MCT e pelo Operador Nacional do Sistema – ONS para constituir um FE dos subsistemas do Sistema Interligado – SIN para divulgação oficial.

A dificuldade em se obter o FE refere-se ao próprio Sistema Interligado - SIN que possui características diferenciadas dos sistemas elétricos de outros países onde foi elaborada a maioria das metodologias de cálculo de emissões. Sendo assim o valor utilizado para o FE do SIN refere-se a uma avaliação preliminar dos ganhos do MDL para o PROINFA, em um trabalho realizado pelo DDE/MME em conjunto com a Universidade de Salvador – UNIFACS, utilizando os dados de geração de 2003 do ONS. O valor médio do FE obtido foi 0,054 ton CO<sub>2</sub> / MWh.

Pra o Sistema Isolado, foi adotado um valor obtido pela média dos valores de emissão de CO<sub>2</sub> emitidos por uma termoeletrica padrão de 15 MW, em função do tipo de combustível utilizado, (TIAGO FILHO et al 2006).

Com os dados obtidos até agora é possível calcular os valores da quantidade de CO<sub>2</sub> emitido de acordo com a energia consumida na fabricação do módulo e a quantidade de CO<sub>2</sub> evitada com o funcionamento do módulo durante sua vida útil em cada país analisado. Para estes cálculos foi utilizada a seguinte metodologia:

### **1) Cálculo das emissões indiretas de CO<sub>2</sub> (EI):**

$$EI = FE \times GEM \quad (3)$$

Onde:

EI (Emissão Indireta) - Valor da emissão em kg equivalente de CO<sub>2</sub> relativo ao consumo total de energia da produção do módulo.

FE (Fator de Emissão adotado para o país) - Valores de emissão de kg equivalente de

CO<sub>2</sub> / kWh de energia gerada em cada país analisado;

GEM (Gasto de Energia do Módulo) – Valor do consumo total de energia para produção do módulo.



## 2) Cálculo das Emissões Diretas de CO<sub>2</sub> (ED):

De acordo com o valor obtido pela tab. 4 tem-se ED= 141,181 kg eq.-CO<sub>2</sub>.

## 3) Cálculo do total de emissões de CO<sub>2</sub> da produção do módulo (ET):

$$ET = ED + EI \quad (4)$$

Onde:

ET = total de emissões de CO<sub>2</sub> da fabricação do módulo PV

ED = Emissões diretas da fabricação do módulo PV

EI = Emissões indiretas da fabricação do módulo PV Utilizando os resultados obtidos monta-se a tabela 6 .

Tabela 6 – Total equivalentes de emissões de kg CO<sub>2</sub> /kWh da fabricação do módulo PV para diferentes países.

Emissão Total de GEE (kg eq - CO <sub>2</sub> / kWh)				
País de origem	FE <sup>(1)</sup> (kg-CO <sub>2</sub> /kWh)	GEM <sup>(2)</sup> (kWh/módulo)	EI = FE x GEM <sup>(3)</sup> (kg eq-CO <sub>2</sub> /módulo)	ET = ED + EI <sup>(4)</sup> (ED = 141,181)
BrasilSINT	0.054	1373,72	74,181	215,362
Japão	0.439		603,061	744,242
Alemanha	0.530		728,069	869,250
EUA	0.703		965,722	1106,903
BrasilSISO	0.821		1127,821	1269,002

Legenda:

(1) Fator de emissão; (2)gasto de energia por módulo;

(3)Emissões indiretas; (4) total de emissões

## 4) Cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> evitadas durante um ano de vida útil do módulo (EE):

Para este cálculo deve-se multiplicar o total de energia gerado pelo painel ao longo de um ano pelo fator de emissão de cada país. De acordo

com a tab. 1 a quantidade de energia gerada pelo painel durante um ano é de 162,06 kWh.

$$EE = 162,06 \times FE \quad (5)$$

Onde:

EE - total de emissões evitadas com a utilização do módulo PV durante um ano de funcionamento no país de destino

162,06 - energia produzida pelo módulo PV ao longo de um ano de funcionamento.

FE = fator de emissão do país de destino analisado

Como resultado dos cálculos efetuados, foi elaborada a tabela 7

Tabela 7- Emissões de CO<sub>2</sub> Evitadas pelo módulo PV durante um ano de seu ciclo de vida – EE

País	Emissões CO <sub>2</sub> evitadas pelo módulo durante 1 ano (kg-CO <sub>2</sub> )
BrasilSINT	8,751
Japão	71,144
Alemanha	85,892
EUA	113,928
BrasilSISO	133,051

### 5) Cálculo do equilíbrio do gasto energético, das emissões de CO<sub>2</sub> e do tempo de vida ambientalmente útil do painel fotovoltaico:

O equilíbrio de emissões de CO<sub>2</sub> é calculado tomando-se a quantidade de CO<sub>2</sub> gerada na produção do módulo e subtraindo este valor da quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> evitadas com a utilização do módulo durante de sua vida útil. Com este cálculo obtêm-se o saldo de emissões de CO<sub>2</sub> da fabricação do módulo PV. Um resultado com valor positivo revela que o módulo é capaz de mitigar o CO<sub>2</sub> gerado por sua produção, além de fazer com que a matriz energética local deixe de emitir um valor equivalente em CO<sub>2</sub>, através da geração de energia elétrica advinda de fontes fósseis. Já um valor negativo revela que o módulo não é capaz de mitigar o CO<sub>2</sub> emitido durante a sua produção e, portanto precisaria funcionar por um



tempo maior que seu ciclo de vida para alcançar o equilíbrio das emissões de  $\text{CO}_2$  de todo o processo.

Assim, para calcular quanto tempo o módulo precisa funcionar para que ele possa mitigar as emissões de  $\text{CO}_2$  é preciso dividir a quantidade total de emissões durante a produção (considerando o local de produção do módulo) pela quantidade de emissão de  $\text{CO}_2$  evitada durante um ano de funcionamento do painel (considerando o local de operação do módulo). Depois de calcular o tempo necessário para que o módulo possa mitigar as emissões de  $\text{CO}_2$ , é possível avaliar o tempo necessário para que o módulo possa cobrir tanto os gastos energéticos quanto os de mitigação de  $\text{CO}_2$ , de acordo com o país onde for fabricado e/ou instalado. Este cálculo é feito somando-se os resultados obtidos com o tempo de amortização dos gastos energéticos de produção calculado em 8,48 anos e o tempo necessário para mitigar as emissões de  $\text{CO}_2$  de cada caso.

Salienta-se que durante o funcionamento do painel estamos simultaneamente mitigando  $\text{CO}_2$  e amortizando a energia gasta em sua fabricação. Se o tempo de amortização de energia for maior que o tempo necessário para mitigar o  $\text{CO}_2$  emitido, prevalecerá o tempo de amortização de energia como sendo o tempo necessário para custear ambos os processos. Isto ocorre porque os processos de mitigação de  $\text{CO}_2$  e amortização de energia acontecem simultaneamente durante o funcionamento do painel fotovoltaico. Caso o tempo de mitigação de  $\text{CO}_2$  seja maior do que o tempo necessário para amortizar a energia, prevalecerá o tempo de mitigação de  $\text{CO}_2$  já que ao final deste o tempo necessário para amortizar a energia gasta na fabricação do módulo já terá sido amortizado graças a ocorrência em paralelo dos dois processos

Depois de calcular o tempo necessário para que o módulo possa mitigar as emissões de GEE é possível avaliar o tempo necessário para que o módulo possa cobrir tanto os gastos energéticos quanto os de mitigação da emissão dos GEE, de acordo com o país onde for fabricado e/ou instalado. Este cálculo é feito considerando-se a simultaneidade da ocorrência da mitigação de  $\text{CO}_2$  e da amortização da energia utilizada no processo, prevalecendo o maior valor entre ambos. Após a verificação do correto valor a ser adotado como tempo de amortização energético-ambiental pode-se, calcular o tempo de vida útil que restará ao módulo PV para que este produza energia depois desta amortização.

Observa-se que, nos cálculos citados acima, um tempo de vida ambientalmente útil com valor negativo significa que o painel não consegue equilibrar seu gasto energético e de mitigação de CO<sub>2</sub> durante sua vida útil e necessita funcionar por mais alguns anos (valor negativo obtido) para conseguir equilibrar os advindos de sua produção.

Resta ainda considerar um determinado tempo de uso do painel para que o mesmo possa custear ou ainda mitigar o passivo ambiental gerado pela fabricação do módulo fotovoltaico. Dentro do processo de fabricação do módulo fotovoltaico, foram levantados, com auxílio de uma “matriz de Keopold modificada”, 27 impactos ambientais decorrentes da fabricação do módulo fotovoltaico, incluindo as fases de extração de matéria prima, produção e montagem do módulo P.

Como nestas análises não se contempla um estudo de impactos ambientais detalhado, será adotado um tempo estimado de 2,5 anos do tempo de vida útil do módulo para custear os passivos ambientais gerados pela produção do módulo. Subtraindo este valor dos resultados obtido nos cálculos dos itens descritos acima, tem-se a tabela 8.

Tabela 8 – Tempo de vida ambientalmente útil (TVAU) do módulo PV após amortizações (emissões de CO<sub>2</sub>, energia de fabricação e passivo ambiental)

País ou local de destino do módulo PV	FE(1)	País ou local de origem do módulo PV				
		Brasilsint	Japão	Alemanha	EUA	Brasilsiso
Brasilsint	0,054	-2,11	-62,54	-76,83	-103,99	-122,51
Japão	0,439	14,02	12,04	10,28	6,94	4,66
Alemanha	0,530	14,02	13,84	12,38	9,61	7,73
EUA	0,703	14,02	14,02	14,02	12,78	11,36
Brasilsiso	0,821	14,02	14,02	14,02	14,02	12,96

(1) Fator de emissão em [kg-CO<sub>2</sub>/kWh] equivalente

De posse dos dados obtidos anteriormente, é possível a elaboração de gráficos que possibilitam tanto a verificação do TVAU de projetos de fabricação e operação de módulos fotovoltaicos, quanto a possibilidade de cálculos de adicionalidade para projetos de Mecanismos de desenvolvimento Limpo (MDL). De acordo com os dados da Tabela 8 foi elaborado o gráfico da Figura 2.

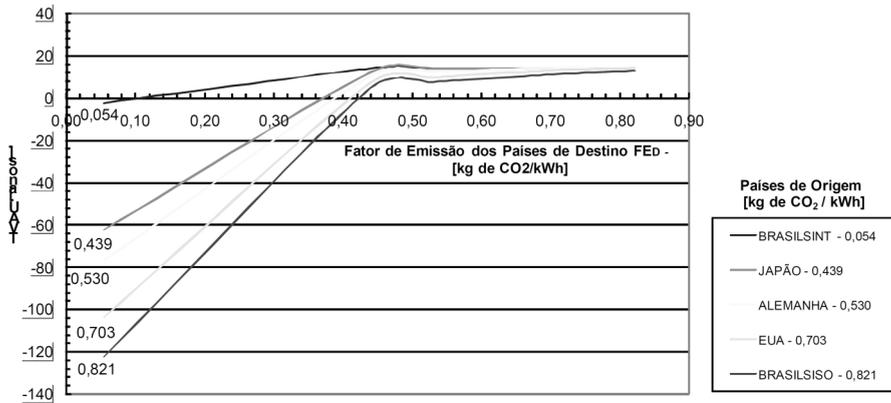


Figura 2 – Tempo de Vida Ambientalmente Útil-  $T_{VAU}$  do módulo PV padrão, com  $1\text{ m}^2$  de área considerando os Fatores de Emissão, FE, dos GEE dos países ou locais de origem-  $FE_o$ , e dos destino -  $FE_D$

O gráfico da figura 2 mostra que o tempo no qual o módulo PV é capaz de gerar energia limpa, ou seja, seu tempo de vida ambientalmente útil tende a diminuir quanto maior o FE do país de origem e menor o FE do país de destino. Os valores negativos de tempo significam que o módulo deve permanecer em funcionamento por um tempo maior do que os 25 anos de vida útil admitidos para o equipamento para amortizar os custos levantados. Neste caso, foi considerado que, em última instância, se o módulo for fabricado em um país com uma matriz energética totalmente limpa, ou seja, isenta de emissões de  $\text{CO}_2$  para a geração da energia elétrica necessária para fabricar o módulo, ainda resta ao painel amortizar os custos das emissões diretas de  $\text{CO}_2$  e que não estão relacionadas ao tipo de matriz energética empregada para a geração da energia utilizada na fabricação. Assim, cada país de destino deverá arcar com os custos de amortização de 2,5 anos para o passivo ambiental, 8,48 anos para amortizar a energia utilizada para a fabricação do módulo (EPBT) e um determinado valor em anos necessário para amortizar os 141,181 kg de  $\text{CO}_2$  de emissões diretas ocasionadas pela fabricação do módulo PV.

De posse das curvas da figura 2, pode-se calcular em cada caso os valores máximos em anos de vida ambientalmente útil para o módulo PV. Para calcular estes valores deve-se zerar o valor de  $E_0$  e  $E_D$  nas equações de tendências das curvas limite encontradas. Com os dados obtidos até o momento pode-se então formar um gráfico capaz de fornecer, de acordo

com o valor de E0/ED, o tempo, em anos, em que o módulo PV irá funcionar produzindo energia realmente “limpa”. Deste modo tem-se a Tabela 9 e o gráfico da Figura 3.

Tabela 9 - Valores de Tempo de Vida Ambientalmente Útil-  $T_{VAU}$  para o módulo PV Padrão para a relação  $FE_o/FE_D$

País de destino	Relação FEO/FED	País de Origem				
		Brasilsint	Japão	Alemanha	EUA	Brasilsiso
Brasilsint	FEO/FED	1	8,13	9,81	13,02	15,20
	TVAU anos	-2,11	-62,54	-76,83	-103,98	-122,51
Japão	FEO/FED	0,12	1	1,21	1,60	1,87
	TVAU anos	14,02	12,04	10,28	6,94	4,66
Alemanha	FEO/FED	0,10	0,83	1	1,33	1,55
	TVAU anos	14,02	13,83	12,38	9,61	7,73
EUA	FEO/FED	0,08	0,624	0,75	1	1,17
	TVAU anos	14,02	14,02	14,02	12,78	11,36
Brasilsiso	FEO/FED	0,07	0,53	0,65	0,86	1
	TVAU anos	14,02	14,02	14,02	14,02	12,96

Figura 3 - Tempo de vida ambientalmente útil versus relação dos fatores de emissão de GEE entre os países de origem e de destino –  $FE_o/FE_D$ .

A equação de tendência da curva da Figura 3 é dada por:

$$T_{VAU} = -9,497 \cdot \left( \frac{FE_o}{FE_D} \right) + 19,415 \quad (6)$$

Onde :

TVAU – Tempo e vida ambientalmente útil do módulo PV

$FE_o/FE_D$  – relação entre os fatores de emissão de  $CO_2$  dos países de Origem (E0) e de destino

(ED) do módulo PV.



Analisando a curva da figura 3 verifica-se que quanto menor a relação entre E0 e ED maior o tempo de vida ambientalmente útil do módulo. Quando o valor de ED levar a relação E0/ED a zero, ou seja, um valor de ED muito maior do que E0, tem-se a maior vantagem ambiental, deste modo a maior diferença ambiental na fabricação de módulos PV refere-se a diferença entre as matrizes energéticas dos países de origem e de destino do módulo. Fazendo com que o valor de E0/ED seja igual à zero, pode-se obter o maior valor de tempo de vida ambientalmente útil alcançado pelo módulo depois de amortizados os seus custos ambientais e energéticos. Neste caso o valor obtido é 19,41 anos.

No entanto, observa-se que na reta estabelecida pelo gráfico da figura 3, alguns pontos desta estão muito afastados da reta obtida. Isto ocorre, como citado anteriormente, graças a variação dos valores dos fatores de emissão de CO<sub>2</sub> dos países analisados. Deste modo existe a possibilidade da ocorrência de uma variação de valores causados pela interpolação quando da tomada de dados relativos ao gráfico citado.

Caso os valores de E0/ED sejam maiores do que os valores mínimos para que se obtenha algum valor positivo para TVAU (E0/ED = 2,0), o módulo não consegue amortizar os gastos citados acima e termina seu ciclo de vida com um prejuízo ambiental. Com os dados levantados, com o auxílio dos gráficos elaborados e também com a possibilidade de elaborar novos gráficos a partir dos dados e gráficos já existentes, é possível avaliar a viabilidade de projetos de fabricação e operação de módulos PV com relação ao seu tempo de vida ambientalmente útil. Conhecendo-se o FE da matriz energética do país de origem e do país de destino do módulo PV, é possível verificar se é ambientalmente viável ou não a fabricação e operação desejada para o projeto de módulos PV analisado, bastando, para isto, verificar os valores de tempo de vida ambientalmente útil através das tabelas e dos gráficos citados.

Outro fator chama a atenção com relação às curvas formadas pelos gráficos apresentados levam em consideração valores de FE de CO<sub>2</sub> em kg de CO<sub>2</sub>/kWh, versus TVAU em anos. A relação E0/ED indica o quanto o FE de CO<sub>2</sub> do país de origem (E0) pode ser maior ou menor do que o FE de CO<sub>2</sub> do país de destino (ED), ou seja, a variação relativa da quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> /kWh entre os países analisados. Logo, na Figura 3 tem-se a relação TVAU versus E0/ED, sabendo-se o valor de E0/ED e o número de anos em que será operado com o módulo PV gerando energia limpa

(TVAU), pode-se calcular qual é a adicionalidade alcançada com a utilização do módulo PV no país de destino comparado com o mesmo módulo se este fosse utilizado no país de origem. Para levar a termo estes cálculos, pode-se considerar a área abaixo da curva do gráfico citados na Figura 3. Quando tomada ano a ano, pode indicar o quanto maior ou menor é a quantidade de CO<sub>2</sub> evitado pelo módulo no país de destino, com relação ao que seria evitado com seu funcionamento no país de origem.

Considerando então a área abaixo da curva TVAU versus EO/ED, esta, encontrada de acordo com cada valor de TVAU, mostra como varia a produção de energia limpa de acordo com os valores de EO e ED. Com estas considerações é possível estimar a quantidade de CO<sub>2</sub> que seria “sequestrado” com funcionamento do módulo em determinadas condições, ou seja, usar o módulo em países com fator de emissão maiores do que o do país de origem é o mesmo que “sequestrar” o CO<sub>2</sub> emitido por sua fabricação, e dependendo da relação EO/ED agregar a vantagem de se evitar que uma determinada quantidade de CO<sub>2</sub> seja emitida com a geração da energia “economizada” pelo painel, “sequestrando” esta quantidade de CO<sub>2</sub> das centrais de geração de energia elétrica.

Com as informações obtidas anteriormente podem-se levantar os dados relativos ao cálculo da adicionalidade utilizada em projetos de crédito de carbono. A adicionalidade nada mais é do que a comparação entre a quantidade de CO<sub>2</sub> evitado com o uso de um determinado tipo de projeto de geração de energia elétrica e a quantidade de CO<sub>2</sub> que se evitaria caso um outro projeto de geração de energia elétrica fosse utilizado, ou seja, substituindo-se uma projeto de geração de energia elétrica por outro qual seria o ganho em kg de CO<sub>2</sub> evitado com esta substituição.

## 5. CONCLUSÃO

As considerações feitas ao longo de todo o estudo mostram que, até alcançar o consumidor final, a produção do módulo fotovoltaico produz uma série de passivos ambientais que devem ser considerados. Principalmente com relação à emissão de CO<sub>2</sub>.

Cada um dos impactos gerados possui um custo ambiental que deve ser amortizado, ou pelo menos passar por algum processo de mitigação ou compensação.



Apesar de amortizar seu custo energético em 8,48 anos, deve ser considerado que existem custos ambientais, dependendo do local de produção/operação que podem exigir um tempo para a amortização muito maior do que o tempo de vida útil do módulo PV.

As análises realizadas mostram que existe uma relação entre o fator de emissão de CO<sub>2</sub> dos países de origem e de destino considerados e o tempo de vida ambientalmente útil do módulo. Quanto menor o FE do país de origem do módulo PV e maior o FE do país de destino maior será o tempo de vida ambientalmente útil do módulo. A relação inversa também ocorre, ou seja, quanto maior o FE do país de origem do módulo PV e menor o FE do país de destino menor será o tempo de vida ambientalmente útil do módulo, sendo que, em alguns casos, pode ocorrer a inexistência de vida ambientalmente útil o que torna a operação do módulo ambientalmente inviável.

Entre as recomendações a serem feitas, vale a pena considerar que durante a aquisição de novos sistemas PV, estes passem antes por uma verificação do tipo de matriz energética utilizada no país de origem e/ou de destino para que se evite a possibilidade de utilização de um projeto de sistema PV que traga prejuízos ambientais não só para o país onde será fabricado ou utilizado, mas também para o restante do planeta, já que hoje os fatos são analisados também em seus aspectos de influência global.

Outra recomendação é a possibilidade de se utilizar os dados levantados para a elaboração de curvas que possam facilitar os cálculos de adicionalidade de projetos de Mecanismo de Desenvolvimento limpo - MDL que envolvam plantas com módulos PV, favorecendo a utilização dos módulos fabricados no BrasilSINT em outros países, desde que estes possuam uma matriz energética com FE maior do que a do BrasilSINT. Como os projetos de MDL permitem que os países do Anexo I do Protocolo de Quioto se beneficiem das reduções de emissões realizadas em países em desenvolvimento (países ou partes não pertencentes ao Anexo I do Protocolo de Quioto) não é esperado que projetos de sistemas fotovoltaicos possam se tornar elegíveis para aceitação em projetos de MDL. Neste caso cabe também a sugestão da formulação de sistemas fotovoltaicos em projetos de "MDL-Reverso", ou seja, se a utilização de módulos PV produzidos em determinados países não é capaz de mitigar a contento as emissões de CO<sub>2</sub> quando utilizados em países com menor fator de emissão, deve-se então criar projetos para redução de emissões de CO<sub>2</sub> a partir da produção destes

módulos em países com um baixo FE e sua utilização em países com alto FE, já que nestes casos existe um saldo relevante das emissões de CO<sub>2</sub> e a existência de um tempo de vida ambientalmente útil muito maior. Assim, o país do Anexo I do Protocolo de Quioto que precisa investir em projetos de redução de emissões de GEE faz seus investimentos de transferência de tecnologia em projetos de implantação de fábricas de sistemas PV em países não pertencentes ao Anexo I do protocolo de Quioto (países em desenvolvimento). No “MDL-Reverso” o país do Anexo I investe na transferência de tecnologia de produção de módulos em países não pertencentes ao Anexo I, porém os módulos devem operar nos países do Anexo I mitigando as emissões de GEE diretamente nestes países e não nos países em desenvolvimento como ocorre nos projetos de MDL.

Deve ser mencionado ainda que, com relação ao o custo de mitigação do passivo ambiental gerado pela fabricação do módulo PV, os dados levantados mostram que o tipo de matriz energética influencia de modo relevante o processo de amortização dos custos ambientais.

Como comentários finais, pode-se declarar que fica claro que a aquisição de sistemas PV exportados de países que possuam uma matriz energética com um FE maior do que a do Brasil, resulta em um prejuízo ambiental tanto maior quanto maiores forem os FE do país de destino dos módulos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alsema, Erik ; Nieuwlaar, Evert, (1997), Energy Pay-Back Time (EPBT) and CO<sub>2</sub> Mitigation Potential , apresentado a IEA PVPS 1 workshop. Aspectos ambientais de sistemas de força PV, Netherlands,1997

Diniz, Flamarion Borges. Acumuladores Moura: Desenvolvimento Tecnológico e Meio Ambiente. Estudos Universitários Revista de Cultura da UFPE, Recife, v. 22, n. 1, p. 89-100, 2001.

Kim, Mi Ra et al (2000). Ciclo de Vida de los Paneles Solares. Revista de Tecnologia y Ciencia – Universidad Tecnológica nacional nº13, p24-33, año 6, Republica Argentina, 2000.

Mingacho, Patrícia Catarina, (2003). Tipologia dos Impactes Ambientais Associados às Fontes de Energias renováveis. Lisboa, 2003. 210p. , relatório



de Trabalho Final de Curso para Licenciatura em Engenharia do ambiente – Universidade Técnica de Lisboa – Instituto Superior Técnico.

Ometto, Aldo Roberto, (2005). Avaliação do Ciclo de Vida e a Gestão Pós Consumo de Produtos Eletroeletrônicos. / Apresentado no 20 Mini-Curso do VI Workshop de Adequação Ambiental em Manufatura. 2005.

Tiago Filho, Geraldo Lúcio et al, (2006). Avaliação do Potencial de aplicação do MDL em Pequenos Aproveitamentos Hidroelétricos no estado de Minas Gerais. 15p. / apresentado no 6º Simpósio Brasileiro Sobre pequenas e Médias centrais Hidroelétricas. Florianópolis. 2006.

Wild-Scholten, Mariska J. de ; Alsema, E.A.; E.W. ter Horst, M. Bächler, V.M. Fthenakis, A cost and environmental impact comparison of grid-connected rooftop and ground-based PV systems, 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, 4-8 September 2006 – disponível online em: <http://www.photovoltaic-conference.com/>

Sites Consultados:

<http://www.mme.gov.br/> - Último acesso em: 15/11/2006

[www.energystar.gov](http://www.energystar.gov) - Último acesso em: 09/07/2006

<http://www.photovoltaic-conference.com/>