



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DA ENERGIA**

Carlos Adriano Rosa

**Estudo do Balanço Energético e do Passivo Ambiental Resultante  
da Fabricação do Módulo Fotovoltaico**

Dissertação apresentada a Universidade  
Federal de Itajubá para obtenção do título  
de Mestre em Ciências em Engenharia da  
Energia

Itajubá

- 2008 -

Carlos Adriano Rosa

**Estudo do Balanço Energético e do Passivo Ambiental Resultante  
da Fabricação do Módulo Fotovoltaico**

Dissertação apresentada a  
Universidade Federal de Itajubá  
para obtenção do título de Mestre  
em Ciências em Engenharia da  
Energia

Área de concentração:  
Planejamento Energético

Orientador:  
Prof.º Dr. Geraldo Lucio Tiago Filho

Itajubá

- 2008 -

Rosa, Carlos Adriano

“Estudo do balanço energético e do passivo ambiental resultante da fabricação de módulos fotovoltaicos”.

186p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.  
Engenharia da Energia

1 – Análise de ciclo de vida. 2 – Passivo ambiental. 3 - Mitigação de emissões de CO<sub>2</sub> 4 – Energia solar 5 – Matriz de impactos ambientais. I - Universidade Federal de Itajubá. Engenharia da Energia

### **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho primeiro a Deus que me proporcionou esta oportunidade e me capacitou para torná-lo possível, e também a minha esposa Ivonete e meu filho Juan que em todo tempo foram o melhor incentivo para a realização deste trabalho.

## Agradecimentos

Agradeço, acima de tudo, a Deus, por que Dele, por Ele e para Ele são todas as coisas.

A minha esposa Ivonete, pelo amor, dedicação, companheirismo e paciência em todas as fases do curso, principalmente pelo cuidado e dedicação ao nosso filho Juan Alex.

Ao meu filho Juan Alex que, juntamente com minha esposa, sempre foram o incentivo maior para continuar a caminhada.

Ao professor Geraldo Lúcio Tiago Filho, pelo incentivo para fazer o curso de mestrado e pelo zelo e paciência com que orientou meus estudos.

À Bióloga Msc. professora Tânia Aparecida de Souza Barbosa, pela sua participação e auxílio nas explicações sobre a matriz de Impactos ambientais, além do incentivo durante o curso de mestrado.

A todos os amigos CERPCH pelo auxílio prestado e pelas informações recebidas, que muito me auxiliaram durante os estudos.

A todos os amigos do PAEDA, em especial a Valdinea, Camila Fernandes e Patrícia Cristina, pelo apoio e compreensão durante todo o período do curso de mestrado.

A meus pais e aos pais de minha esposa e todos os familiares que sempre estiveram presentes nas horas em que precisei de auxílio.

A todos os colegas e funcionários do Instituto de Recursos Naturais que, direta ou indiretamente, contribuíram para tornar este trabalho possível.

A CAPES pela bolsa de Estudos.

As senhoras Maria Cristina Fedrizzi e Karen Gatti e aos senhores Ricardo Rütther, Glenn Switkes, Alexandre Ramos Peixoto, Augusto César C. de S. Machado, João Luiz Tedeschi, Nicolau Barros que contribuíram sobremaneira com seu conhecimento e informações e enriqueceram muito o conteúdo deste trabalho.

A todos vocês, a minha eterna gratidão seguida pelas bênçãos de Deus.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS .....	v
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS .....	x
LISTA DE SÍMBOLOS .....	xii
LISTA DE UNIDADES.....	xiv
RESUMO .....	xv
ABSTRACT .....	xvii
<b>CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1 - Problematização .....	2
1.2 - Justificativa. ....	3
1.3 - Objetivo do estudo .....	7
1.4 – Metodologia desenvolvida para o estudo.....	7
1.5 – Roteiro da monografia.....	8
<b>CAPÍTULO 2 – A ABORDAGEM AMBIENTAL.....</b>	<b>10</b>
2.1 – O Passivo Ambiental.....	10
2.2 – A Análise do Ciclo de Vida - ACV.....	11
2.3 – Desenvolvimento sustentável.....	12
<b>CAPÍTULO 3 – ENERGIA SOLAR NO CONTEXTO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS.....</b>	<b>21</b>
3.1 Introdução.....	21
3.2 O Efeito Estufa.....	24
3.3 A Energia Solar Hoje .....	29
3.4 As fontes renováveis e as barreiras de mercado.....	39
<b>CAPÍTULO 4 – MATRIZ ENERGÉTICA DOS PAÍSES FABRICANTES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS.....</b>	<b>43</b>
4.1. As matrizes energéticas e as fontes de energia renovável .....	43
4.2 A matriz energética do Brasil.....	47
4.3 A matriz energética da Alemanha.....	52

4.4 A matriz energética do Japão.....	54
4.5 A matriz energética dos Estados Unidos da América.....	57
<b>CAPÍTULO 5 – METODOLOGIA DE PESQUISA.....</b>	<b>60</b>
5.1 – Introdução.....	60
5.2 – O Passivo Ambiental.....	61
5.3 – A Análise do Ciclo de Vida - ACV.....	64
5.4 – Análise energética .....	71
5.5 –Análise ambiental .....	73
5.6 - Matriz de Correlação.....	76
<b>CAPÍTULO 6 – ESTUDO DE CASO – PAINEL FOTOVOLTAICO PADRÃO.....</b>	<b>79</b>
6.1 - Princípio de funcionamento.....	79
6.2 - Composição do Módulo fotovoltaico.....	82
6.2.1 Painel solar.....	84
6.2.2 Bateria .....	86
6.2.3 Condutores.....	86
6.2.4 Fusíveis.....	86
6.2.5 Controlador de carga.....	88
6.2.6 Inversor.....	89
6.3 Tipos de Instalação .....	90
6.3.1 Sistema painel – carga.....	90
6.3.2 Sistema painel – bateria – carga.....	91
6.3.3 Sistema painel - controlador – bateria – carga.....	92
6.3.4 Sistema painel controlador – bateria – inversor - carga.....	92
6.4 Análise do ciclo de vida de um painel fotovoltaico padrão.....	93
6.4.1 A fabricação do alumínio.....	93
6.4.2 A fabricação do vidro plano.....	95
6.4.3 A fabricação da célula de silício e montagem do módulo fotovoltaico.....	96
6.4.4 A Fabricação da bateria de chumbo-ácido.....	97
<b>CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DE EQUILÍBRIO ENERGÉTICO E AMORTIZAÇÃO DO PASSIVO AMBIENTAL.....</b>	<b>101</b>

7.1 Análise do equilíbrio energético.....	101
7.2 Análise da capacidade de amortização das emissões de CO <sub>2</sub> do módulo PV.....	106
7.3 Análise do Passivo Ambiental.....	115
<b>CAPÍTULO 8 – ANÁLISE DOS RESULTADOS.....</b>	<b>135</b>
8.1. Equilíbrio energético.....	135
8.2. Capacidade de amortização das emissões de CO <sub>2</sub> .....	136
8.3. Capacidade de amortização do Passivo Ambiental.....	145
8.4 Validação dos resultados.....	172
8.5 Determinação da adicionalidade.....	175
<b>CAPÍTULO 9 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>179</b>
<b>CAPITULO 10 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>183</b>
<b>ANEXOS</b>	
<b>Anexo I - A fabricação do alumínio</b>	
<b>Anexo II - A fabricação do vidro plano</b>	
<b>Anexo III - A fabricação da célula de silício e montagem do módulo fotovoltaico</b>	
<b>Anexo IV - A fabricação da bateria de chumbo-ácido</b>	

**LISTA DE FIGURAS**

Figura 1.1 – Dados mundiais de Energia - oferta de energia por fonte – 2005: 11.435 10 <sup>6</sup> TEP.....	5
Figura 1.2 – Oferta mundial de energia por fonte (1973 / 2005) – 1973: 6.128 10 <sup>6</sup> TEP - 2005: 11.435 10 <sup>6</sup> TEP.....	5
Figura 2.1 – Consumo final de energia por fontes no Brasil – 2007.....	15
Figura 3.1 – Distribuição da energia solar sobre a Terra.....	22
Figura 3.2 - Ciclo da água.....	22
Figura 3.3 - Efeito estufa.....	24
Figura 3.4 – Temperatura Global (1880 – 2000).....	25
Figura 3.5: Aumento da concentração de CO <sub>2</sub> na atmosfera (1850 – 2100).....	26
Figura 3.6 – Uso de energia Brasil versus Mundo (2005).....	30
Figura 3.7 – Evolução dos custos das energias renováveis (1980 –2030).....	32
Figura 3.8 – Fabricação mundial de sistemas fotovoltaicos 2001 – 2003.....	33
Figura 3.9 – Produção mundial de sistemas fotovoltaicos – 2003.....	34
Figura 3.10 - Produção mundial de células/ módulos PV por tecnologia de célula [MW].....	36
Figura 3.11 – Produção de células PV (MW) PV por país em 2007.....	37
Figura 4.1a - Produção de eletricidade em países pertencentes a IEA (2001) (%).....	43
Figura 4.1b - Produção de eletricidade em países pertencentes a IEA Energias renováveis (2001) (%).....	44
Figura 4.2 – Produção de eletricidade em países pertencentes a IEA (1997 - 2001).....	44
Figura 4.3 – Sistemas fotovoltaicos - Capacidade instalada em países da IEA (1992 - 2001).....	45
Figura 4.4 – Matriz Elétrica Brasileira – Empreendimentos em Operação.....	49
Figura 4.5 – Consumo final de energia entre 1970 e 2004.....	50
Figura 4.6 – Abastecimento energético primário total por fonte – Alemanha.....	52
Figura 4.7– Abastecimento energético primário total por fonte – Japão.....	55

Figura 4.18– Evolução das fontes renováveis no Japão de 1971 a 2001.....	55
Figura 4.9 – Evolução da capacidade fotovoltaica instalada no Japão de 1990 a 2001.....	56
Figura 4.10 – Total do suprimento de energia primária por fonte – EUA.....	57
Figura 4.16 – Evolução dos custos e da capacidade fotovoltaica no Japão de 1993 a 2002.....	58
Figura 4.17 – Evolução da capacidade de geração renovável – EUA.....	60
Figura 5.1 - Principais estágios do ciclo de vida de um produto.....	66
Figura 6.1 - Componente da radiação solar ao nível do solo.....	79
Figura 6.2 – estrutura do cristal e silício.....	80
Figura 6.3 – Painel fotovoltaico para iluminação externa.....	85
Figura 6.4 – Poste com iluminação fotovoltaica em detalhe mostrando o painel, a bateria de armazenagem de energia e as lâmpadas.....	85
Figura 6.5 – Fusível tipo cartucho.....	87
Figura 6.6 – Fusível tipo cartucho confeccionado em vidro.....	87
Figura 6.7 – Fusível tipo NH.....	87
Figura 6.8 – Fusível tipo Diazed.....	87
Figura 6.9 – Controlador de carga.....	88
Figura 6.10 – Inversores.....	90
Figura 6.11 – Sistema fotovoltaico painel – carga.....	91
Figura 6.12 – Sistema fotovoltaico painel – bateria – carga.....	91
Figura 6.13 – Conjunto painel, controlador, bateria, carga.....	92
Figura 6.14 – Sistema de geração de energia fotovoltaica completo.....	93
Figura 6.15 – Bateria em corte.....	99
Figura 6.16 – Fluxograma do processo de produção da bateria de chumbo-ácido.....	100
Figura 8.1 – Quantidade de emissões de CO <sub>2</sub> evitadas por um módulo PV operando na Alemanha.....	137
Figura 8.2 – Quantidade de emissões de CO <sub>2</sub> evitadas por um módulo PV operando no BrasilSINT.....	137
Figura 8.3 – Quantidade de emissões de CO <sub>2</sub> evitadas por um módulo PV operando no BrasilISO.....	137

Figura 8.4 – Quantidade de emissões de CO <sub>2</sub> evitadas por um módulo PV operando no Japão.....	138
Figura 8.5 – Quantidade de emissões de CO <sub>2</sub> evitadas por um módulo PV operando nos EUA.....	138
Figura 8.6 – Tempo de amortização de CO <sub>2</sub> para um módulo PV operando na Alemanha.....	139
Figura 8.7 – Tempo de amortização de CO <sub>2</sub> para um módulo PV operando no BrasilSINT.....	139
Figura 8.8 – Tempo de amortização de CO <sub>2</sub> para um módulo PV operando no BrasilSISO.....	140
Figura 8.9 – Tempo de amortização de CO <sub>2</sub> para um módulo PV operando no Japão.....	140
Figura 8.10– Tempo de amortização de CO <sub>2</sub> para um módulo PV operando nos EUA.....	140
Figura 8.11 – Período de amortização de energia e emissões de CO <sub>2</sub> do módulo operando na Alemanha.....	141
Figura 8.12 – Período de amortização de energia e emissões de CO <sub>2</sub> do módulo operando no BrasilSINT.....	141
Figura 8.13 – Período de amortização de energia e emissões de CO <sub>2</sub> do módulo operando no BrasilSISO.....	142
Figura 8.14 - Período de amortização de energia e emissões de CO <sub>2</sub> do módulo operando no Japão.....	142
Figura 8.15 – Período de amortização de energia e emissões de CO <sub>2</sub> do módulo operando nos EUA.....	142
Figura 8.16 – Período de vida ambientalmente útil do módulo operando na Alemanha.....	143
Figura 8.17 – Período de vida ambientalmente útil do módulo operando no BrasilSINT....	143
Figura 8.18 – Período de vida ambientalmente útil do módulo operando no BrasilSISO.....	144
Figura 8.19 – Período de vida ambientalmente útil do módulo operando no Japão.....	144
Figura 8.20 - Período de vida ambientalmente útil do módulo operando nos EUA.....	144
Figura 8.21 – Tempo de amortização das emissões de CO <sub>2</sub> e energia gasta na fabricação do módulo PV versus fator de emissão do país de destino – ED.....	151
Figura 8.22 - Tempo de amortização de CO <sub>2</sub> e do gasto energético na fabricação do	151

módulo PV para eixo x = E0.....	
Figura 8.23- Curva limite com E0 tendendo a zero.....	153
Figura 8.24 - Curva limite com ED tendendo a zero.....	154
Figura 8.25 – Tempo de amortização das emissões de CO <sub>2</sub> e do gasto energético versus os fatores de emissão E0/ED.....	156
Figura 8.26 – Tempo de amortização das emissões de CO <sub>2</sub> e gasto energético versus os fatores de emissão E0/ED, para o Brasil <sub>SISO</sub> como país de destino do módulo PV.....	157
Figura 8.27 – Tempo de amortização das emissões de CO <sub>2</sub> e do gasto energético versus os fatores de emissão E0/ED, considerando Japão, Alemanha, EUA e Brasil sistema isolado como países de destino do módulo PV.....	158
Figura 8.28 - TVAU do módulo PV versus emissão de destino (ED).....	160
Figura 8.29 - TVAU do módulo PV versus emissão de origem (ED).....	160
Figura 8.30 – Curva limite para TVAU com E0 tendendo a zero.....	163
Figura 8.31 - Curva limite para TVAU com ED tendendo a zero.....	164
Figura 8.32 - Tempo de vida ambientalmente útil do módulo PV versus E0/ED.....	166
Figura 8.33 - Tempo de vida ambientalmente útil versus relação fator de emissão país origem / fator de emissão país destino (E0/ED) - país destino Brasil <sub>SINT</sub> .....	168
Figura 8.34 - Tempo de vida ambientalmente útil versus relação fator de emissão da origem / fator de emissão do destino (E0/ED) - país destino Japão.....	169
Figura 8.35 - Tempo de vida ambientalmente útil versus relação fator de emissão da origem / fator de emissão do destino (E0/ED) - país destino Alemanha.....	169
Figura 8.36 - Tempo de vida ambientalmente útil versus relação fator de emissão da origem / fator de emissão do destino (E0/ED) - país destino Estados Unidos.....	170
Figura 8.37 - Tempo de vida ambientalmente útil versus relação fator de emissão da origem / fator de emissão do destino (E0/ED) - país destino Brasil <sub>SISO</sub> .....	170

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 2.1 – Reservas mundiais comprovadas de petróleo, gás natural e carvão mineral.....	13
Tabela 2.2- Recursos e reservas energéticas brasileiras em 31/12/2007 (1).....	14
Tabela 2.3 – Projeção da oferta interna de energia (milhares de tep).....	16
Tabela 2.4 – Características principais de fontes renováveis.....	18
Tabela 3.1. Conversão de alguns gases em kg eq - CO <sub>2</sub> .....	31
Tabela 3.2 – Maturidade e custo das tecnologias.....	30
Tabela 3.3: Acúmulo de sistemas fotovoltaicos (MW) instalados – 2007.....	32
Tabela 3.4 – Localização da produção de módulos/células fotovoltaicas (MWp) .....	33
Tabela 3.5 – Produção de células para módulos fotovoltaicos por tecnologia – 2003.	35
Tabela 3.6 - Barreiras de mercado quanto ao uso das fontes renováveis de energia...	41
Tabela 3.7 - Barreiras de mercado quanto a maior eficiência.....	42
Tabela 4.1 – Orçamento de pesquisa e desenvolvimento de 1990 a 2002.....	46
Tabela 4.2- Matriz Elétrica Brasileira – Empreendimentos em Operação.....	48
Tabela 4.3 – Suprimento total de energia primária por fonte - Alemanha (Mtep).....	53
Tabela 4.4 – Suprimento total de energia primária por fonte Renovável - Alemanha (Mtep).....	53
Tabela 4.5 – Capacidade de geração em fontes renováveis Estados Unidos da América.....	58
Tabela 6.1 - Rendimento elétrico de células fotovoltaicas.....	82
Tabela 6.2 - Modelos de controlador de carga.....	89
Tabela 7.1 – Características do módulo analisado.....	105
Tabela 7.2 – Levantamento do gasto energético para a produção do módulo fotovoltaico.....	105
Tabela 7.3 – Cálculo do Equilíbrio energético da produção do módulo fotovoltaico..	106
Tabela 7.4 – Composição dos fatores de emissão equivalentes em kg de CO <sub>2</sub> /kWh para a matriz energética de diferentes países.....	107

Tabela 7.5 – Emissão de CO <sub>2</sub> em uma unidade termoelétrica em função do combustível.....	108
Tabela 7.6 - Cálculo de emissão direta em equivalente de CO <sub>2</sub> para a produção do módulo.....	110
Tabela 7.7 – Total equivalentes de kg CO <sub>2</sub> /kWh da produção do módulo.....	111
Tabela 7.8 - Emissões CO <sub>2</sub> evitadas pelo módulo durante 1 ano.....	112
Tabela 7.9 – Saldo de emissões de CO <sub>2</sub> durante ciclo de vida do painel fotovoltaico [kg].....	112
Tabela 7.10 – Período de amortização de emissões CO <sub>2</sub> durante ciclo de vida do painel fotovoltaico [anos].....	113
Tabela 7.11 - Tempo para cobrir gastos energéticos e de mitigação [anos].....	114
Tabela 7.12 - Tempo de vida útil ambientalmente correta do módulo fotovoltaico....	114
Tabela 7.13 - Parâmetros e atributos para avaliação de impactos da Produção do módulo fotovoltaico.....	115
Tabela 7.14. - Escala de pesos atribuídos à combinação dos atributos.....	116
Tabela 7.15A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações.....	117
Tabela 7.15B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações (continuação).....	117
Tabela 7.16A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações.....	118
Tabela 7.16B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações (continuação).....	119
Tabela 7.17A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações.....	120
Tabela 7.17B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações (continuação).....	120
Tabela 7.18A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações.....	121
Tabela 7.18B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações (continuação).....	121
Tabela 7.19A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações.....	122
Tabela 7.19B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações	

(continuação).....	122
Tabela 7.20A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações.....	123
Tabela 7.20B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações (continuação).....	124
Tabela 7.21A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações.....	125
Tabela 7.21B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações (continuação).....	125
Tabela 7.22A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações.....	126
Tabela 7.22B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações (continuação).....	127
Tabela 7.23A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações .....	128
Tabela 7.23B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações .....	129
Tabela 7.24 – Matriz de impactos da produção do módulo para o Brasil.....	130
Tabela 7.25 – Matriz de impactos da produção do módulo para a Alemanha.....	131
Tabela 7.26 – Matriz de impactos da produção do módulo para o Japão.....	132
Tabela 7.27 – Matriz de impactos da produção do módulo para os EUA.....	133
Tabela 8.1 – Resumo de dados sobre o EPBT.....	135
Tabela 8.2 – Total de emissões de CO <sub>2</sub> para a fabricação do módulo de acordo com a matriz energética de cada país.....	136
Tabela 8.3 – Representatividade qualitativa dos impactos em cada fase por país.....	146
Tabela 8.4 – Total de Unidades de Impacto Ambiental – UIA por meio e por país....	147
Tabela 8.5 - Avaliação qualitativa das unidades de impacto - meio biológico por etapa de ocorrência .....	147
Tabela 8.6 - Avaliação qualitativa das unidades de impacto - meio biológico.....	148
Tabela 8.7 – Total de unidades de impacto ambiental geradas por país e por fase.....	148
Tabela 8.8 – Tempo de vida ambientalmente útil do módulo PV considerando os gastos com mitigação do passivo ambiental do módulo.....	149

Tabela 8.9 – Tempo (anos)de amortização das emissões de CO <sub>2</sub> e do gasto energético da fabricação do módulo PV.....	150
Tabela 8.10 – variação dos valores de amortização de CO <sub>2</sub> e energia para E0 e ED tendendo a zero.....	153
Tabela 8.11 - Cálculo dos valores de tempo de amortização das curvas limite para E0 e ED tendendo a zero. ....	154
Tabela 8.12 - Valores de Tempo para a relação E0/ED considerando a amortização das emissões de CO <sub>2</sub> e do gasto energético de fabricação do módulo PV.....	155
Tabela 8.13 – Tempo de vida ambientalmente útil (TVAU) do módulo PV após amortizações (emissões de CO <sub>2</sub> , energia de fabricação e passivo ambiental).....	159
Tabela 8.14 – Tempo máximo de vida ambientalmente útil do módulo PV por país de destino (anos).....	161
Tabela 8.15 - Cálculo dos valores das curvas limite de TVAU para E0 e ED tendendo a zero.....	163
Tabela 8.16 - Cálculo dos valores de TVAU das curvas limite para E0 e ED tendendo a zero.....	165
Tabela 8.17 - Valores de Tempo para a relação E0/ED considerando o tempo de vida ambientalmente útil do módulo PV.....	165
Tabela 8.18 – Valores de TVAU para E0/ED tendendo a zero.....	171
Tabela 8.19 – Resumo de cálculos de emissões de CO <sub>2</sub> evitadas para módulos PV com origem e destino na Alemanha – cenário 1.....	173
Tabela 8.20 – Resumo de cálculos de emissões de CO <sub>2</sub> evitadas para módulos PV com origem Alemanha e destino Brasil <sub>SINT</sub> – cenário 1 .....	173
Tabela 8.21 – resumo de cálculos de emissões de CO <sub>2</sub> evitadas para módulos PV com origem Alemanha e destino Brasil <sub>SISO</sub> – cenário 1.....	174
Tabela 8.22 – Resumo de cálculos de emissões de CO <sub>2</sub> evitadas para módulos PV com origem e destino Brasil <sub>SINT</sub> – cenário 2.....	174
Tabela 8.23 – Resumo de cálculos de emissões de CO <sub>2</sub> evitadas para módulos PV	175

---

com origem Brasil <sub>SINT</sub> e destino Alemanha – cenário 2.....	
Tabela 8.24 – Resumo de cálculos de emissões de CO <sub>2</sub> evitadas para módulos PV com origem Brasil <sub>SINT</sub> e destino Brasil <sub>SISO</sub> – cenário 2.....	175
Tabela 8.25 – Resumo dos cálculos de adicionalidade para módulos PV de acordo com o país de origem e destino.....	176

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

ABIVIDRO - Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV - Análise do ciclo de vida

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

APE - Autoprodução de Energia

APE-COM - Autoprodutor de Energia autorizado a comercializar o excedente

BEN - Balanço Energético Nacional

BiPV - Edifícios Integrados a Sistemas Fotovoltaicos

CDE - Conta de Desenvolvimento Energético

CEPEL - Centro de Pesquisas de Energia Elétrica

CER - Reduções certificadas

CONAMA - Conselho Nacional de Meio Ambiente

CRESESB - Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito

Cz - Método Czochralski

DDE - Departamento de Desenvolvimento Energético

DNPE - Departamento Nacional de Políticas Energéticas

ECO-92 - Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento de 1992

ED - Valores de emissão de CO<sub>2</sub> e de diversos outros gases equivalentes em CO<sub>2</sub>

EE - Emissões de CO<sub>2</sub> evitadas

eg-Si - Silício de grau eletrônico

EI - Emissão Indireta

Einput – Eutilizada - Contribuição de energia utilizada durante o ciclo de vida do módulo

EPBT – “Energy Pay-Back Time”

EPIA – “European Photovoltaic Industry Association”

Esaved – Economizada - Energia economizada devido a geração de eletricidade pelo módulo fotovoltaico durante o período de um ano

ET - Emissão total de CO<sub>2</sub>

EUA - Estados Unidos da América

FE - Fator de emissão de CO<sub>2</sub>

GCH - Grande Central Hidrelétrica

GEE - Gases de Efeito Estufa

GEM - Gasto de Energia do Módulo

IEA - International Energy Agency

ISO 14040 – Gestão ambiental - avaliação de ciclo de vida - princípios e estrutura

ISO 14041 - Gestão ambiental - avaliação de ciclo de vida - definição de objetivo e escopo e análise de inventário

ISO 14042 - Gestão ambiental - avaliação de ciclo de vida - avaliação do impacto do ciclo de vida

μCH - Micro Central Hidrelétrica

mCH – Mini Central Hidrelétrica

MCT - Ministério de Ciência e Tecnologia

MDL - Mecanismo de Desenvolvimento Limpo

mg-Si - Silício de grau metalúrgico

MME - Ministério de Minas e Energia

MRN - Mineradora Rio do Norte

m-Si - Silício mono-cristalino

NIA - Número de impactos ambientais

ONS - Operador Nacional do Sistema

PA - Potencial de aquecimento global

PCH - Pequena Central Hidrelétrica

PIE - Produção independente de energia

PRODEEM - Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios

PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia

p-Si - Silício poli-cristalino

PV.- Módulo fotovoltaico ou sistema fotovoltaico

RD&D - Pesquisas Energéticas Desenvolvimentos e Demonstrações

REM - Relação estéril/minério

SIN - Sistema Interligado Nacional

sog-Si - Silício de grau solar

SP - Produção de energia elétrica destinada ao atendimento do serviço público de distribuição

TCU - Tribunal de Contas da União

UIA-Unidades de impactos ambientais

UNIFACS - Universidade Salvador

**LISTA DE SÍMBOLOS**

CO<sub>2</sub> - Dióxido de Carbono

SO<sub>2</sub> - Dióxido de enxofre

NO<sub>2</sub> - Dióxido de nitrogênio

N<sub>2</sub>O - Óxido de dinitrogênio

CFC's – (CFC (soft), CFC (hard), CFC-11, CFC-12, CFC-13, CFC-14, CFC-113, CFC-114, CFC-115, CFC-116) - Cloro Flúor Carbono

Halon-1211

Halon-1301

C<sub>2</sub> H<sub>3</sub> Cl<sub>3</sub> - 1,1,1 – Tricloroetano

HCFC – 123 - Hidrofluorcarbonado

HCFC - 141b - Hidrofluorcarbonado

HCFC - 142b - Hidrofluorcarbonado

HCFC – 124 - Hidrofluorcarbonado

HCFC - 22 - Hidrofluorcarbonado

HFC - 125- Hidrofluorcarbonado

HFC - 134- Hidrofluorcarbonado

HFC - 152- Hidrofluorcarbonado

C - Carbono

CO - Monóxido de carbono

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> – Óxido de alumínio

NaOH – Hidróxido de sódio

NaAlO<sub>2</sub> - Aluminato de sódio

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 3H<sub>2</sub>O - Alumina hidratada

Na<sub>3</sub>AlF<sub>6</sub> - Criolita

CaF<sub>2</sub> - Fluoreto de cálcio

AlF<sub>3</sub> - Fluoreto de alumínio

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> - Ácido sulfúrico

H<sub>2</sub> - Hidrogênio

NO<sub>x</sub> - Óxido de nitrogênio

SiO<sub>2</sub> - Sílica

Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Óxido de ferro

CaO - Cálcio

MgO – Óxido de magnésio

Na<sub>2</sub>O- Óxido de sódio

K<sub>2</sub>O – Óxido de potássio

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - Alumina

CH<sub>4</sub> - Metano

C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> - Etano

CaCl<sub>2</sub> – Cloreto de cálcio

Ni - Níquel

kWh - Kilo Watt hora

MWh - Mega Watt hora

CA - Corrente Alternada

CC - Corrente Contínua

**LISTA DE UNIDADES:**

km<sup>2</sup> - Kilômetro quadrado

°C - Graus Celsius

μm - Micrometro

A - Ampéres

cm - Centímetro linear

cm<sup>2</sup> - Centímetro quadrado

EVA - Etil Vinil Acetato

g/m<sup>2</sup> - Grama por metro cúbico

kg - Kilograma

kg de CO<sub>2</sub>/kWh - Kilograma de dióxido de carbono por Kilowatt hora

kg/m<sup>2</sup> - Kilograma por metro cúbico

kW – KiloWatt

kWh/ano – KiloWatt hora por ano

kWpico – KiloWatt pico

m - Metro linear

m<sup>2</sup> - Metro quadrado

m<sup>3</sup>/t - Metro cúbico por tonelada

Metro cúbico - m<sup>3</sup>

Milímetro – mm

ml /m<sup>2</sup> - Milímetro por metro cúbico

Mtoe - Mega tonelada equivalente em petróleo

MW - Mega Watt

MWh/ano - Mega Watt hora por ano

MWp - Mega Watt pico

ton CO<sub>2</sub> / MWh - Toneladas de dióxido de carbono por Mega Watt hora

TWh - TeraWatt hora

V - Volts

W - Watts

ZJ – zetta Joule – 10<sup>21</sup> joule

## RESUMO

A afirmação 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 o fato de 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.

Neste caso evidencia-se a necessidade da verificação, considerando-se a matriz energética do país onde o painel é fabricado e/ou utilizado, se é possível amortizar o gasto energético, as emissões de CO<sub>2</sub> e as degradações causadas por seu processo de fabricação. Se após isto, o painel ainda possuir tempo de vida útil para funcionar, então o painel fotovoltaico poderá ser considerado como uma fonte limpa de energia. Outro fator são os impactos causados pela fabricação do módulo fotovoltaico. Utilizando-se de ferramentas de gestão ambiental, tais como as , análises de ciclo de vida, energética e do passivo 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.

Este estudo apresenta o levantamento simplificado dos dados relativos ao processo de análise de ciclo de vida e suas funções, aplicadas a painéis fotovoltaicos, como também a sua interação com o passivo ambiental de seu processo de fabricação. e o levantamento dos gastos energéticos e das emissões de CO<sub>2</sub> do processo de fabricação do módulo fotovoltaico. A partir destes dados fez-se uma análise do equilíbrio energético e de mitigação de CO<sub>2</sub> e da capacidade do módulo em mitigar o passivo ambiental gerado em sua fabricação. Deste modo pode-se verificar a validade da afirmação de que painéis fotovoltaicos são realmente não poluentes, considerando-se os aspectos relativos às matrizes energéticas dos países de produção e/ou operação dos módulos. 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.

As considerações feitas ao longo de todo o estudo mostraram 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>. Salienta-se que cada um dos impactos gerados possui um custo ambiental que deve ser amortizado, ou pelo menos passar por algum processo de mitigação ou compensação.

Com relação à amortização dos custos energéticos, todos os casos analisados conseguem amortizar estes custos, calculado em 8,48 anos, antes do final da vida útil do módulo PV, definida em 25 anos. No entanto a amortização das emissões de CO<sub>2</sub> dependerão do local de produção/operação, podendo exigir um tempo para a amortização muito maior do que o tempo de vida útil do módulo PV.

## ABSTRACT

The statement that the use of solar energy, generated through photovoltaic panels, constitutes a clean energy source has been consolidated along past years. This affirmative just takes into consideration, in most cases, the electric power generation after its production and installation.

However, when it has taken into consideration the fact that not only to be manufactured but also ready to proper operation it is necessary that a sequence of activities must be accomplished in its production process. According to the energy matrix of the country where they are completed a bigger or smaller CO<sub>2</sub> emission will happen beyond others environmental degradations.

In this case it can be evidenced the need of verification, considering the energetic matrix of the country where a panel is developed or used, and if it is able to depreciate the energetic cost, the CO<sub>2</sub> emissions and the degradations caused by the manufacturing process. After that if the panel is still capable to function then the photovoltaic panel will be considered as a source of clean energy.

Another point is the resulting impact caused by the production of the photovoltaic modules. Using the environmental management tools, such as analyse of cycle time of the product, energetic and of environmental passive, it can be studied these impacts since their beginning until the end of the cycle time and complemented the capacity of verification of the module to depreciate the CO<sub>2</sub> emissions, the caused impacts by their manufacturing beside depreciating the electric energy spent in this process.

This study, not only makes a simplified data rising regarding the analysis process of cycle time and its function both applied to photovoltaic panels but also the interaction of the environmental passive of the manufacturing process. Also, it is accomplished the energetic costs and manufacturing process CO<sub>2</sub> emissions of the modules rising. Later these data are used to further analysis of the energetic and CO<sub>2</sub> mitigation balance and the module capacity of mitigating the environmental passive caused by the production. Thus, it can be verified the validation of the affirmation that photovoltaic panels are really no pollutant, considering the relative aspects of the energy matrixes of the productive countries and/or modules operation. Provided that it is possible to verify the feasibility of the production and/or operation of the modules in a certain site according to the energetic costs their CO<sub>2</sub> emissions ant their

environmental passive depreciation potential resulted by the manufacturing considering all the cycle time of the photovoltaic panels.

The considerations done along the whole study showed that, until reaching the final consumer, the production of the module photovoltaic it produces a series of environmental liabilities that should be considered. Mainly regarding the emission of CO<sub>2</sub>. The study pointed out that each generated impacts possesses an environmental cost that it should be amortized, or at least to pass for some mitigation process or compensation.

Regarding the amortization of the energy costs, all the cases analyzed get to muffle these costs, made calculations in 8,48 years, before the end of the useful life of the module PV, defined in 25 years. However the amortization of the emissions of CO<sub>2</sub> will depend at the production/operation place, could demand a time for the very largest amortization than the time of useful life of the module PV.

## CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas o mundo tem passado por uma série de mudanças comportamentais de ordem tanto política quanto social. Entre estas mudanças, uma que tem afetado de modo significativo o mercado de energia elétrica, é a escassez das reservas de energia fóssil. Para tentar minimizar este problema, tem-se buscado a utilizar novas fontes de energia. O processo de busca por novas fontes de energia, que não sejam de origem fóssil, tem como base a necessidade de que as mesmas sejam ecologicamente corretas, ou seja, possam suprir as necessidades com um mínimo de impactos ambientais. Entre estas novas fontes alternativas, a energia solar tem recebido uma atenção especial dos agentes empreendedores como de governos quanto à possibilidade de seu uso para gerar energia elétrica. Dentre os diversos processos de conversão de energia, a solar através da conversão fotovoltaica, é conhecido por ser uma fonte de energia elétrica limpa, sem emissão de poluentes, disponível a todas as camadas sociais, ou seja, uma fonte ecologicamente correta, abundante e praticamente inesgotável.

Porém, ao ser analisada com mais detalhes e colocada a prova por conceitos e análises ambientais mais precisas e bem direcionadas, pode-se encontrar uma versão diferente da comumente adotada pela maioria dos interessados neste tipo de energia. Muito embora a energia produzida pelo painel após a sua instalação seja limpa, exceto pelo uso de baterias para armazenagem de energia, existem algumas questões primordiais tais como:

- Até alcançar o consumidor final este tipo de equipamento produz algum impacto ambiental considerável?
- Que custo ambiental e quais os impactos causados pela fabricação destes equipamentos?
- Sua produção de energia e seu uso ao longo de sua vida útil equilibram ou superam estes custos ambientais por ele causados?
- Qual é o tempo de operação para que o painel fotovoltaico amortize o seu passivo ambiental?

Para responder a estas perguntas, é necessário considerar uma série de fatores e selecionar as ferramentas para que a resposta tenha um respaldo adequado de valores ambientais. Isto ocorre porque quase nunca é levado em consideração o fato de que a natureza possui um processo seletivo que atinge indistintamente a todos, tanto causadores de danos ambientais quanto aqueles que não os provocaram (SCHEER, 2002).

Por outro lado não se podem exacerbar os conceitos e atitudes de preservação ambiental a ponto de se atingir um limite extremo onde a preservação deva ser alcançada a qualquer custo a ponto de eliminar a possibilidade do uso dos recursos naturais por completo. Este extremo oposto não deve ser considerado como alternativa viável, ou seja, não se pode propor uma proteção ambiental que torna intocados os refúgios naturais ainda existentes sem frear os processos de destruição generalizada, a melhor alternativa é a de se implantar uma economia natural que participe respeitosamente da riqueza da natureza. (DONALD WORSTER apud SCHEER, 2002).

## **1.1 – Problematização**

BERMANN (2003) informa que, para aproveitar um determinado tipo de fonte de energia, o homem primeiro tem que estabelecer um critério que dimensione adequadamente suas necessidades, uma escala de prioridades para satisfazer estas necessidades e, de acordo com o alcance desta escala, definir uma escolha mais adequada das alternativas energéticas de que ele pode dispor. O próximo passo é verificar o quanto ele está disposto a tirar proveito desta fonte de energia para satisfazer suas necessidades. Porém, este processo acaba por gerar uma série de conflitos. Neste campo é onde as relações sociais e as relações homem-natureza acabam por interagir e a exigir uma série de redefinições dos limites exigidos e a maneira mais adequada para superá-los. É neste contexto que surge a necessidade em se avaliar corretamente a veracidade da afirmação de que a geração de energia elétrica através de sistemas de geração fotovoltaicos é realmente limpa, frente aos impactos ambientais gerados por ele durante seu processo de fabricação.

## 1.2 - Justificativa

Segundo GELLER (2003), a nova tecnologia, nas suas mais diversas formas, tem mudado a vida do ser humano em todas as suas áreas de convívio, seja no campo social, cultural, econômico ou político. Estas mudanças têm ocorrido em um ritmo acelerado e às vezes, para alguns, difícil de acompanhar. Como o abastecimento energético em escala planetária é feito em sua maioria com energias de base fóssil, pode-se qualificar o atual mercado energético mundial basicamente como um mercado energético fóssil. A partir desta afirmação e a adição do fato destas reservas após o uso deixam de ser utilizadas, conclui-se que um dos principais problemas do século XXI é a existência de um aumento do consumo de uma base energética sem que se tenha em uma mesma escala a preocupação com a dependência que ela nos causa e as possíveis alternativas a esta base energética.

SCHEER (2002) defende que a civilização só se tornará livre das armadilhas dos combustíveis fósseis se for feito todo o possível para substituí-los por recursos renováveis e compatíveis com a natureza. A este processo ele chama de “economia solar planetária” e salienta que ela deve ser aplicada em escala global para funcionar adequadamente e surtir os efeitos desejados, de forma que as necessidades energéticas mundiais só serão satisfeitas graças ao uso de fontes de energia e materiais do tipo solar, a este conjunto de energia SCHEER(2002) chama de “matérias-primas solares”, já que o conjunto das energias que temos hoje derivadas direta ou indiretamente da energia solar: biomassa, eólica, hidráulica, ondas do mar, materiais bióticos ou biógenos.

O que mais preocupa o mercado de energia é a diminuição da disponibilidade dos recursos energéticos. Esta preocupação deriva do fato de existir uma demanda por energia maior do que a capacidade que de suprir este mercado a médio e longo prazo.

Esta situação acaba por gerar um contexto onde a necessidade de recursos energéticos e de matérias-primas ditam a estrutura social, política e econômica da sociedade. Sendo assim é também por estes mecanismos que o mercado deve atuar para obter como resultado uma estrutura global mais equilibrada e justa para a humanidade e para o meio onde ela habita.

Como o potencial de energias fósseis é limitado e ainda não é possível explorar recursos minerais em outros planetas, fica claro que o perigo a que a ecologia global esta

exposta não é mera fantasia advinda de grupos que desconhecem a revolução tecnológica atual.

Considerando que as tecnologias atuais não possam afastar os perigos da escassez energética pela qual passamos atualmente, somente com uma substituição rigorosa do consumo de energias fósseis por energias solares, a globalização econômica chegará a ser ecologicamente sustentável.

A humanidade foi ensinada a acreditar que os combustíveis fósseis e a eletricidade são abundantes, baratos e disponíveis. Com este raciocínio é deixado de lado o fato de que toda e qualquer fonte de energia elétrica causa danos ao meio ambiente, e as conseqüências da geração desta energia não são consideradas, (GELLER, 2003).

A vida cotidiana do indivíduo é afetada pela produção de energia elétrica de modo tão peculiar e incorporado às suas atividades que mal se percebe que seu alcance vai além do seu uso direto. Analisando as fontes de energia que a humanidade tem utilizado ao longo dos últimos 150 anos, é possível perceber como elas se definem e como elas sofreram mudanças significativas desde então, (GELLER, 2003).

Atualmente os combustíveis fósseis dominam cerca de 80% do fornecimento global de energia. A figura 1.1 abaixo, mostra alguns dados mundiais de energia para o ano de 2005.

A figura 1.1 mostra que dentro do contexto de uso de fontes energéticas, as renováveis têm sido utilizadas em uma proporção maior do que as de origem hidráulica ou nuclear. A figura 1.2 mostra um fato que chama a atenção, o aumento na utilização de outras fontes para geração de energia. Isto revela o crescente interesse do mercado em utilizar outras fontes de energia que não de origem fóssil (carvão, petróleo e gás natural). Tais fatos ocorrem quando se busca uma mudança na utilização das fontes existentes visando poupar as fontes dominantes. Além disto, é necessário buscar alternativas que funcionem a curto prazo, enquanto outras fontes são inseridas para tentar manter o mercado de geração estável e buscando sustentabilidade a médio e longo prazo.

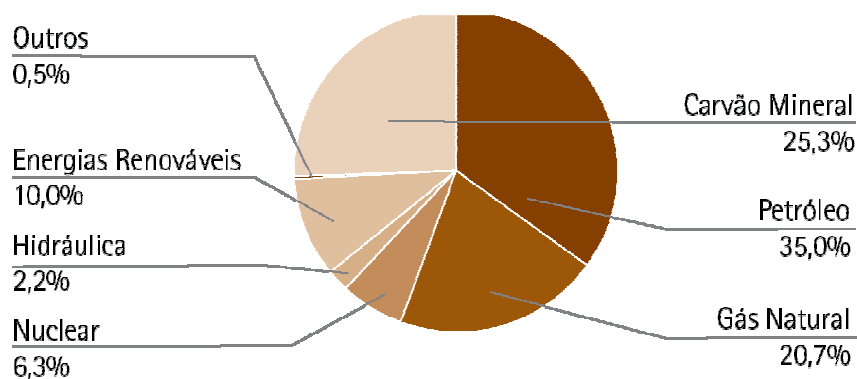


Figura 1.1 – Dados mundiais de Energia - oferta de energia por fonte – 2005: 11.435  $10^6$  TEP.

Fonte: Balanço Energético Nacional 2007 - (ano base 2006) – Ministério de Minas e Energia – (MME) - <http://www.mme.gov.br>

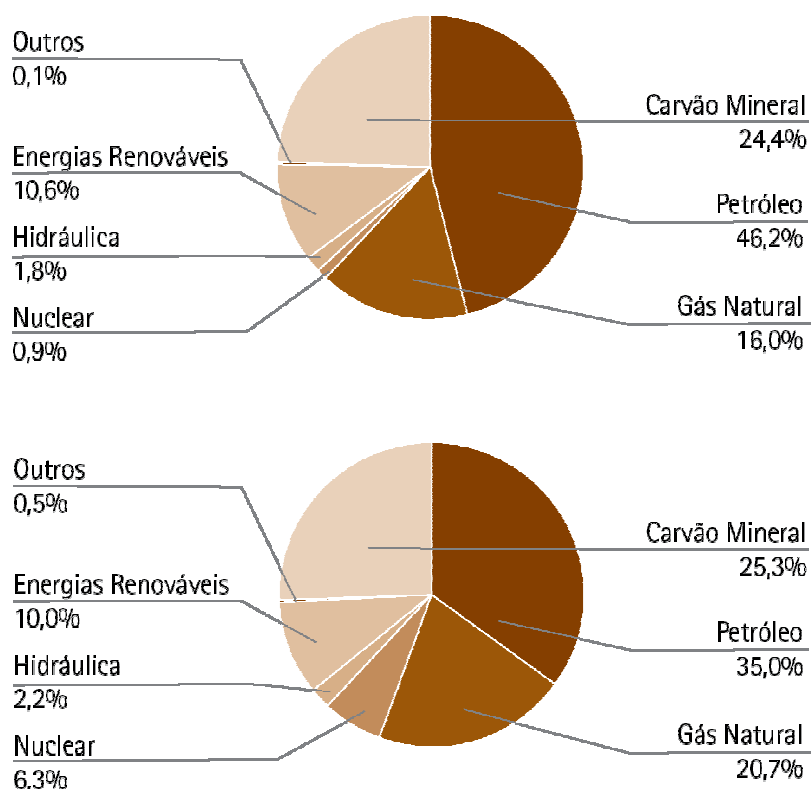


Figura 1.2 – Oferta mundial de energia por fonte (1973 / 2005) – 1973: 6.128  $10^6$  TEP - 2005: 11.435  $10^6$  TEP.

Fonte: Balanço Energético Nacional (BEN) – Ministério de Minas e Energia – (MME) - <http://www.mme.gov.br/>

Analisando-se os dados acima, observa-se que o mercado de energia elétrica atual é dominado por energias de origem fóssil, totalizando 79% do total. No entanto, mesmo que hoje estejam sendo exploradas em pequena escala, as fontes de energia renovável despontam como uma das melhores possibilidades para substituir as fontes fósseis.

Um dos fatores que leva a esta afirmação é o do fato de ser possível a sua utilização em todas as partes, o que varia de país para país, de região para região é a oferta natural destas fontes, além disso, sua utilização oferece uma variedade de custos maior do que as oferecidas pelas energias fósseis. Sendo assim a relação custo benefício das energias renováveis possui um leque mais amplo de possibilidades de aproveitamento. Mesmo com fatores positivos a seu favor, a utilização das fontes renováveis de energia não pode ser analisada apenas do ponto de vista da relação custo/benefício. Não basta observar estas fontes apenas a partir de sua utilização pelo consumidor, é preciso também analisar os aspectos advindos de todo o processo de geração das tecnologias de energia renovável. Neste aspecto o que deve ser considerado é o balanço ambiental e as interferências causadas por esta produção energética no patrimônio líquido ambiental. Toda fonte geradora de energia elétrica causa danos ao ambiente. O questionamento, que deve ser respondido quando se analisa a produção de energia elétrica por uma determinada fonte, Passa pelas seguintes questões:

- Qual é o resultado do balanço energético na produção de um módulo fotovoltaico?
- Durante sua vida útil o módulo produz energia o suficiente para amortizar seu custo energético utilizado no processo de sua fabricação?
- Qual a degradação ambiental causada durante a fabricação dos componentes de um módulo fotovoltaico?
- Qual é o custo ambiental na produção desta energia elétrica?
- Qual é o tempo de operação de um painel fotovoltaico para amortizar o seu passivo ambiental?
- Se estes custos não forem pagos durante o ciclo de vida natural destas fontes, ela pode ser considerada realmente limpa?

- Qual é a vida útil de um painel fotovoltaico quando ele gera uma energia realmente limpa?
- Qual é o fator preponderante que diferencia os impactos ambientais na fabricação do painel fotovoltaico em função do país onde é fabricado?
- Qual é o passivo ambiental do painel fotovoltaico em função da matriz energética dos países onde ele é fabricado e dos países onde ele é utilizado?
- Qual será a linha de base para o painel, levando-se em conta a questão anterior?

### **1.3 Objetivo do estudo**

Com objetivo pretende-se neste estudo analisar a capacidade de amortização dos custos energéticos, das emissões de CO<sub>2</sub> e do passivo ambiental gerados pela fabricação dos módulos fotovoltaicos, utilizando ferramentas de gestão ambiental, a saber, análise de ciclo de vida, levantamento de passivo ambiental e emissões de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), e através destas ferramentas de gestão ambiental para verificar se a produção de energia elétrica de um painel fotovoltaico, ao longo de sua vida útil, é capaz de amortizar os gastos energéticos de sua fabricação, as emissões de CO<sub>2</sub> decorrentes do processo

### **1.4 Metodologia desenvolvida para o estudo**

Para a realização do trabalho, foi previsto o desenvolvimento das seguintes etapas:

1<sup>a</sup>) Levantamento de material bibliográfico: levantamento dos títulos e obras mais relevantes sobre os assuntos abordados neste estudo

2<sup>a</sup>) Revisão bibliográfica: após a leitura do material obtido na etapa anterior, elaborar a seleção dos dados mais relevantes, dentro das obras de literatura pertinentes as necessidades deste estudo.

3<sup>a</sup>) Coleta de dados: a partir do material e das informações da revisão bibliográfica selecionar os dados relativos ao processo de fabricação do módulo fotovoltaico e da bateria de chumbo-ácido, as fases de extração de matéria prima para a produção do material utilizado em sua fabricação (alumínio, vidro, silício), bem como os dados relativos aos gastos energéticos, as emissões de CO<sub>2</sub> e o passivo ambiental referentes as fases abordadas no ciclo de vida do módulo fotovoltaico.

4<sup>a</sup>) Análise dos dados coletados: usar de ferramentas de gestão ambiental (Análise do ciclo de vida, passivo ambiental, reembolso de energia, fator de emissão de CO<sub>2</sub>, matriz de impactos ambientais), para a análise dos dados de acordo com os objetivos e direcionamentos do estudo.

5<sup>a</sup>) Conclusões e Recomendações.: verificar e responder aos questionamentos levantados ao longo do estudo e validar ou não a afirmação de que o módulo fotovoltaico, além de uma fonte de energia renovável, é também capaz de amortizar seus gastos energéticos, suas emissões de CO<sub>2</sub> e mitigar o passivo ambiental gerado durante seu processo de produção..

## **1.5 Roteiro da monografia**

O presente trabalho de dissertação foi dividido em 9 capítulos, de forma que os mesmos se complementem quanto à abordagem científica tendendo a justificar a relevância para a sociedade. Assim sendo, o capítulo 1 trata da “Introdução” destacando como principais itens a problematização, que norteou o desenrolar da pesquisa, e a justificativa ressaltando a questão do desenvolvimento ambiental focado nos custos energéticos e ambientais.

O capítulo 2 trata da revisão bibliográfica, ressaltando o tipo de abordagem ambiental e as ferramentas de gestão ambiental utilizadas. O capítulo 3 descreve o papel da energia solar com relação às demais energias renováveis. No capítulo 4 são descritas as matrizes energéticas dos países considerados neste estudo (Brasil, Alemanha, Japão e Estados Unidos da América – EUA). Para o capítulo 5 foi destinada a descrição da metodologia de pesquisa utilizada neste estudo. Neste capítulo são evidenciados o passivo ambiental, a análise de ciclo de vida e as análises ambiental, energética e de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> da produção dos módulos fotovoltaicos.

Um estudo de caso é mostrado no capítulo 6, focando produção de um módulo fotovoltaico padrão. No o capítulo 7 é realizada a análise do equilíbrio energético e mitigação de CO<sub>2</sub> e a abordagem relativa ao passivo ambiental gerado.

Finalizando o estudo o capítulo 8 trata da análise dos resultados obtidos e o capítulo 9 das conclusões e recomendações para o desenvolvimento de trabalhos futuros.

## CAPÍTULO 2 – A ABORDAGEM AMBIENTAL

De acordo com BRANDÃO (2001) é preciso abordar as questões ambientais sob uma nova ótica. 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. Deste modo é possível a inserção de novas ferramentas de gestão ambiental nas análises e estudos de qualidade 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.

### 2.1 O Passivo Ambiental

Para EUSTÁCHIO *apud* NEVES (2006) o passivo ambiental é considerado como toda agressão praticada contra o meio ambiente. Esta agressão pode ser traduzida também pelo custo dos investimentos necessários para sua reabilitação ou ainda as multas, indenizações e gastos atribuídos a projetos e/ou licenças ambientais. Além disto, o passivo é toda a obrigação contraída voluntariamente ou não.

Para BARATZ (2000) a determinação econômica dos passivos ambientais é por si só, muito importante na gestão das organizações. O uso dessa ferramenta ganha importância quando da realização de operações de associação, fusão, compra ou venda de ativos, seguro, transações imobiliárias entre diversas outras realizadas por organizações e empresas. Nestas transações o valor de mercado do próprio objeto das operações é muito influenciado pelo passivo ambiental ou ainda pelas expectativas geradas em torno do mesmo. Quem compra se torna titular tanto do ativo quanto do passivo.

Por outro lado, BAYARDINO (2004) afirma que os impactos ambientais acabam por gerar situações levam as os investidores, consumidores, acionistas e outros grupos sociais a uma perda de confiança que acarretam prejuízos às empresas. Deste modo as empresas assumem os custos advindos da administração destes passivos ambientais não como um custo ou prejuízo, mas sim como um investimento. Este tipo de investimento faz com que o mercado e diversos segmentos da sociedade enxerguem e aceitem melhor

as atividades destas empresas, tornando a reputação das mesmas em um ativo importante a ser considerado. Como exemplo da importância da análise do passivo ambiental de um produto ou processo para uma empresa pode-se citar o caso dos chamados “Princípios do Equador”.

VENTURA (2006) afirma que os chamados “Princípios do Equador” são um conjunto de regras que tem por base critérios desenvolvidos pela International Finance Corporation – IFC, instituição ligada ao Banco Mundial, para concessão de créditos. Estas regras devem ser aplicadas a todos os financiamentos de projetos acima de 50 milhões de dólares e consideram critérios mínimos ambientais e de responsabilidade social. No ano de 2003, 10 dos maiores bancos internacionais de financiamento de projetos adotaram estes princípios. Entre os critérios adotados pelos “Princípios do Equador” encontram-se os impactos ambientais do projeto sobre a fauna e flora, a exigência de compensações em dinheiro para populações afetadas por um projeto, a proteção a comunidades indígenas, por exemplo. Os projetos são classificados de acordo com seu nível de risco sócio-ambiental: A – alto risco, B – médio risco, C – baixo risco. Trinta e nove bancos no mundo já adotam estes princípios. No Brasil já são mais de quinze bancos, incluindo bancos de capital nacional como Bradesco, Unibanco, Itaú e Banco do Brasil. Alguns destes bancos estão incluindo estes critérios também para financiamentos abaixo de 50 milhões de dólares. (VENTURA (2006))

## **2.2 A Análise do Ciclo de Vida - ACV:**

De acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas, em sua publicação ISO 14040 (2001), existe uma crescente preocupação com a conscientização sobre a importância dos impactos ambientais associados a produtos manufaturados e consumidos. O que tem gerado um interesse no desenvolvimento de novas tecnologias e métodos para entender melhor e diminuir estes impactos. A Análise do Ciclo de Vida (ACV) é uma das ferramentas utilizadas com este propósito, constitui-se em uma técnica utilizada para avaliar impactos ambientais e impactos potenciais a um produto mediante a:

- Levantamento de um inventário de entradas e saídas de materiais e energias ligadas ao sistema ou produto analisado. Este inventário pode

incluir aspectos ambientais que não são diretamente relacionados às entradas e saídas de materiais e energias do sistema;

- Avaliação dos impactos potenciais relacionadas a estas entradas e saídas;
- Interpretação dos resultados das fases de análise de inventário e avaliação de impactos relacionados aos objetivos do estudo.

Sendo assim, a ACV estuda os aspectos ambientais e impactos potenciais a eles associados ao longo de toda a sua cadeia de produção “de seu nascimento até a sua morte”, ou seja, 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.

## **2.3 Desenvolvimento sustentável**

A discussão sobre a sustentabilidade do crescimento energético e ambiental do mundo vem sendo feita por décadas. Hoje a sociedade internacional, em seus diversos segmentos, tenta encontrar um posicionamento capaz de estabelecer regras específicas para preservação e ao mesmo tempo usufruir, de modo equilibrado, das fontes de energia que ainda restam de forma ambientalmente sustentável. Como ponto comum a todos, temos o fato de que para a manutenção da qualidade de vida a única saída é o desenvolvimento sustentável. Mas dentro deste contexto, o que é desenvolvimento sustentável?

Em 1992, foi realizada no Rio de Janeiro, a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, conhecida como ECO-92, que possibilitou o lançamento de dois documentos importantes para o processo de desenvolvimento sustentável global: a Agenda 21 e a Carta da Terra. Essa última tem como finalidade estabelecer acordos internacionais para proteger o sistema ecológico global e ao mesmo tempo respeitar o interesse de todos os envolvidos. Já a primeira é um conjunto de ações

que visa por em prática atitudes, ações e programas efetivos para parar o processo de degradação ambiental no mundo.

A ECO-92 foi um marco importante para o Brasil, pois foi após a sua realização que o país se impôs e pode definitivamente entrar para o cenário ambientalista internacional. Complementando o processo de estabelecimento de mecanismos e regras para a sustentabilidade ambiental global, foi realizada em 2000 a VI Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança Global do Clima. Esta conferência, realizada na cidade de Haia, Holanda, teve como um de seus resultados o estabelecimento do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo conhecido por MDL. O MDL representa a acordo entre 159 países, todos participantes da conferência, visando a redução dos poluentes atmosféricos em cada um deles. Tanto a ECO-92 quanto a Conferência sobre a Mudança no Clima, em Kyoto, são mecanismos que se completam e estabelecem premissas e ações específicas para alcançar, em médio prazo, um maior equilíbrio ambiental e atmosférico visando um desenvolvimento sustentável. As informações apresentadas até agora, dão conta de que a geração de energia deve ser considerada em seus mais diversos aspectos.

Considerando tudo o que já foi citado, fica claro que a energia não se limita apenas a sua estrutura de construção, geração e distribuição, além das tecnologias de uso final. Ela vai além, possui dimensões políticas e socioeconômicas. Todas as tendências econômicas e/ou sociais, o processo de globalização e a reestruturação do setor energético, aliados as inovações tecnológicas por qual passamos, irão influenciar as estratégias e os sistemas energéticos deste século, não só por sua utilização e aceitação por parte da sociedade, mas também pela escassez dos recursos energéticos hoje existentes. Mesmo que atualmente a legislação de gestão de recursos e de proteção ambiental se mostre bastante farta, ainda assim parece não ser o suficiente para assegurar o manejo sustentável e a preservação dos recursos naturais que ainda existem. É preciso analisar e reformular a legislação para que se possa afetivamente obter um desenvolvimento sustentável. (FRAMIL,2004).

De acordo com NOGUEIRA (2001), muito embora exista uma projeção de crescimento no consumo das energias fósseis em nível mundial, o mesmo não acontece com as reservas destas energias. A tabela 2.1, mostra os números relativos às reservas comprovadas de petróleo, gás natural e carvão mineral no mundo e as estimativas para algumas reservas energéticas mundiais.

**Tabela 2.1 – Reservas mundiais comprovadas de petróleo, gás natural e carvão mineral.**

<b>Reserva</b>	<b>Disponibilidade [ZJ]*</b>
Carvão Mineral	200.0
Petróleo	11.7
Gás Natural	9.5
Xisto Betuminoso	1.2
Urânio-235	13.7
Energia Geotérmica Recuperável	0.4
Energia Hidráulica	1,08 . 10 <sup>-5</sup>

\* Z → zetta = 10<sup>21</sup>

**Fonte: NOGUEIRA (2001)**

Considerando-se os dados das tabelas 2.1 pode-se inferir que as reservas de combustíveis fósseis acabarão por alcançara seu limite máximo. Este é um fato relevante, principalmente com relação ao petróleo e ao gás natural, pois estas reservas, nas próximas décadas, atingirão um máximo de produção que não poderá ser mantido. Muito embora exista uma reserva energética, como exibido na tabela 2.2, composta de uma variedade razoável de fontes, estas se encontram em pontos específicos do planeta e não podem ser exploradas e/ou beneficiadas por qualquer um. Assim, para que uma grave crise energética mundial não ocorra, é necessário à inserção de novas fontes de energia não fósseis no mercado mundial.

Existe também a necessidade de se iniciar uma migração gradual para estas novas tecnologias de geração de energia. Dentre o leque de opções existentes, a mais provável é a da utilização das energias baseadas em fontes renováveis. Este fato pode ser comprovado tanto pelas crescentes restrições ambientais quanto pelo atual desenvolvimento das tecnologias ligadas direta ou indiretamente às energias renováveis. No caso específico do Brasil, tem-se os dados relativos ao setor energético brasileiro, mostrados na figura 2.1.

**Tabela 2.2- Recursos e reservas energéticas brasileiras em 31/12/2007 (1)**

Especificação	Unidades	Medidas/ indicadas/ inventariadas	Inferidas/ estimadas	Total	Equivalência energética 10 <sup>3</sup> tep (5)
<b>Petróleo</b>	10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup>	2.006.970	1.233.160	3.240.130,0	1.790.217
<b>Gás natural</b>	10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup>	364.991	219.482	584.472	362.436
<b>Carvão mineral</b>	10 <sup>6</sup> t	10.084	22.240	32.324	2.752.932 (2)
<b>Hidráulica</b>	GW (3)	112,2	26,2	138,4	84.527 / ano
<b>Energia nuclear</b>	t U <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	177.500	131.870	309.370	1.254.681 (4)

(1) Não inclui demais recursos energéticos renováveis. Considera fatores de conversão de 2007.

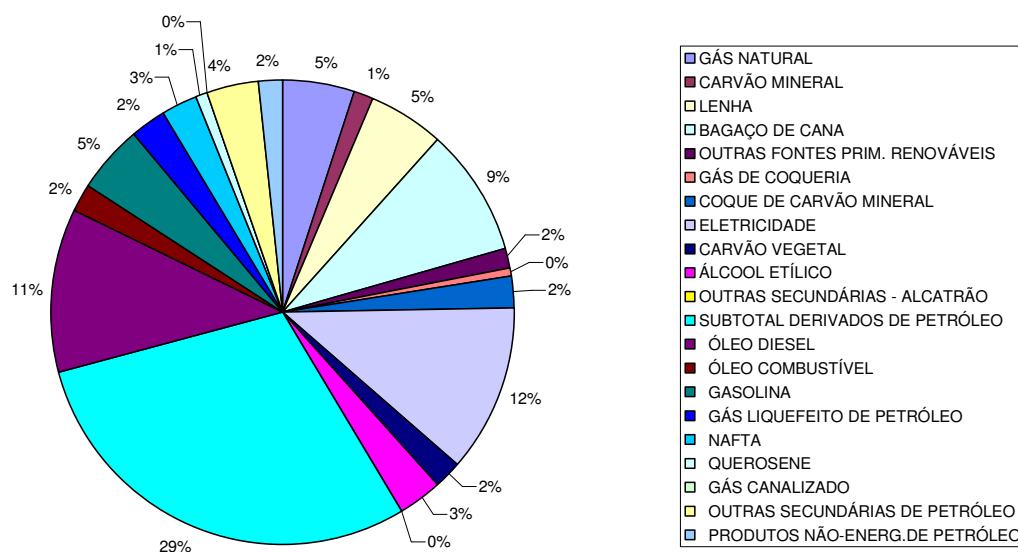
(2) Considera recuperação de 70% e poder calorífico de 3900 kcal/kg.

(3) Considera fator de capacidade de 55%.

(4) Considera perdas de mineração e beneficiamento e não considera reciclagem de plutônio e urânio residual.

(5) Calculado sobre reservas medidas / indicadas / inventariadas.

Fonte: Balanço Energético Nacional 2007 - (ano base 2006) – Ministério de Minas e Energia – (MME) - <http://www.mme.gov.br>

**Consumo final de energia por fonte no Brasil - 2007****Figura 2.1 – Consumo final de energia por fontes no Brasil - 2007**

Fonte: Balanço Energético Nacional 2008- (ano base 2007 – Ministério de Minas e Energia – (MME) - <http://www.mme.gov.br>

De acordo com a figura 2.1, o consumo energético do Brasil demonstra que a sua matriz energética é composta, em sua maior parte, de fontes de origem renovável, o que garante ao país uma posição de destaque frente aos novos desafios energéticos

apresentados pelo mercado neste século. Nestes moldes um futuro de crescimento e uso intensivo das energias fósseis denota uma grande quantidade de problemas e novos desafios para a humanidade tais como altos custos, poluição do ar, aquecimento global, depleção de recursos, desigualdades sociais, etc..

De acordo com o Plano Nacional de Energia 2030 - PNE, a elaboração de projeções da Matriz Energética Nacional (MEN) é a base para a formulação de políticas energéticas, que por sua vez são as bases para o Planejamento Energético Nacional. O PNE é um instrumento fundamental para o planejamento de longo prazo do Setor Energético do país, orientando tendências e balizando as alternativas de expansão do sistema nas próximas décadas, através da orientação estratégica da expansão. Ao longo do ano de 2006 foi priorizada a realização de vários estudos de planejamento, em consonância com a estratégia prevista no Novo Modelo Institucional do Setor Elétrico, destacando-se o presente estudo denominado Plano Nacional de Energia – PNE 2030, instrumento fundamental para o planejamento de longo prazo, orientando tendências e balizando as alternativas de suprimento da demanda de energia nas próximas décadas, através da orientação estratégica da expansão. A Tabela 2.3 exibe um resumo da projeção da oferta interna de energia no horizonte do PNE 2030.

**Tabela 2.3 – Projeção da oferta interna de energia (milhares de tep)**

	<b>2005<sup>1</sup></b>	<b>2010</b>	<b>2020</b>	<b>2030</b>
<b>Energia Renovável</b>	121.350	159.010	216.007	297.786
Petróleo e derivados	84.553	97.025	119.136	155.907
Gás natural	20.526	37.335	56.693	86.531
Carvão Mineral e derivados	13.721	20.014	30.202	38.404
Urânio (U3 O8) e derivados	2.549	4.365	9.976	16.944
<b>Energia Renovável</b>	97.314	119.999	182.430	259.347
Hidráulica e eletricidade	32.379	37.800	54.551	75.067
Lenha e carvão vegetal	28.468	28.151	28.069	30.693
Cana-de-açúcar e derivados	30.147	39.330	69.475	103.026
Outras fontes primárias renováveis	6.320	14.718	30.335	50.561
<b>Total</b>	218.663	279.009	398.437	557.133
1 - Dados realizados, fonte: Balanço Energético Nacional (MME/EPE, 2005).				

Fonte: Plano Nacional de Energia 2030 -Ministério de Minas e Energia – (MME) - <http://www.mme.gov.br> - 2007

Pode-se observar na tabela acima que existe uma tendência na diversificação da matriz energética do Brasil. Em 1970 o petróleo e a lenha representavam 78% do consumo de energia para 2030, projeta-se um quadro onde quatro fontes de energia serão

necessárias para explicar 77% do consumo: petróleo, energia hidráulica, cana-de-açúcar e o gás natural. Com isto reduz-se a importância relativa da lenha. Neste contexto, destaca-se a reversão na tendência de redução da participação das fontes de energia renovável na matriz. Em 1970, essa participação era superior a 58%, em razão da predominância da lenha. Com a introdução de fontes mais eficientes, a participação da lenha chega a 44,5% em 2005. O PNE indica a possibilidade de reversão deste quadro a partir de 2010, em razão da possibilidade da forte penetração de biodiesel e H-bio.

O desenvolvimento do uso de fontes sustentáveis de energia deve ser capaz de satisfazer plenamente as necessidades básicas dos consumidores e prover meios para melhorar o bem-estar social e atingir um desenvolvimento econômico em todo mundo, sem, contudo colocar em risco a qualidade de vida das gerações atuais e tão pouco das gerações futuras, além de não colocar em risco os ecossistemas existentes. Com esta linha de raciocínio é obvio que com os padrões energéticos atuais, não será possível atingir um futuro de energia sustentável. A consideração de TEIXEIRA (2001), sobre o consumo de energia e o grau de desenvolvimento de um país dá conta de que os países mais desenvolvidos são os maiores consumidores de energia. Este fato ocorre graças ao melhor padrão de vida dos consumidores. O que convém salientar é o fato de que este aumento no padrão de vida pode também ser indicativo de aumento do desperdício de energia e, em consequência, uma maior geração de resíduos e poluentes.

LAZZARINI (2003) revela que o ato de atender as necessidades dos consumidores, passa antes por uma discussão sobre consumo sustentável e o estabelecimento de uma relação entre consumo de produtos e de serviços. O problema considerado é o fato de que o nível de consumo global cresce mais do que a capacidade da eco-eficiência em se reduzir o uso dos recursos naturais., Isto é, embora haja um a diminuição da quantidade de matéria prima utilizada na produção de alguns bens de consumo, não há uma queda considerável no uso global de matérias-primas. Vários países já firmaram acordos entre si para promover o uso racional de energia e o desenvolvimento de novas tecnologias para os combustíveis fósseis e também para as fontes de energia renovável. Para entender melhor a colocação das fontes renováveis, é interessante primeiro conhecer, mesmo que de modo resumido, as características destas fontes. A tabela 2.4, mostra um resumo das principais características de algumas fontes renováveis. (TEIXEIRA, 2001).

**Tabela 2.4 – Características principais de fontes renováveis**

<b>Fonte</b> <b>Característica</b>	<b>Solar</b>	<b>Eólica</b>	<b>Geotérmica</b>
<b>Magnitude</b>	Extremamente grande	Grande	Muito grande
<b>Distribuição</b>	Mundial	Litoral, montanhas, planícies.	Fronteiras tectônicas
<b>Variação</b>	Dependente do dia, tempo e estação do ano.	Altamente variável	Constante
<b>Intensidade</b>	Baixa. No pico 1 KW/m <sup>2</sup>	Baixa, para média. 0.8 MW/Km <sup>2</sup>	Média. Abaixo de 600 °C
<b>Opções</b>	Sistemas térmicos, fotovoltaicos, passivos e bio-conversão.	Turbinas eólicas de eixo vertical e horizontal, bombas eólicas e navegação à vela.	Ciclos termodinâmicos a vapor e binários, magma geopressurizada.
<b>Estado da Arte</b>	Em desenvolvimento e algumas comerciais	Muitas comerciais, mas em desenvolvimento.	Em desenvolvimento
<b>Fator de capacidade</b>	< 25% armazenagem intermediário	Variável, a maior parte de 15 – 30 %	Alta, carga base.
<b>Melhorias</b>	Materiais, custos, eficiência fonte de dados.	Materiais, projetos, localização, fonte de dados.	Exploração, extração, uso pedra seca quente.
<b>Fonte</b> <b>Característica</b>	<b>Biomassa</b>	<b>Dos Oceanos</b>	<b>PCH</b>
<b>Magnitude</b>	Muito grande	Muito grande	Grande
<b>Distribuição</b>	Mundial	Litoral, trópicos	Mundial, montanhas
<b>Variação</b>	Dependente do clima e da estação do ano	Dependente da maré e das estações do ano e dos ventos.	Dependente das estações do ano
<b>Intensidade</b>	Moderada para baixa	Baixa	Moderada para baixa
<b>Opções</b>	Combustão, fermentação, digestão, gaseificação e liquefação.	Ciclos termodinâmicos osciladores de onda mecânicos, represagem de marés.	barragens e turbinas
<b>Estado da Arte</b>	Algumas comerciais, mas em desenvolvimento.	Incipiente	A maior parte comercial
<b>Fator de capacidade</b>	Quando necessário em estoque de curto prazo	Intermitente para carga base	Intermitente para a carga base
<b>Melhorias</b>	Tecnologia, gerenciamento da agricultura e silvicultura.	Tecnologia, materiais e custo.	Turbinas, custos, projeto, fonte de dados.

Fonte: **TEIXEIRA (2001)**

Observando os dados da tabela 2.2, verifica-se que as fontes renováveis possuem uma grande variedade de utilização, um grande potencial de uso, fornecimento e tecnologias variadas, mesmo com estas vantagens e oferecendo benefícios ao meio ambiente, quando comparadas às fontes fósseis, as fontes renováveis ainda possuem um custo mais alto na geração. Entretanto, mesmo com uma grande variedade de uso e com um desenvolvimento tecnológico em franco crescimento, é necessário que os governos gastem quantias adicionais aplicadas em pesquisa e desenvolvimento para que a geração atual e as gerações futuras possam obter benefícios com o uso de energia sustentável e um ambiente mais limpo. (TEIXEIRA, 2001).

Neste contexto, pode-se considerar que o futuro sustentável só acontecerá com uma maior dependência das energias renováveis e com o desenvolvimento de novas tecnologias de eficiência energética para reduzir o consumo crescente de energia. Além disto, é preciso considerar uma diminuição do uso da energia fóssil. No contexto geral, com a diminuição do consumo, cai também a necessidade de investimento no setor energético, o que favorece a melhoria dos sistemas de oferta de serviços para as camadas menos favorecidas do planeta. Com a evolução tecnológica atual, o desempenho e os custos das tecnologias renováveis melhoraram sensivelmente, a ponto de algumas delas competirem em igualdade com fontes convencionais de energia em aplicações específicas.

GELLER (2003) e SCHEER (2001) são enfáticos ao afirmar que as fontes renováveis poderiam suprir as necessidades energéticas o suficiente para atender a demanda mundial. Ele destaca como foco principal e carro chefe das fontes renováveis a energia solar. Esta consideração deriva da afirmação de que o Sol possui um potencial energético bom suficiente para atender as necessidades mundiais para um contexto que vai além de 2100. Um bom exemplo para validar estas afirmações é o mercado mundial para energia fotovoltaica que quase quadruplicou de 1995 até 2000. Este avanço ocorreu graças à integração de ações políticas de apoio e inovações tecnológicas. Os avanços tecnológicos vão desde melhorias no rendimento das células fotovoltaicas ao desenvolvimento de novos produtos que utilizam esta tecnologia. Como exemplo, os carregadores fotovoltaicos de bateria para telefones celulares, painéis fotovoltaicos flexíveis para aplicação em construção civil e adaptação de construções a esta nova tecnologia. É necessário pesquisar iniciativas que priorizem e atribuam mais confiança

as fontes renováveis, já que elas despontam como uma das melhores possibilidades de equilíbrio energético para o mercado para as próximas décadas.

Logo, o foco atual é buscar a sustentabilidade a médio e longo prazo em conjunto com as necessidades ambientais não apenas locais, mas também globais. Há neste contexto uma necessidade de mudança de atitude, de conceitos e hábitos enraizados no indivíduo e que são derivados de uma cultura energética baseada na existência de um fornecimento eterno de energia. Existe uma grande diferença entre ter consciência dos problemas a serem enfrentados e assumir uma postura real de enfrentamento com relação a estes problemas.

Para atingir um consumo sustentável é necessária uma mudança de atitude dos consumidores e principalmente das empresas e do mercado como um todo. Só com um quadro completo de mudança será possível alcançar o verdadeiro desenvolvimento sustentável almejado e necessário.

## CAPÍTULO 3 – A ENERGIA SOLAR NO CONTEXTO DAS ENERGIAS RENOVÁVEIS

### 3.1 - Introdução

O setor energético é um dos setores mais importantes do mercado. Isto se verifica observando o controle rigoroso que o estado tem sobre ele. As novas tecnologias, ligadas direta ou indiretamente a ele, tem tomado um espaço e uma importância cada vez maior no mercado mundial. Imaginar que no futuro, todas as casas sejam equipadas com uma fonte auto-suficiente de energia limpa e ecologicamente correta, parece quase impossível, mas não é bem assim. A energia solar está aí para mostrar que esta realidade é possível. A cada dia surgem mais projetos que buscam a utilização de fontes alternativas de energia e que sejam menos poluente e que possam ser utilizadas para substituir as fontes convencionais de energia elétrica, térmica e nuclear. Neste âmbito, a energia solar desponta como uma das opções mais promissoras para o mercado de energia.

O Sol está ativo desde há 4.6 bilhões de anos e tem ainda combustível suficiente para continuar durante outros cinco bilhões de anos. Sua energia é criada na zona profunda do núcleo. Nesta região a temperatura atinge cerca de 15.000.000 °C e a pressão chega a atingir 340 bilhões de vezes a do ar na Terra ao nível do mar, com estas condições ocorrem as reações nucleares. No fim da sua vida, o Sol iniciará a fusão do hélio em elementos mais pesados e começará a inchar, crescendo tanto que “engolirá” os planetas que compõe o Sistema Solar, inclusive a Terra. Após um bilhão de anos como gigante vermelha, irá subitamente entrar em colapso e se transformará em uma anã branca, o produto final de uma estrela como a nossa. Poderá ainda levar um trilhão de anos até arrefecer completamente. (Rosa, 2007).

Longe destes aspectos apocalípticos, o Sol pode ser considerado uma gigantesca fonte de energia infinita que fornece para a Terra uma quantidade inesgotável de parte de sua energia. Em uma hora ele fornece para nosso planeta energia superior ao que se consome aqui em um ano inteiro. O melhor desta energia é que ela é renovável e não poluente.

Assim o Sol, estrela que nos ilumina e viabiliza todos os processos de vida da Terra, constitui a fonte primária dos principais sistemas de geração de energia. Desde de o seu fornecimento para o perfeito funcionamento do ciclo das águas, que formam as quedas d'água

utilizadas em hidrelétricas até o favorecimento das reações químicas sobre a matéria orgânica durante o processo de formação das energias e da queima de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão) em usinas termelétricas. Entre as formas de aproveitamentos fornecidos pela energia do Sol temos a energia extraída pela biomassa, energia eólica, além de energias não renováveis como a dos combustíveis fósseis.

Na energia de biomassa, o Sol fornece energia para a fotossíntese das plantas e para a evapotranspiração. Através da fotossíntese, as plantas capturam energia do Sol e transformam em energia química. Esta energia pode ser convertida em eletricidade, combustível ou calor. As fontes orgânicas que são usadas para produzir energias usando este processo são chamadas de biomassa. O Sol é também diretamente responsável pela produção da energia dos ventos, também chamada de energia eólica. Por isso a energia eólica pode ser considerada como uma das formas em que se manifesta a energia proveniente do Sol, isto porque os ventos são causados pelo aquecimento diferenciado da atmosfera. Essa não uniformidade no aquecimento da atmosfera deve ser creditada, entre outros fatores, à orientação dos raios solares e aos movimentos da Terra. Próximo à linha do Equador esta energia é mais concentrada, ao passo que nos pólos a mesma quantidade de energia é distribuída em uma área maior. A figura 3.1 mostra de modo simplificado as diferenças de aquecimento da atmosfera, como o descrito acima.

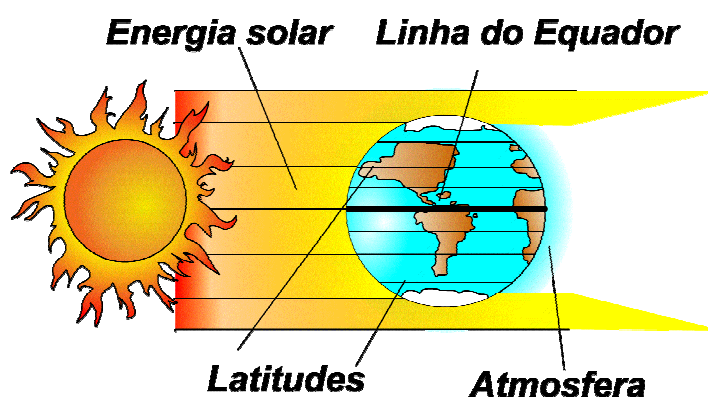


Figura 3.1 – Distribuição da energia solar sobre a Terra

Uma estimativa da energia total disponível dos ventos ao redor do planeta pode ser feita a partir da hipótese de que, aproximadamente, 2% da energia solar absorvida pela Terra é convertida em energia cinética dos ventos. Este percentual, embora pareça pequeno, representa centena de vezes à potência anual instalada nas centrais elétricas do mundo.

Outro item que deve ser salientado é a participação da energia solar no ciclo da água. A formação de rios e lagos se dá através das chuvas, neves e granizos que tem sua origem no vapor de água resultante da evaporação por incidência dos raios solares.

A transferência de água da superfície da Terra para a atmosfera, sob a forma de vapor, dá-se por evaporação direta, por transpiração das plantas e dos animais e por sublimação (passagem direta da água da fase sólida para a de vapor), como mostrado na figura 3.2.

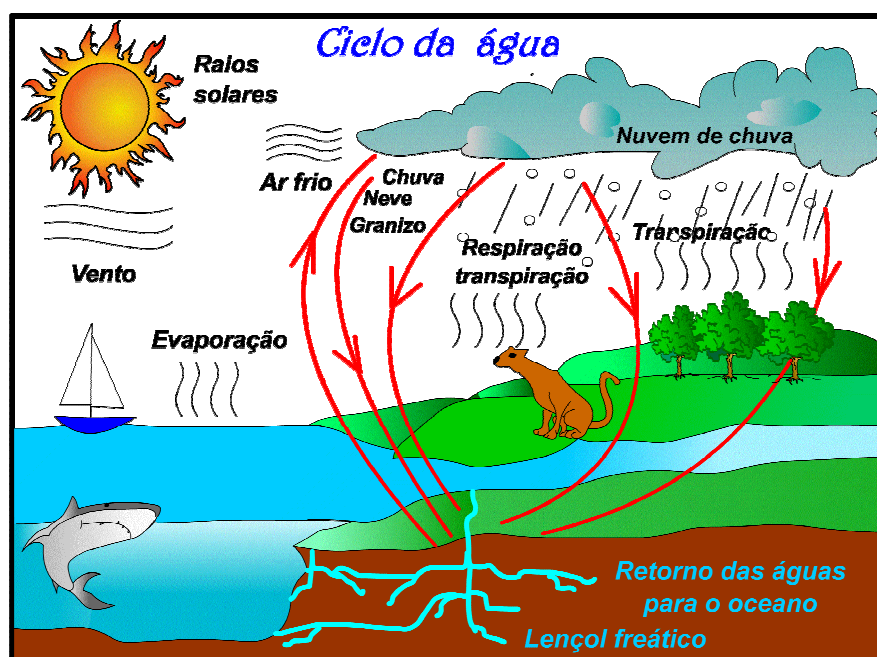


Figura 3.2 - Ciclo da água

Fonte: [http://www.escolavesper.com.br/ecossistemas\\_ciclo\\_da\\_agua.htm](http://www.escolavesper.com.br/ecossistemas_ciclo_da_agua.htm)

A quantidade da água mobilizada pela sublimação no ciclo hidrológico é insignificante quando se considera a que é envolvida na evaporação e na transpiração, cujo processo conjunto se chama de evapotranspiração. A energia solar é a fonte da energia térmica necessária para a passagem da água das fases líquida e sólida para a fase do vapor; é também a origem das circulações atmosféricas que transportam vapor de água e deslocam as nuvens.

Outro fato a ser considerado é que a energia solar é responsável indiretamente pela formação das energias fósseis. Mesmo sendo o Sol uma fonte de energia limpa, o mesmo não ocorre com algumas energias que dele derivam.

### 3.2 O Efeito Estufa

Uma das maiores causas da poluição é a queima de combustíveis fósseis como petróleo, carvão e gás natural. Esses combustíveis são usados para gerar eletricidade, aço, produtos metalúrgicos e químicos, aquecer casas, escritórios e fábricas, além de movimentar veículos. Quando os combustíveis são queimados, seus resíduos são liberados pelas chaminés, exaustores ou escapamentos de veículos, poluindo o ar. Entre os resíduos liberados pela queima dos combustíveis fósseis estão os gases. Gases chamados de Gases de Efeito Estufa – GEE. Entre eles o que mais contribui para a formação do aquecimento global causado pelo efeito estufa é o  $\text{CO}_2$ . Porém não é possível simplesmente eliminar a produção destes gases. Na maioria dos processos de produção de energia elétrica existe a emissão de  $\text{CO}_2$ .

O efeito estufa (figura 3.3) diz respeito ao processo físico natural pelo qual os gases presentes na atmosfera, principalmente vapores d'água e dióxido de carbono, que provocam a retenção do calor na superfície da Terra, o que mantém a sua temperatura em equilíbrio, em uma nível maior do que o planeta teria ,caso estes gases não estivessem presentes na atmosfera. Assim estes gases funcionam como uma redoma em volta do planeta, mantendo a temperatura da terra em torno de 16 °C.

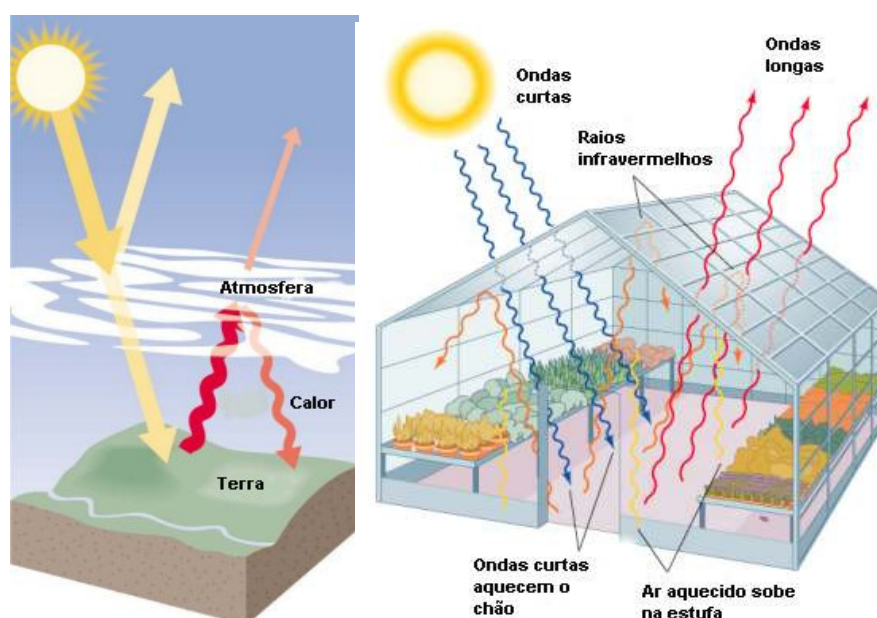


Figura 3.3 - Efeito Estufa

Fonte: <http://br.geocities.com/saladefisica5/leituras/estufa.htm>

Porém, o acelerado crescimento industrial aumentou muito a quantidade de GEE. Deste modo o fenômeno de aquecimento global se intensifica com o excesso destes gases poluentes resultantes das atividades antrópicas no planeta.

De acordo com TIAGO FILHO et al (2006), a energia elétrica é um dos principais vetores do desenvolvimento mundial. Sem o insumo energia não existe a possibilidade de realização da maioria de atos cotidianos como aquecer, resfriar, produzir, etc. É preciso considerar também que, com a revolução industrial, o mundo pode experimentar um grande salto com a utilização dos combustíveis de fontes fósseis para geração da energia necessária para o funcionamento das máquinas utilizadas nas indústrias. A partir daí a utilização do carvão e do petróleo não parou mais de crescer

As figuras 1.1 e 1.2 deixam claro que atualmente a matriz energética mundial é dominada em sua grande maioria por fontes de origem fóssil, cerca de 80% das fontes utilizadas no mundo. Com o aumento em grande escala deste tipo de energia, principalmente para geração de energia elétrica, há um conseqüente aumento da concentração de CO<sub>2</sub> o que causa um impacto direto na geração dos GEE, o que resulta em uma alteração expressiva na temperatura global. A figura 3.4 mostra o aumento do aquecimento global de 1880 até os dias de hoje.

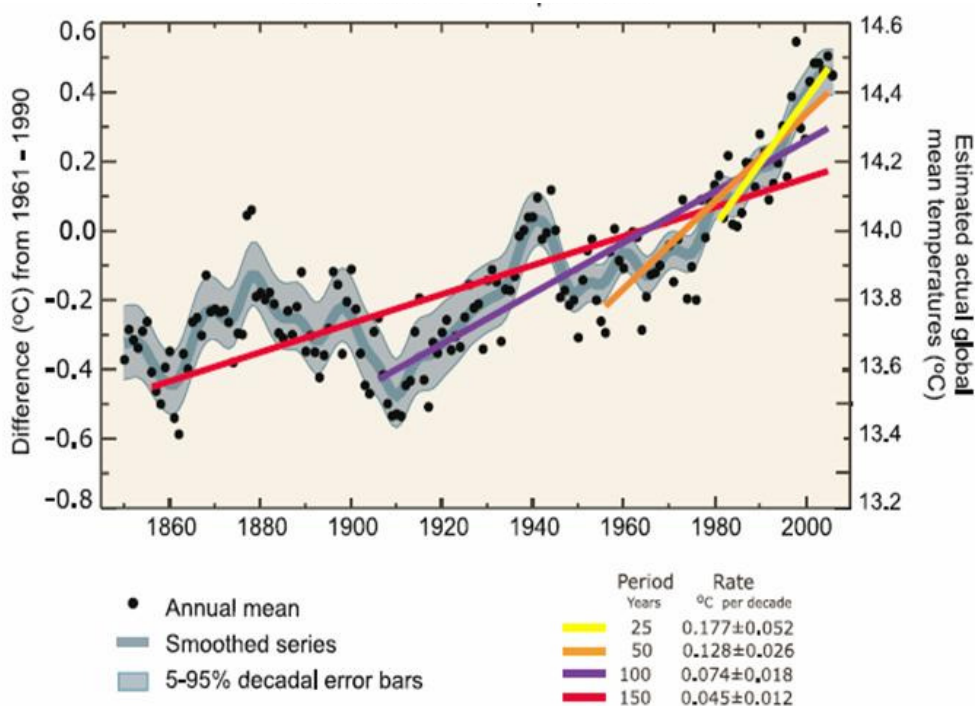


Figura 3.4 – Temperatura Global (1880 – 2000)

Pode-se observar na figura 3.4 que picos de aquecimento (média 5 anos), com valores acima da média anual vêm ocorrendo desde 1880. Caso a quantidade dos GEE não diminua, a radiação infravermelha retida pela atmosfera será muito maior o que acarretará em um aumento da temperatura do planeta em um nível prejudicial ao ambiente. Um das conseqüências diretas do superaquecimento será o aumento do nível dos oceanos devido ao derretimento das geleiras, além da modificação do regime dos ventos, aumento da evaporação da água, chuvas intensas em regiões desérticas e secas em regiões férteis. É difícil prever em que escala estes fenômenos podem ocorrer.

Uma pesquisa realizada pelo Banco mundial diz que atualmente existem 30% mais CO<sub>2</sub> na atmosfera do que no ano de 1850, quando iniciou o desenvolvimento da revolução industrial, figura 3.5.

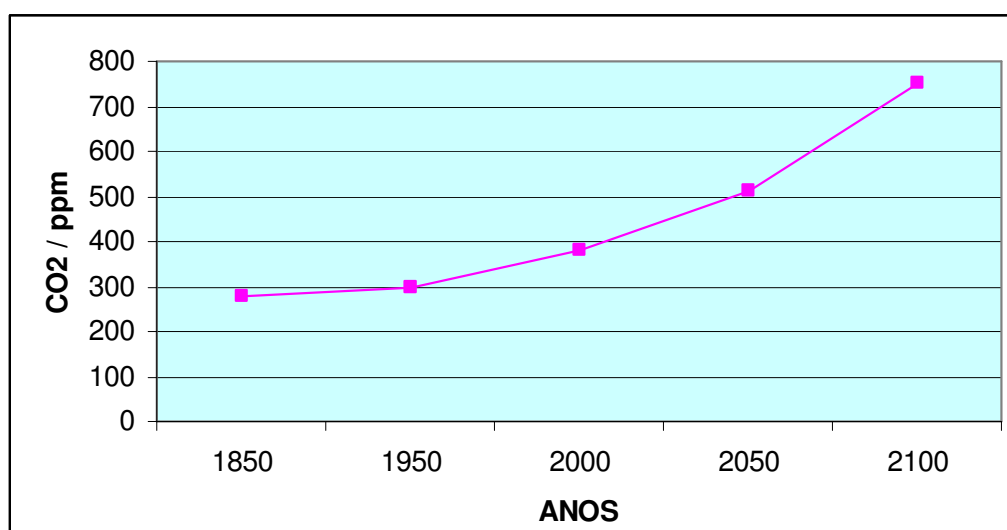


Figura 3.5: Aumento da concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera (1850 – 2100).

Fonte: International Panel on Climate Change – IPCC, 2003, apud TIAGO FILHO et al (2006).

Para diminuir as conseqüências das emissões do CO<sub>2</sub> na atmosfera alguns mecanismos foram criados para tentar mitigar as emissões dos GEE. Entre estes se encontra o Protocolo de Kyoto. Este protocolo é o Resultado da 3ª Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas. Ele é um acordo internacional que estabelece metas de redução de GEE para os países industrializados em pelo menos 5,2% no período de 2008 a 2012. A base de referência de redução dos níveis de emissões são as emissões do ano de 1999. (TIAGO FILHO et al 2006)

No Protocolo de Quioto foi estabelecido o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL. Este mecanismo propõe investimentos em projetos elegíveis de redução de emissões de

GEE. Isto permite que os países, do chamado Anexo I se beneficiem das reduções de emissões realizadas em países em desenvolvimento (países ou partes do não-Anexo I, sem compromisso de redução de emissão para o primeiro período de cumprimento do Protocolo).

De acordo com REIS (2002), através do MDL, os projetos que resultem em redução de emissão valerão créditos negociáveis no mercado internacional de carbono, favorecendo os países em desenvolvimento que não tem obrigação alguma com o processo de redução de emissões. Assim estes países podem se tornar locais para realização de projetos que reduzam as emissões dos GEE. Deste modo os países que são obrigados a reduzir suas emissões podem utilizar as reduções certificadas (CER) emitidas pelos países em desenvolvimento para parcialmente cumprir suas metas de redução.

De acordo com TIAGO FILHO et al (2006), de modo simples, os projetos de MDL podem ser alocados em duas categorias de desenvolvimento de projeto:

- 1- Projetos voltados para a redução de emissões: esta categoria abrange principalmente os projetos de melhoria e aumento de eficiência energética.
- 2- Projetos voltados para o “seqüestro”, para a captura destas emissões na forma de estocagem dos GEE retirados da atmosfera.: os projetos desta categoria são voltados para projetos ligados ao uso e manejo da terra e das florestas.

Para que um projeto seja elegível, ou seja, aceito como um projeto de MDL, ele deve se enquadrar nos critérios de elegibilidade do país hospedeiro e também ser capaz de gerar adicionalidade (volume de GEE que o projeto é capaz de reduzir ou deslocar, tendo como referência um determinado cenário, uma determinada Linha de Base).

A Chamada Linha de Base é definida como a quantidade de emissões de GEE que devem ocorrer na ausência das atividades propostas pelo projeto de redução destes gases. Estas reduções devem ser tomadas tendo como referência os limites pertinentes do projeto com relação a uma região, país, área, etc..Além de considerar o tipo de tecnologia disponível e as condições econômicas dos locais de aplicabilidade do projeto.

REIS (2002) diz que no caso de projetos de MDL voltados para o setor elétrico, as Linhas de Base possuem um alto grau de confiabilidade graças ao alto grau de estruturação e as especificações técnicas e condições operacionais dos dados existentes nas operadoras de

energia elétrica. De acordo com HAMWEY & SZEKELY apud REIS (2002) a Linha de Base construída à partir das informações existentes e disponíveis sobre as emissões dos GEE e da geração de energia elétrica existentes no país, acaba por reduzir ou ainda eliminar as incertezas do processo na sua estruturação. Deste modo a Linha de Base a ser construída é elaborada considerando-se apenas o fator de emissão (FE) nacional do país onde o projeto de MDL será instalado. Assim a Linha de Base pode ser calculada considerando-se as informações sobre a energia gerada e o nível de emissões, associado ao setor elétrico do país em questão.

Para KRAUTER (2003) na maioria dos casos o uso de energia renovável pode reduzir consideravelmente as emissões de CO<sub>2</sub> específicas de um país. Porém, mesmo que o sistema fotovoltaico, também chamado de sistema PV, possa ser útil para a mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>, os resultados podem não ser os mesmos quando se lança os resultados buscando um equilíbrio de CO<sub>2</sub> da atmosfera da Terra em uma balança global. O que ocorre é que deve ser considerado o fato de que o local de fabricação do módulo fotovoltaico (módulo PV) e o local de operação podem não ser os mesmos quando se considera o mercado global.

É necessário então que se faça a análise de capacidade de mitigação de CO<sub>2</sub> considerando que o módulo ao ser produzido estará utilizando uma fonte de energia que varia de acordo com a matriz energética do país onde está sendo fabricado, e que esta matriz energética pode ser muito diferente da matriz do país onde o módulo irá produzir energia elétrica. Como consequência da existência de diferentes matrizes energéticas, tem-se também diferentes intensidades de emissão de kg de CO<sub>2</sub> / kWh gerado.

Para realizar este tipo de análise, ALSEMA & NIEUWLAAR (1997) consideram que uma aproximação semelhante ao utilizado na amortização da energia, também chamado de Reembolso de Energia ou Energy Pay-Back Time – EPBT, discutido nos próximos capítulos, possa ser utilizada para determinar o reembolso de CO<sub>2</sub>, como um processo aceitável para mitigação do potencial de mudança climática associada aos sistemas fotovoltaicos. O processo é consiste em comparar as emissões equivalentes de CO<sub>2</sub> por kWh acumulada na fabricação do módulo PV com as emissões de CO<sub>2</sub> evitadas com o fornecimento de energia elétrica pelo painel com seu uso ao longo de sua vida útil. Neste caso não devem ser consideradas apenas a produção de CO<sub>2</sub> das emissões advindas da fonte de energia utilizada para produzir o módulo.

Existem emissões de CO<sub>2</sub> que participam deste processo e que vem de outras fontes que não a de geração de energia elétrica utilizada em sua fabricação. Como exemplo tem-se as emissões de CO<sub>2</sub> da produção do alumínio e do vidro empregado na montagem do módulo e

as emissões causadas pelo processo de redução da sílica, além da emissão, durante a produção destes elementos, de outros gases diferentes do CO<sub>2</sub> e que devem ser considerados por possuírem um grande potencial de efeito estufa. Tais gases possuem um potencial de efeito estufa que faz com que pequenas quantidades destes gases tenham uma grande contribuição para o efeito estufa. Como o principal gás contribuinte para o aquecimento global é o CO<sub>2</sub>, os demais gases podem ser traduzidos em quantidades equivalentes de CO<sub>2</sub> e contabilizados no processo de emissões analisado. A tabela 3.1 exibe uma lista de alguns gases e seu valor equivalente em CO<sub>2</sub>.

**Tabela 3.1. Conversão de alguns gases em kg eq - CO<sub>2</sub>.**

Elemento	Kg CO <sub>2</sub> - eq/kg (kg)	Elemento	Kg CO <sub>2</sub> - 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
C2F <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		

### 3.3 A energia solar hoje

Com o que já foi explanado pode-se estabelecer que o potencial de utilização da energia do Sol é bastante variado. Estudos e pesquisas têm surgido para validar e ao mesmo tempo por em prática estes potenciais existentes. A maioria dos especialistas atuantes na área de energia e seus congêneres a maioria afirmam que as diretrizes para os próximos anos devem girar em torno do uso das diversas fontes de energia renovável. Hoje, quando se fala sobre geração de energia elétrica, fala-se também em uma participação mais significativa destas fontes de energia renovável na geração de eletricidade, para satisfazer as necessidades da sociedade atual e das gerações futuras. Considerando esta afirmação, o Brasil já apresenta este tipo de característica de utilização das fontes renováveis dentro de sua matriz energética.

A figura 3.6 mostra que o país utiliza as energias renováveis e a energia hidráulica de modo intenso. Dentro do contexto de uma renovação da matriz energética favorecendo as fontes renováveis, o Brasil possui a vantagem de aparentar uma matriz energética privilegiada neste sentido.

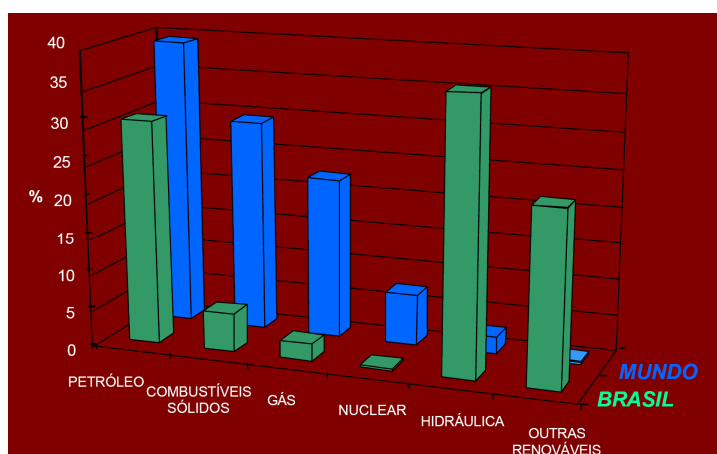


Figura 3.6 – Uso de energia Brasil versus Mundo (2005)

Fonte: CRESESB (2004) - [www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br)

Outro fator que chama a atenção sobre a utilização das fontes renováveis é a diminuição do seu custo ao longo do tempo. A tendência natural de uma tecnologia é a diminuição dos custos com o aumento de sua maturidade tecnológica. A tabela 3.2 mostra a maturidade e o custo das tecnologias em energia renovável. De acordo, com a tabela 3.2, a maturidade tecnológica para sistemas fotovoltaicos já esta demonstrada (média e alta) e atingiu o nível comercial. Mesmo estando o seu custo de investimento e geração acima da média das demais tecnologias, o seu custo de operação e manutenção é equiparável ao custo das demais. Porém, o custo de investimento e geração tende a diminuir conforme exista uma maior inserção tecnológica acompanhada de incentivos mais adequados à inserção destas tecnologias no mercado mundial de energia. A figura 3.7 mostra que em duas décadas os custos das energias renováveis não só caíram muito, mas também se tornaram mais equilibrados entre si. O que mais chama a atenção é a diminuição do custo da energia fotovoltaica neste período (1980 – 2000). Seu custo hoje não difere muito do custo de outras fontes renováveis e de acordo com o que é mostrado na figura 3.7, estas diferenças e seu custo devem ser ainda menores em uma projeção para 2030.

Tabela 3.2 – Maturidade e custo das tecnologias

Tecnologia	Solar fotovoltaica		Heliotérmica			Eólica	Biomassa	PCH's
			Torre central	Cilindros	discos			
<b>Tamanho típico (kW)</b>	0,05 a 10.000		30.000 a 200.000	50.000	300 a 2000	300 a 2000	10 a 50.000	Até 30.000
<b>Aplicação</b>	Intermitente, rede e fora da rede.		Base e rede	Base e rede	Base, rede e fora da rede.	Intermitente, rede e fora da rede.	Base, rede e fora da rede.	Variável, rede e fora da rede.
<b>Maturidade da tecnologia</b>	Demonstrada (1)	Comercial (2)	Pré-comercial	Comercial	Demonstrada	Comercial	Comercial	Comercial
<b>Viabilidade técnica</b>	Média (1)	Alta (2)	Alta	Alta	Média	Alta	Alta	Alta
<b>Custo investimento (US\$/kW)</b>	4.000 a 9.000		1.000 a 4.800	2.600 a 5.000	800 a 5100	700 a 1200	500 a 2.500	1.000 a 3.000
<b>Custo O&amp;M ((US\$/MWh)</b>	4 a 20		4 a 23	4 a 23	15 a 23	4 a 12	6 a 12	6 a 15
<b>Custo geração (US\$/MWh)</b>	250 a 500		100 a 250	130 a 250	100 a 250	35 a 120	38 a 78	35 a 102
<b>Eficiência</b>	10 a 18		15 a 30	15 a 30	15 a 30	25 a 45	25 a 35	60 a 85

(1) Rede

(2) Fora da rede

Fonte: CRESESB (2004) - [www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br)

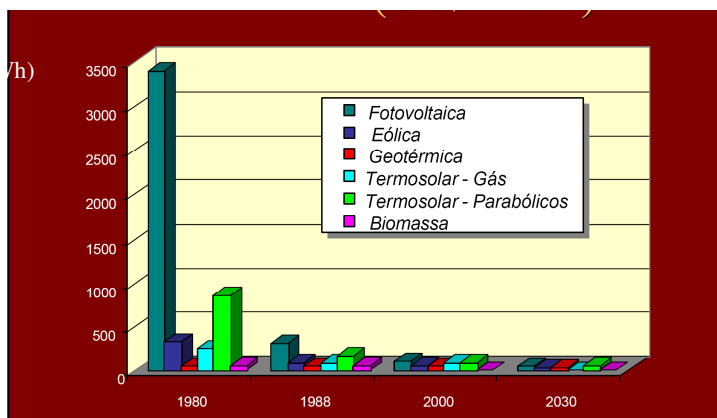


Figura 3.7 – Evolução dos custos das energias renováveis (1980 –2030)

Fonte: CRESESB (2004) - [www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br)

Falando especificamente sobre a energia fotovoltaica, nos últimos anos, tem-se experimentado um crescimento relativamente alto da fabricação de painéis fotovoltaicos e/ou células fotovoltaicas. A tabela 3.3 mostra como tem sido este crescimento nos últimos anos nos principais países produtores deste tipo de sistema.

**Tabela 3.3: Acúmulo de sistemas fotovoltaicos (MW) instalados - 2007**

País	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
Austrália	12,7	15,7	18,7	22,5	25,3	29,2	33,6	39,1	45,6	52,3	60,3	70,3	82,5
Áustria	1,4	1,7	2,2	2,9	3,7	4,9	6,1	10,3	16,8	21,1	24,0	25,6	27,7
Canadá	1,9	2,6	3,4	4,5	5,8	7,2	8,8	10,0	11,8	13,9	16,7	20,5	25,8
Rep. Checa	7,5	8,4	9,7	11,5	13,4	15,3	17,6	19,5	21,0	23,1	27,1	29,7	36,2
Alemanha	17,7	27,8	41,8	53,8	69,4	113,7	194,6	278,0	431,0	1034,0	1897,0	2727,0	3862,0
Dinamarca	0,1	0,2	0,4	0,5	1,1	1,5	1,5	1,6	1,9	2,3	2,7	2,9	3,1
Espanha	-	-	-	-	-	1,0	3,0	7,0	11,0	22,0	45,0	143,0	655,0
França	2,9	4,4	6,1	7,6	9,1	11,3	13,9	17,2	21,1	26,0	33,0	43,9	75,2
Grã-Bretanha	0,4	0,4	0,6	0,7	1,1	1,9	2,7	4,1	5,9	8,2	10,6	14,3	18,1
Israel	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,9	1,0	1,3	1,8
Itália	15,8	16,0	16,7	17,7	18,5	19,0	20,0	22,0	26,0	30,7	37,5	50,0	120,2
Japão	43,4	59,6	91,3	133,4	208,6	330,2	452,8	636,8	859,6	1132,0	1421,9	1708,5	1918,9
Koréa	1,8	2,1	2,5	3,0	3,5	4,0	4,8	5,4	6,0	8,5	13,5	34,7	77,6
México	9,2	10,0	11,0	12,0	12,9	13,9	15,0	16,2	17,1	18,2	18,7	19,7	20,8
Holanda	2,4	3,3	4,0	6,5	9,2	12,8	20,5	26,3	45,9	49,5	51,2	52,7	53,23
Noruega	4,7	4,9	5,2	5,4	5,7	6,0	6,2	6,4	6,6	6,9	7,3	7,7	8,0
Portugal	0,3	0,4	0,5	0,6	0,9	1,1	1,3	1,7	2,1	2,7	3,0	3,4	17,9
Suécia	1,6	1,8	2,1	2,4	2,6	2,8	3,0	3,3	3,6	3,9	4,2	4,8	6,2
USA	66,8	76,5	88,2	100,1	117,3	138,8	167,8	212,2	275,2	376,0	479,0	624,0	830,0
<b>Total</b>	<b>191</b>	<b>236</b>	<b>305</b>	<b>385</b>	<b>509</b>	<b>715</b>	<b>974</b>	<b>1318</b>	<b>1809</b>	<b>2832</b>	<b>4154</b>	<b>5584</b>	<b>7841</b>

Fonte: International Energy Agency – IEA- Photovoltaic Power Systems Programme – 2007  
<http://www.iea.org/>

Como pode ser observado na tabela acima, O Japão e os EUA ocupam um lugar de destaque na fabricação de sistemas fotovoltaicos no mundo. Porém o maior nível de crescimento se encontra na Europa (43,5%), com destaque para a Alemanha, país que mais cresce neste campo na Europa, como mostra a tabela 3.4 abaixo.

**Tabela 3.4 – Localização da fabricação de módulos/células fotovoltaicas (MWp)**

PAÍS	2002	2003	CRESCIMENTO
Alemanha	59	115,3	95,4%
ESPAÑA	50,1	56,2	12,2%
FRANÇA	17,6	17,6	0,0%
ITÁLIA	5,8	4,3	-25,9%
OUTROS PAÍSES	8,5	8,9	4,7%
<b>TOTAL EUROPA</b>	<b>141</b>	<b>202,3</b>	<b>43,5%</b>
JAPÃO	247,2	365,4	47,8%
USA	115,6	109	-5,7%
AUSTRÁLIA	9,7	26,2	170,1%
ÍNDIA	24,4	26,1	7,0%
CHINA	7,7	15	94,8%
OUTROS PAÍSES	12,2	19,6	60,2%
<b>TOTAL MUNDO</b>	<b>557,8</b>	<b>763,6</b>	<b>36,9%</b>

Fonte: European Photovoltaic Industry Association – EPIA - <http://www.epia.org>

As figuras 3.8 e 3.9 salientam os dados de fabricação de sistemas fotovoltaicos para a Alemanha, Japão, Estados Unidos em comparação com o restante do mundo.

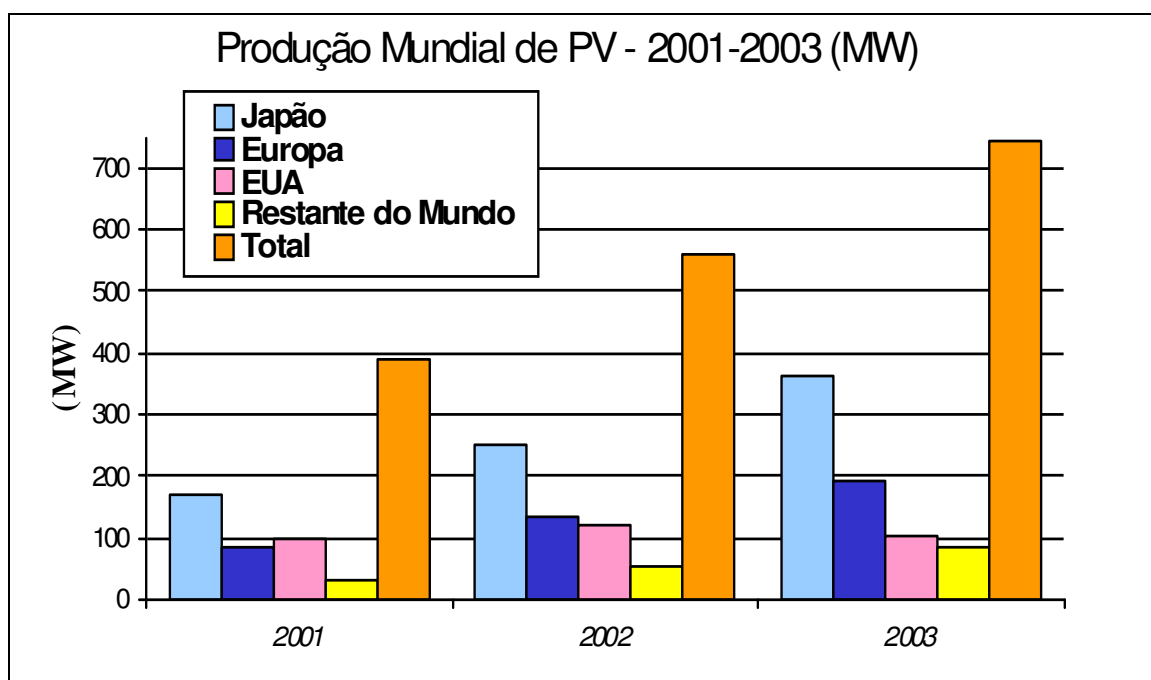


Figura 3.8 – Fabricação mundial de sistemas fotovoltaicos 2001 – 2003

Fonte: European Photovoltaic Industry Association – EPIA - <http://www.epia.org>

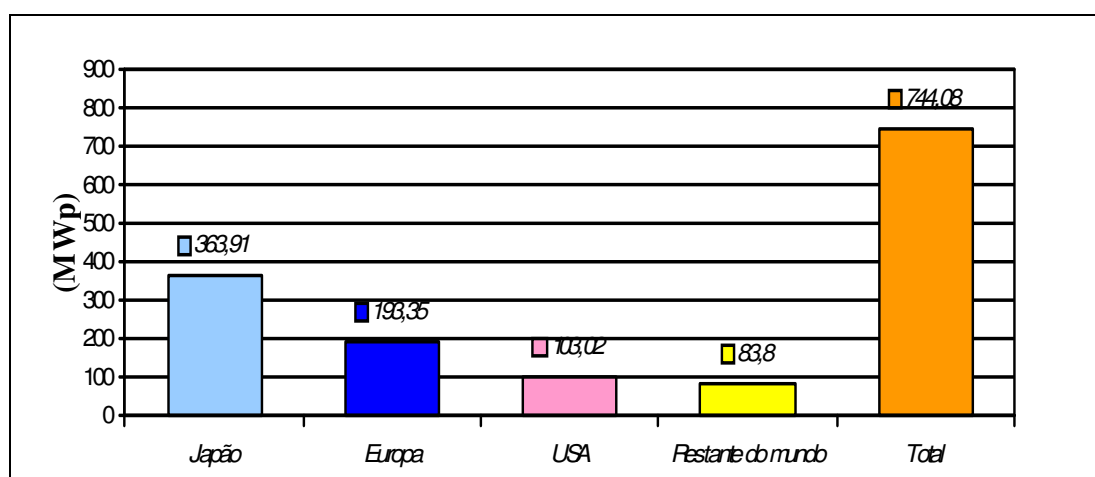


Figura 3.9 – Produção mundial de sistemas fotovoltaicos - 2003

Fonte: European Photovoltaic Industry Association – EPIA - <http://www.epia.org>

Os dados fornecidos até agora dão conta de que o mercado de fabricação de módulos fotovoltaicos está em franco crescimento em todo o mundo. Os países que mais se destacam neste mercado são: o Japão, a Alemanha e os Estados Unidos da América.

Mais especificamente, com relação à fabricação das células fotovoltaicas, a tabela 3.5 e a figura 3.10 mostram os dados de fabricação de células fotovoltaicas destes países e do mundo, já a figura 3.11 mostra onde a produção destas células é mais concentrada.

Dentre as tecnologias abordadas pela tabela 3.5, neste estudo serão consideradas as tecnologias de produção de silício mono-cristalino e poli-cristalino. A tecnologia de produção do silício amorfo, bem como os outros tipos de células fabricadas a base de Cádmio, Índio, Telúrio, etc., não serão contempladas neste estudo, muito embora o potencial de geração de passivo ambiental destas células, com relação aos componentes que formam a célula, seja maior do que as demais, já que os elementos utilizados em sua fabricação são potencialmente mais tóxicos do que os elementos utilizados pelas células de silício mono e poli-cristalino.

**Tabela 3.5 – Produção de células para módulos fotovoltaicos por tecnologia - 2003**

Tecnologia	Produção (MW)					Proporção do total
	EUA	Japão	Europa	Resto do Mundo	Total	
policristalino	13.42	271.23	114.50	60.65	<b>459.80</b>	61.79%
monocristalino	68.00	44.17	71.15	17.15	<b>200.47</b>	26.94%
Total mono e policristalino	81.42	315.40	185.65	77.80	<b>660.27</b>	88.73%
Silício amorfo	7.10	0.01	7.70	3.00	<b>17.81</b>	2.40%
Silício amorfo usado em recinto fechado	0.00	5.00	0.00	3.00	<b>8.00</b>	1.00%
Total Silício amorfo	7.10	5.01	7.70	6.00	<b>25.81</b>	3.40%
Silício cristalino com concentradores	0.70	-	-	-	<b>0.70</b>	0.10%
Tiras (Silício)	6.80	-	-	-	<b>6.80</b>	0.90%
Cádmio telúrio usado em recinto fechado	0.00	0.00 <sup>a</sup>	-	-	-	-
Cádmio telúrio ao ar livre	3.00	-	-	-	<b>3.00</b>	0.40%
Cobre Índio deselenídio	4.00	-	-	-	<b>4.00</b>	0.54%
Microcristalino Si / Mono Si	-	13.50	-	-	<b>13.50</b>	1.82%
Si sobre substrato de baixo custo	0.00	-	-	-	<b>0.00</b>	0.00%
A-Si em células Cz	-	30.00	-	-	<b>30.00</b>	4.00%

Fonte: European Photovoltaic Industry Association – EPIA - <http://www.epia.org>

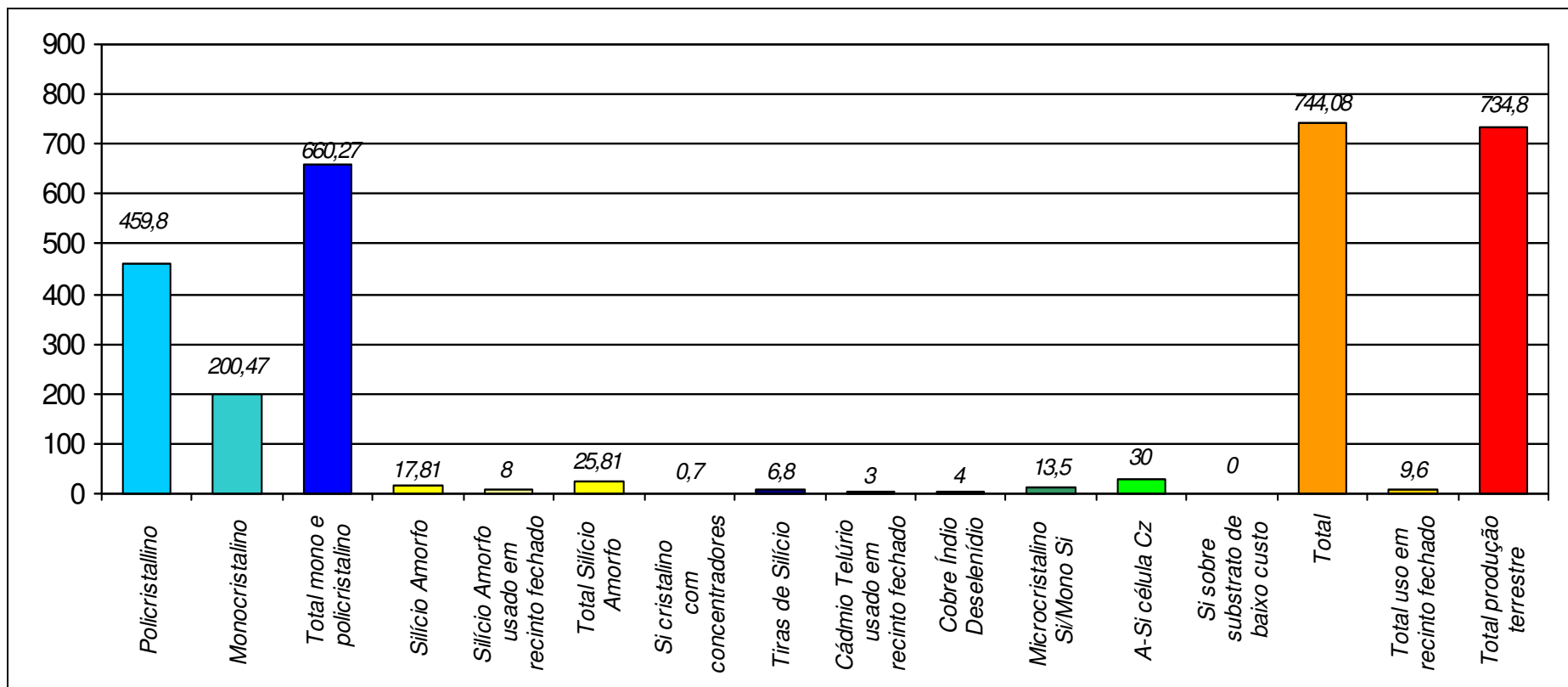


Figura 3.10 - Produção mundial de células/ módulos PV por tecnologia de célula [MW]

Fonte: European Photovoltaic Industry Association – EPIA - <http://www.epia.org>

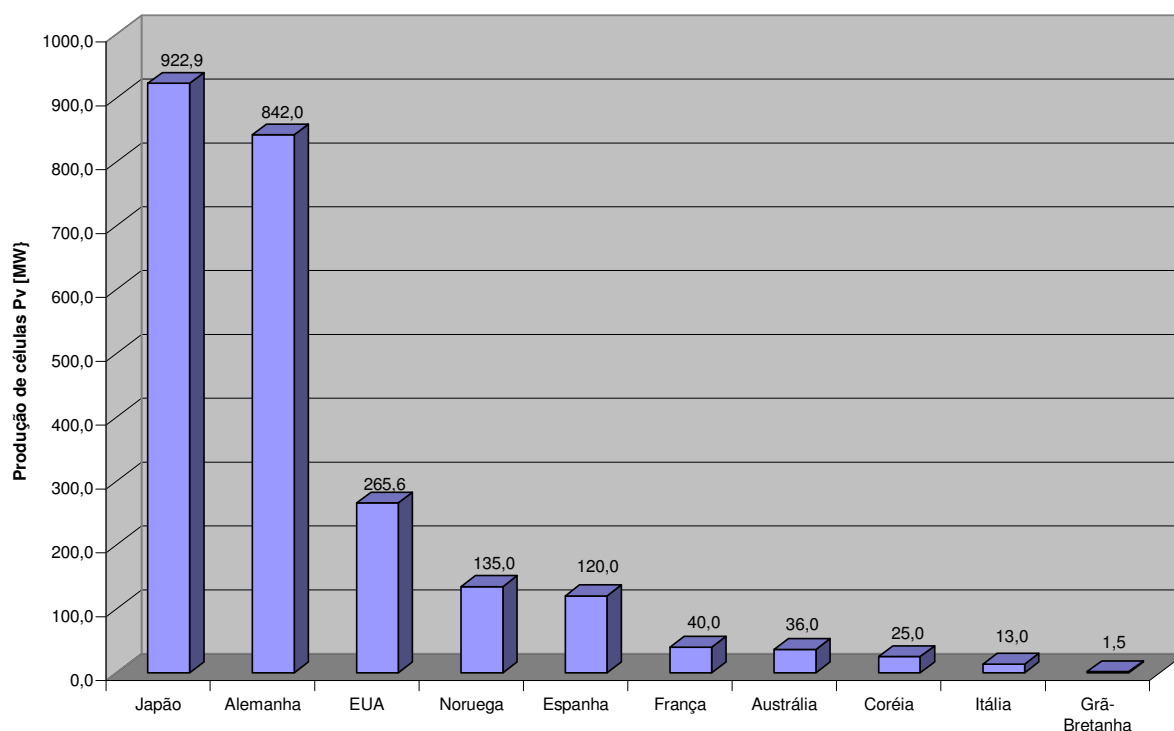


Figura 3.11 – Produção de células PV (MW) PV por país em 2007.

Fonte: EPIA - <http://www.epia.org>

Considerando os dados apresentados nas figuras 3.10 e 3.11, é necessário considerar neste estudo as características da produção das células mono e policristalinas, já que nas duas últimas décadas, foram estas as tecnologias mais utilizadas na fabricação dos painéis fotovoltaicos. Sendo assim, nos próximos anos, considerando o tempo de vida dos painéis com uma duração de 25 anos, tem-se uma grande quantidade de painéis fora de funcionamento sendo descartados no ambiente. Outro fator a ser considerado é que para cada painel, ao longo de sua vida útil, são utilizadas cerca de 4 a 6 baterias de chumbo-ácido. Estas acabam sendo descartadas no ambiente em função do fim de sua vida útil (3 a 5 anos).

Além disto, os dados acima reafirmam os países citados como os maiores produtores mundiais deste tipo de tecnologia. Portanto este estudo tomará a Alemanha, o Japão e os Estados Unidos da América como referência de países de origem dos painéis PV para seus cálculos e análises de dados. Além destes países considera-se também neste estudo o Brasil como importador e provável fabricante de módulos PV.

Como citado anteriormente, a tecnologia fotovoltaica ainda é cara para a maioria dos países em desenvolvimento. Mesmo sendo inviável do ponto de vista econômico para a maioria da população, a energia elétrica gerada através da energia fotovoltaica tem se mostrado um terreno promissor e possui uma variedade razoável de equipamentos movidos à energia solar. Este número pode e tende a ser ampliado conforme a divulgação, disseminação deste tipo de tecnologia e a diminuição do preço dos equipamentos se tornarem mais presentes na vida de cada indivíduo.

Dentre as duas opções de utilização direta da luz solar para obtenção de energia, tanto para aquecimento quanto para geração de energia elétrica, esta última tem se mostrado a que possui melhores possibilidades em ter seu potencial de uso impulsionado nos próximos anos. A geração de energia fotovoltaica tem chamado à atenção tanto do meio acadêmico quanto do meio social. Sendo, em consequência, apontada como uma das grandes potencialidades do setor energético para o século XXI. É necessário esclarecer que as propostas de utilização dos sistemas PV passam por três tipos de sistema: O isolado, o híbrido e o interligado, descritos a seguir. (MACIEL E LOPES, 1999).

- Sistemas PV isolados ou autônomos: Este tipo de sistema é utilizado para atender os locais onde a rede convencional não alcança ou se torna onerosa demais para ser utilizada. Estes dependem apenas da energia solar para responder às exigências do consumo. Estes são sistemas constituídos por um conjunto de painéis, um regulador de carga, uma ou mais baterias e um inversor, isso se existirem cargas que funcionem em corrente alternada – AC, já que o equipamento produz apenas corrente contínua – CC. Os reguladores de carga são os responsáveis pelo controle da carga das baterias, estas por sua vez deverão ter capacidade suficiente para alimentar as cargas durante a noite ou durante dias com baixos valores de radiação.
- Sistemas PV híbridos: Consistem na combinação de sistemas PV com outras fontes de energia que asseguram a carga das baterias na ausência de insolação. As fontes de energia de auxílio podem ser: diesel, gás ou geradores eólicos. Estes sistemas têm que estar equipados com sistemas de controle mais eficientes que os sistemas isolados de pequena dimensão.

- **Sistemas PV Interligados:** Este tipo de sistema ocorre quando o sistema PV está interligado a rede elétrica convencional. Neste caso o sistema pode retirar da rede elétrica convencional a energia que for necessária caso o sistema PV não esteja suprindo a carga em uso. Outra possibilidade é a de que o sistema PV possa injetar na rede sua energia excedente, caso exista.

Por outro lado, se as energias renováveis são atraentes para o consumo e em alguns casos melhores e mais desejáveis do que as fontes de energia fóssil e nuclear, é natural que se questione o fato de que, quando se necessita de mais energia elétrica, as fontes de energia sustentável são escolhidas com menos frequência do que as fontes de origem fóssil e mineral. Outro fator a ser considerado é a existência de barreiras que impedem a utilização das fontes renováveis com uma maior frequência.

### **3.4 As fontes renováveis e as barreiras de mercado**

À medida que as novas tecnologias forem implementadas favorecendo as fontes renováveis e a sua eficiência energética aumentar, algumas destas barreiras cairão. No entanto existem barreiras que tendem a persistir enquanto não são atacadas diretamente por processos de intervenção tanto econômicos como políticos. Estas barreiras, segundo GELLER (2003) e COSTA (2005), podem ser consideradas quanto ao uso das fontes renováveis, tanto quanto ao uso mais eficiente do seu fornecimento. Assim, elas podem ser divididas em dois grupos:

- 1) Quanto ao uso das fontes renováveis
- 2) Quanto a maior eficiência energética.

As tabelas 3.6 e 3.7 mostram um resumo dos tipos de barreira dos grupos citados.

Na visão de COSTA (2005), fica mais claro agora que o mercado em transformação dos dias de hoje, carece de uma estrutura a ser formada, favorecendo a utilização de novas formas de energia preferencialmente de origem renovável.

Porém a formação desta nova estrutura deve levar em conta que, os custos de uma fonte energética são função da capacidade instalada e são menores para tecnologias mais antigas, as chamadas fontes tradicionais.

Esta mesma afirmativa não serve para as tecnologias mais recentes, para estas vale a afirmação de que seus custos se reduzem mais rápido do que as tecnologias das fontes tradicionais. Outro fato também deve ser levado em consideração sobre as novas tecnologias para fontes renováveis, elas têm sido utilizadas para reduzir as diferenças existentes, com relação ao acesso à energia, em padrões regionais, principalmente quando comparadas com fontes tradicionais. Neste caso, as fontes renováveis podem, a médio e longo prazo, se tornar competitivas em comunidades isoladas.

Para GELLER E SCHEER (2003), as fontes renováveis de energia poderiam atender toda a demanda no mundo. Algumas fontes renováveis já estariam competindo com igualdade com fontes convencionais de energia em aplicações específicas. O mercado global de energia fotovoltaica quase que quadruplico de 1995 a 2000, graças a avanços tecnológicos aliados a políticas de apoio.

Tabela 3.6 - Barreiras de mercado quanto ao uso das fontes renováveis de energia

<b>Barreira</b>	<b>Descrição</b>
<b>Limitação da infra-estrutura de fornecimento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pequeno porte: menor possibilidade de estar prontamente disponível no mercado.</li> <li>• Pequena demanda e menor respaldo legal: diminuição da fabricação, comercialização e importação (aumento de preço)</li> </ul>
<b>Qualidade dos produtos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produto com rendimento abaixo do esperado limita novas aquisições;</li> <li>• Má instalação provoca funcionamento inadequado.</li> </ul>
<b>Insuficiência de treinamento informação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desconhecimento das medidas de eficiência energética e das características de cada tecnologia, suas vantagens e desvantagens;</li> <li>• Empresas desconhecem o mercado em potencial e sobre como utilizar esta tecnologia em benefício de sua fabricação.</li> </ul>
<b>Falta de fundos e/ou investimentos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de retorno de investimentos não muito baixo: necessidade financiamentos e subsídios com baixas taxas de juros e maiores prazos de empréstimos;</li> </ul>
<b>Preços e tarifas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Custos para eletrificação com energia fotovoltaica podem ter um custo/benefício maior do que o praticado por instalações elétricas convencionais, se avaliadas em seus valores reais de custo/benefício (custos sociais e ambientais)</li> </ul>
<b>Barreiras oriundas das concessionárias e de origem regulatória</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Política de exigências de alto custo para os contratos de aquisição e a interconexão do excesso de energia produzido por fontes renováveis e fornecidos a rede tornam projetos de pequena escala inviáveis;</li> <li>• Burocracia e tempo necessário para aprovar a locação e/ou instalação de equipamentos e projetos.</li> </ul>
<b>Obstáculos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tradição no tipo de desenvolvimento de setores como matriz energética,</li> <li>• Força econômica,</li> <li>• Influência política das indústrias de energia convencional;</li> <li>• Interesses corporativos pressionando o cenário político para impedir o avanço da adoção de políticas favoráveis às fontes de energia renovável.</li> </ul>

Fonte: elaboração própria á partir de GELLER (2003)

**Tabela 3.7 - Barreiras de mercado quanto a maior eficiência.**

<b>Barreira</b>	<b>Descrição</b>
<b>Limitação da infra-estrutura de fornecimento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tecnologias eficientes desenvolvidas para utilização de energia não estão disponíveis de imediato na maioria dos países;</li> <li>• Sem fabricação industrial em grande escala para fornecer a tecnologia a preços acessíveis</li> </ul>
<b>Qualidade dos produtos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Baixa qualidade de produtos eficientes no uso de energia e má qualidade em eficiência de um produto prejudicam os demais diminuindo a aceitação.</li> </ul>
<b>Insuficiência de treinamento informação</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Falta de informações sobre as vantagens econômicas, de produtividade e de saúde leva ao não entendimento sobre como otimizar o uso da energia em residências e/ou empresas;</li> <li>• Falta capacitação técnica especializada neste contexto em diversos setores.</li> </ul>
<b>Má alocação de incentivos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diferença de interesses entre quem se beneficia com a aquisição de equipamentos e dos responsáveis pela aquisição dos mesmos;</li> <li>• Obtenção de lucro imediato versus obtenção de um melhor custo /benefício a médio e longo prazo.</li> </ul>
<b>Procedimentos de compra</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Decisões de compra tomadas sem considerar a eficiência energética podem posteriormente acarretar em altos custos para o setor empresarial e industrial;</li> <li>• A ineficiência energética e o excesso de consumo energético acabam por afetar toda a sociedade.</li> </ul>
<b>Falta de capital e/ou financiamento</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mercado com altos juros e com poucos subsídios e financiamentos em comparação com as energias fósseis.</li> </ul>
<b>Preços e tarifas</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mesmo sem os subsídios, os preços dificilmente refletem os custos reais para a sociedade, oriundos da produção da energia utilizada, os custos finais para o consumidor não incluem os custos sociais e ambientais.</li> </ul>
<b>Barreiras oriundas das concessionárias e de origem regulatória</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• As concessionárias de energia não oferecem incentivos financeiros aos consumidores que se utilizam de modo mais eficiente a energia que consomem;</li> <li>• O tipo de regulamentação existente pode inibir o mercado e os investimentos em técnicas e medidas de eficiência energética;</li> </ul>
<b>Obstáculos</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• O poder de atuação no mercado de determinadas empresas podem influenciar o mercado a tomar atitudes para impedir a implantação de ações políticas de aumento de eficiência energética.</li> </ul>

Fonte: elaboração própria á partir de GELLER (2003)

## CAPÍTULO 4 – AS MATRIZES ENERGÉTICAS DOS PAÍSES FABRICANTES DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

### 4.1 As matrizes energéticas e as fontes renováveis

Considerando que as fontes renováveis de energia dependem muito da formação territorial de cada país, bem como de diversos fatores concernentes a cada um deles para validar a sua utilização, é necessário conhecer um pouco mais sobre o cenário onde estas fontes se localizam. Neste estudo serão considerados os dados relativos a quatro países: Brasil, Alemanha, Japão e Estados Unidos da América.

De acordo com A INTERNATIONAL ENERGY AGENCY - IEA (2004), a energia renovável foi responsável por 15,1 % de produção de eletricidade em países pertencentes ao IEA no ano de 2001, entre eles a Alemanha, o Japão e os Estados Unidos da América. A maior parte da produção de eletricidade de energias renováveis é de origem hídrica (86,3% do total das energias renováveis), como mostra a figura 4.1ª e 4.1 b.

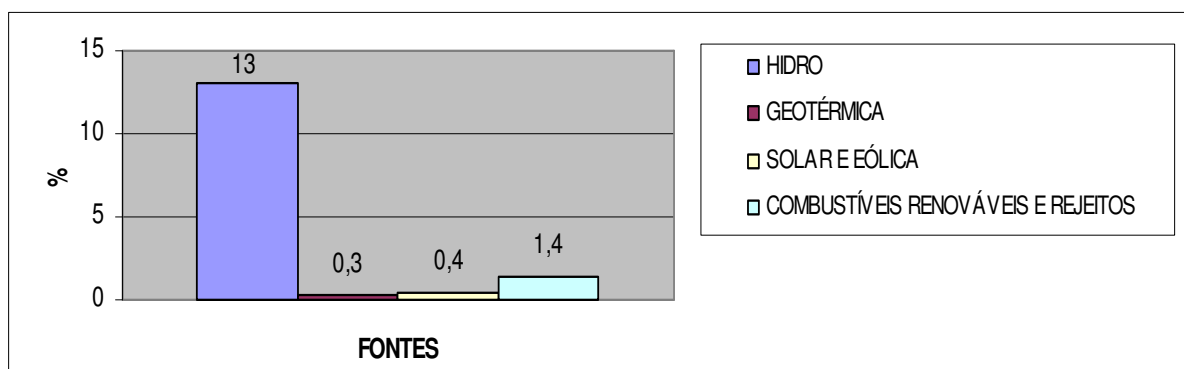


Figura 4.1a - Produção de eletricidade em países pertencentes a IEA (2001) (%)

Fonte: International Energy Agency - IEA – (2004) - <http://www.iea.org>

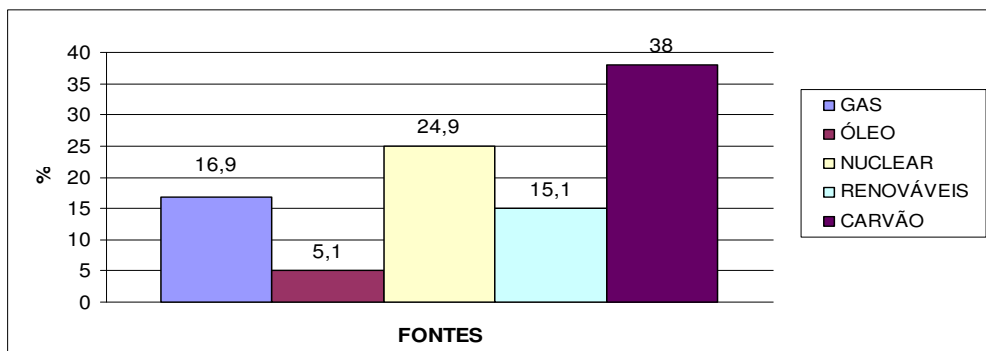


Figura 4.1b - Produção de eletricidade em países pertencentes a IEA Energias renováveis (2001) (%)

Fonte: International Energy Agency - IEA – (2004) - <http://www.iea.org>

Desde a década de 1970, a geração de eletricidade por fontes renováveis de energia vem crescendo, saindo de 864 TWh em 1970 e chegando a 1375 TWh em 2001. A figura 4.2 mostra mais claramente como tem sido este crescimento ao longo dos anos.

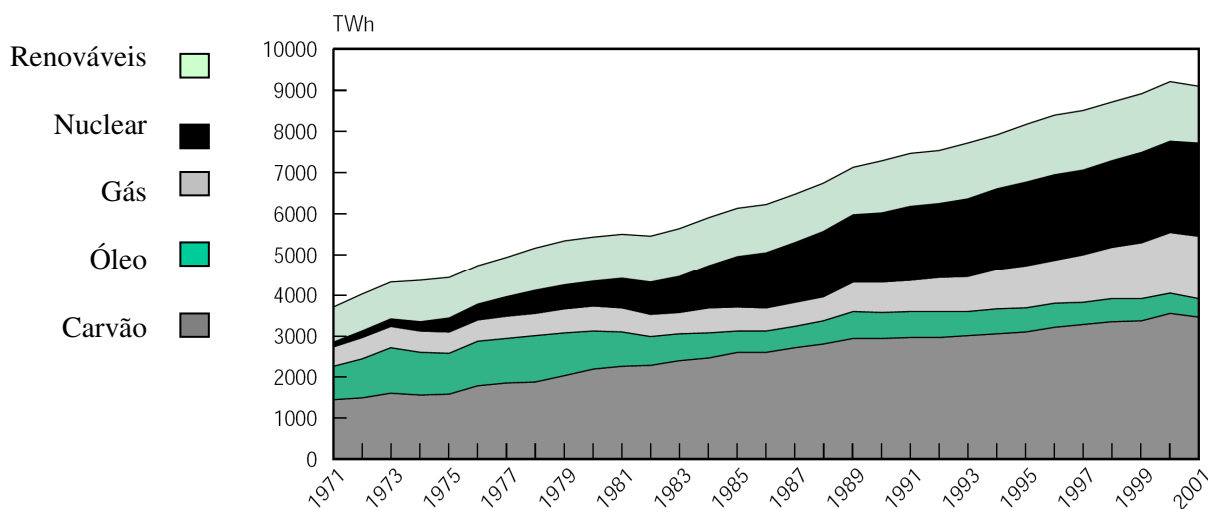


Figura 4.2 – Produção de eletricidade em países pertencentes a IEA (1971 - 2001)

Fonte: International Energy Agency - IEA – (2004) - <http://www.iea.org>

Os trabalhos com pesquisas energéticas, pesquisa e desenvolvimento dos governos aumentaram muito desde os choques de preço do petróleo na década de 1970. O orçamento gasto nestes implementos depende diretamente dos recursos naturais existentes em cada país. A Alemanha destinou 48% do orçamento para energia renovável de pesquisa e desenvolvimento no período de 1992 a 2002 para recursos

solares, International Energy Agency – IEA, material disponível on line em: <http://www.iea.org>, Último acesso em: 27/10/2006.

O que ocorre é uma gradual queda dos preços dos sistemas fotovoltaicos ao longo do tempo. De acordo com a IEA (2004), inicialmente a tecnologia fotovoltaica era utilizada principalmente em satélites (década de 1950). Na década de 1970, com a diminuição dos preços, foi possível utilizar esta tecnologia também em áreas remotas, apesar de os preços para recarga de baterias ou sistemas residenciais serem ainda altos demais. O crescimento para este tipo de sistema ocorreu no início da década de 1990. Neste período a capacidade instalada teve uma taxa de crescimento anual da ordem de 29% entre 1992 e 2001. No ano de 2001, o Japão, a Alemanha e os Estados Unidos foram responsáveis por 85 % do total da capacidade total instalada, cerca de 1000 MW, como mostra a figura 4.3.

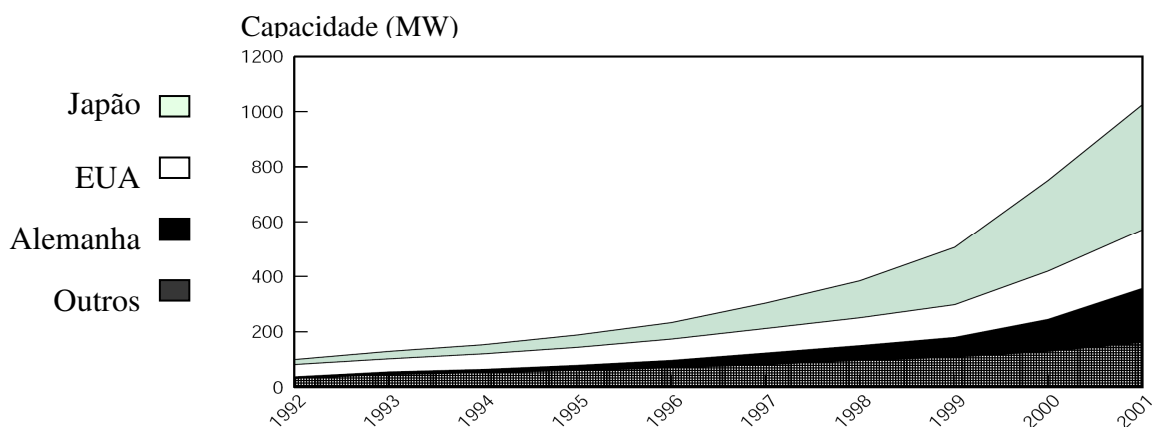


Figura 4.3 – Sistemas fotovoltaicos - Capacidade instalada em países da IEA(1992 - 2001)

Fonte: International Energy Agency - IEA – (2004) - <http://www.iea.org>

Hoje, a Europa e o Japão possuem o maior número de sistemas fotovoltaicos em telhados e edificações, principalmente nos chamados edifícios integrados a sistemas fotovoltaicos interligados ao sistema de distribuição e/ou transmissão - BiPV. Em 2002, eles responderam por 92% das novas instalações. Embora na Alemanha a produção de eletricidade com sistemas fotovoltaicos tenha uma proporção global pequena, sua produção tem crescido a uma taxa de 60% ao ano. Para os Estados Unidos e para o Japão é esperado um crescimento mais alto devido a sua maior capacidade instalada e ao maior regime de intensidade solar. É possível observar o compromisso dos Estados Unidos, Japão e Alemanha com a tecnologia de PV através dos orçamentos de pesquisa e desenvolvimento no período de 1990-2002 conforme exibido na tabela 4.1.

International Energy Agency – IEA, material disponível on line em: <http://www.iea.org>,  
Último acesso em: 27/10/2006.

**Tabela 4.1 – Orçamento de pesquisa e desenvolvimento de 1990 a 2002**

País	Orçamento anual 1990 – 2002 (milhões US\$)	Orçamento P&D para energia renovável (%)	Total das despesas de P&D (%)
EUA	77,3	32,6	2,9
Japão	66,1	59,6	2,1
Alemanha	40,1	48,6	12,5

Fonte: International Energy Agency - IEA – (2004) - <http://www.iea.org>

Nestes países, os esforços na área de pesquisa e desenvolvimento, adicionados a políticas de desenvolvimento de mercado, foram eficientes ajudando a reduzir os custos de produção dos módulos fotovoltaicos.

A variação dos custos de desenvolvimento e da tecnologia utilizada varia muito, de acordo com o tamanho e tipo do sistema, do local, tipo de conexão, entre outras especificações técnicas. Em média, os custos de instalação para BiPV e sistemas PV conectados a telhados ficam em torno de 5 a 9 US\$/Watt. Porém, estes custos dependem da maturidade da tecnologia e do mercado e das condições do local de instalação e utilização. Assim, mesmo que sistemas PV isolados custem mais caro, estes podem competir com outros sistemas de distribuição de eletricidade em pequena escala, principalmente quando estes utilizam combustíveis tradicionais mais caros ou de difícil acesso. Mesmo que os custos de produção de sistemas PV estejam diminuindo, ainda é necessário que haja um maior investimento em pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias, principalmente com relação à redução dos custos de produção das células fotovoltaicas e dos módulos, já que estes são os componentes mais caros e fundamentais dos sistemas fotovoltaicos. Além de ser necessária uma maior inserção do apoio governamental para incentivar e estabelecer novas diretrizes para o crescimento destas tecnologias, buscando sempre um maior equilíbrio de custo/benefício do sistema. Na sequência serão descritas de modo resumido os dados sobre a matriz energética dos países considerados neste estudo. (GELLER, 2003).

## 4.2 A matriz energética do Brasil

Para BERMANN (2003), as reservas dos potenciais energéticos de um país dependem de seu nível de conhecimento com relação a seus recursos e reservas. Porém o dimensionamento das mesmas depende, em qualquer país, das condições tanto econômicas quanto tecnológicas em que esta análise é realizada. A adição de valores e aspectos sócio-ambientais nestes processos de avaliação ainda não se mostraram importantes no Brasil, muito embora a necessidade deste tipo de valor agregado seja realmente necessária ao Brasil.

Considerando os aspectos inerentes ao Brasil, com uma área de cerca de 8,5 milhões km<sup>2</sup>, mais do que o dobro da área da Europa Ocidental, ocupando mais da metade do Continente Sul-Americano, o Brasil é o quinto maior país do mundo. O sistema energético do Brasil possui uma capacidade de geração de energia elétrica total instalada de cerca de 95.228 MW, com o consumo per capita de eletricidade de 2339 kWh/hab.(TIAGO FILHO et all (2007)).

COSTA (2005), afirma que o Brasil possui uma considerável participação das energias renováveis em sua matriz energética, devido a sua situação privilegiada dentro do mercado de energias renováveis, graças a sua localização geográfica e seu potencial hídrico, possuindo uma diversidade bastante peculiar e favorável a utilização destas energias. Uma condição que não favorece muito o Brasil é o fato de que o país possui, além de uma grande extensão territorial, grandes diferenças regionais, econômicas, sociais e de padrões de desenvolvimento.

TIAGO FILHO et all (2007), mostra que a matriz energética do Brasil é uma das mais limpas, isto se comprova com uma participação de 43,8% das energias renováveis no total de energia consumida. Comparando este valor com o da média mundial de 14% é correto concluir que o país posiciona-se na vanguarda do setor energético mundial, com uma utilização sustentável dos seus recursos naturais.

Uma projeção para o mercado futuro feita pelo Ministério de Minas e Energia, em um prazo de 15 anos, mostra uma tendência da matriz energética brasileira em manter sua característica renovável, mesmo que se encontre neste período um nível crítico do potencial hidroelétrico. De acordo com os estudos realizados pelo Ministério de Minas e Energia, haverá um favorecimento da energia de biomassa e de outras fontes

de energia, aumentando a participação das mesmas na matriz energética nacional frente a da hidroeletricidade e do petróleo e de seus derivados. Considerando o tipo de geração de energia como uma importante fonte de dados para a gestão do planejamento estratégico do país, dentro de um histórico mundial da evolução das questões ambientais, o Brasil tem um fator positivo agregado a sua matriz energética.

Assim, de acordo com a tabela 4.2 verifica-se a validade destas informações com a observação de que o Brasil possui uma base de geração de energia privilegiada, composta em sua maioria por fontes renováveis. Como o país não possui uma grande dependência de energia advinda de importação, é possível a aplicação de políticas energéticas favoráveis as fontes renováveis com uma maior liberdade de atuação, já que as decisões políticas sobre o mercado de energia nacional dos países dos quais o país importa energia não irão afetar de modo tão contundente as decisões de mercado do Brasil. Anteriormente foi citado o fato de que a energia fotovoltaica possui um grande potencial de geração, principalmente em um país com a extensão territorial e o potencial de radiação solar como a do Brasil. A figura 4.4 mostra a capacidade total de geração de eletricidade, em kW, atualmente instalada no Brasil, de acordo com a fonte energética.

**Tabela 4.2- Matriz Elétrica Brasileira – Empreendimentos em Operação**

<b>Empreendimentos em Operação</b>							
<b>Fonte</b>		<b>Capacidade Instalada</b>		<b>%</b>	<b>Total</b>		<b>%</b>
		<b>N.º de Usinas</b>	<b>[kW]</b>		<b>N.º de Usinas</b>	<b>[kW]</b>	
<b>Hidráulica</b>	<b>MCH</b>	187	99.483	0,10	596	73.137.408	70,7
	<b>PCH</b>	260	1.329.900	1,33			
	<b>GCH</b>	149	71.659.749	69,30			
<b>Gás</b>	<b>Natural</b>	70	9.865.654	9,54	96	10.791.402	10,4
	<b>Processo</b>	26	925.748	0,90			
<b>Petróleo</b>	<b>Óleo Diesel</b>	491	3.434.555	3,32	509	4.598.525	4,45
	<b>Óleo Residual</b>	18	1.163.970	1,13			
<b>Biomassa</b>	<b>Bagaço de Cana</b>	219	2.240.890	2,17	259	3.250.769	3,1
	<b>Licor Negro</b>	13	782.617	0,76			

	<b>Madeira</b>	23	200.832	0,19			
	<b>Biogás</b>	2	20.030	0,02			
	<b>Casca de Arroz</b>	2	6.400	0,01			
	<b>Nuclear</b>	2	2.007.000	1,94	2	2.007.000	1,9
	<b>Carvão Mineral</b>	7	1.415.000	1,37	7	1.415.000	1,4
	<b>Eólica</b>	10	28.550	0,03	10	28.550	0,03
	<b>TOTAL</b>	1.479	95.228.654	92,10	1.479	95.228.654	92,10
<b>Importação</b>	<b>Paraguai</b>	—	5.650.000	5,46	—	8.170.000	7,90
	<b>Argentina</b>	—	2.250.000	2,18			
	<b>Venezuela</b>	—	200.000	0,19			
	<b>Uruguai</b>	—	70.000	0,07			
	<b>TOTAL C/ IMPORTAÇÃO</b>	1.479	103.398.654	100,00	1.479	103.398.654	100,00

Fonte: Banco de Informações de Geração da ANEEL – janeiro/2006, apud Tiago Filho (2007)

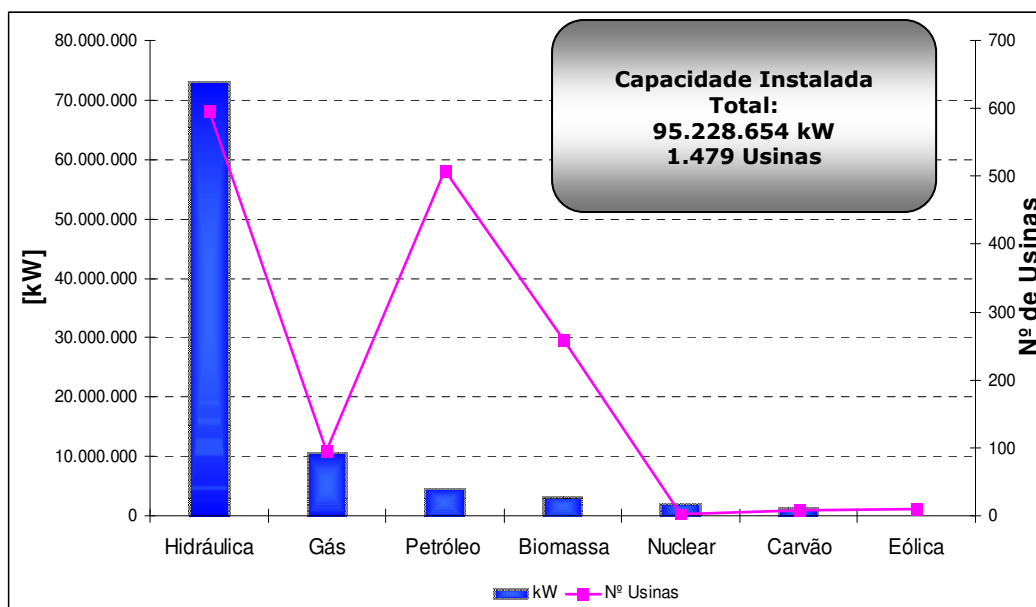


Figura 4.4 – Matriz Elétrica Brasileira – Empreendimentos em Operação

Fonte: Banco de Informações de Geração da ANEEL – Janeiro/2006, apud Tiago Filho (2007)

Confirmando a tendência em privilegiar as fontes renováveis a figura 4.5 mostra que desde a década de 1970, quando o mundo passou por uma crise energética provocada pelo petróleo, o Brasil tem alavancado o mercado de fontes renováveis de energia. Nota-se que desde a década de 1970 até o ano de 2004 o consumo final de alguns derivados de petróleo (gasolina, óleo combustível) diminuiu, apesar de um crescimento significativo no consumo de carvão mineral, óleo diesel e gás natural. No entanto houve aumento no consumo de fontes ligadas a biomassa e outras fontes de energia, além de uma queda bastante substancial no consumo de lenha e carvão vegetal. Outro item igualmente relevante é o crescimento do consumo de eletricidade, que leva a um aumento da necessidade da construção de novas unidades geradoras e também de maiores incentivos políticos e econômicos às fontes renováveis de energia.

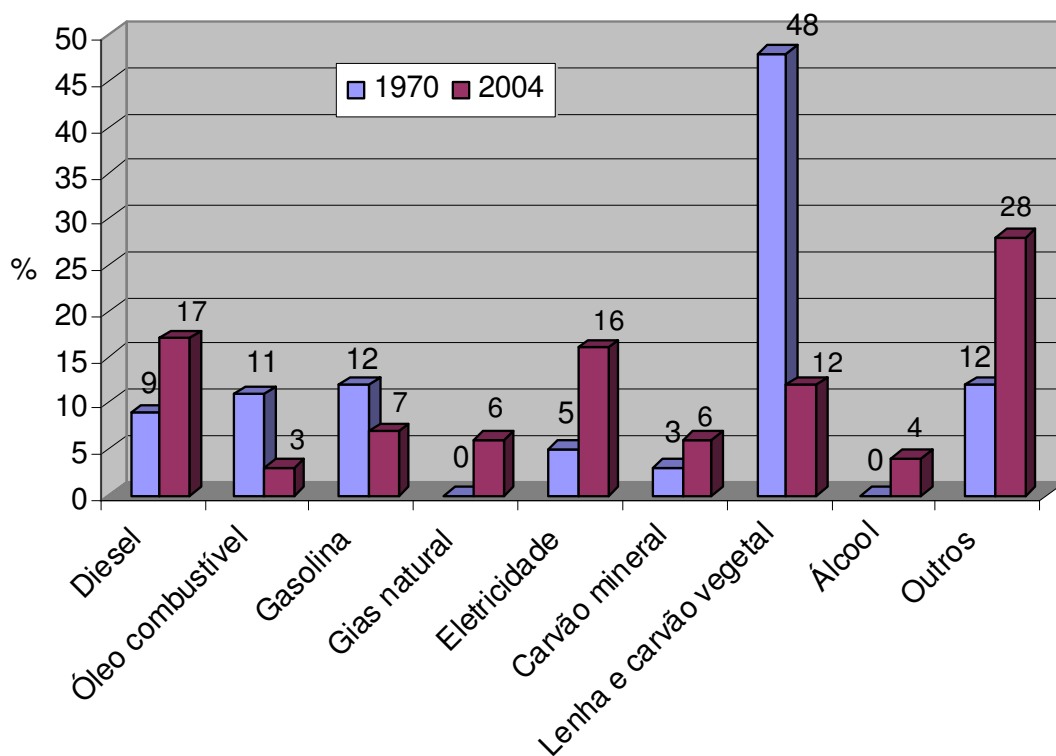


Figura 4.5 – Consumo final de energia entre 1970 e 2004

Fonte: Balanço Energético Nacional – Ministério de Minas e Energia – MME – (2005)

<http://www.mme.gov.br/>

No Brasil, o mercado para tecnologias em energias renováveis é muito recente, no entanto programas de incentivo a implantação e uso de energias renováveis tem sido implementado, mesmo que em pequena escala.

Dentre os programas voltados para a área de energia, já implementados pelo Brasil, um destaque maior deve ser dado ao Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios - PRODEEM, instituído por Decreto Presidencial de 27 de Dezembro de 1994.

O PRODEEM tinha por objetivo suprir de energia elétrica, às comunidades carentes e situadas em localidades onde o suprimento de energia elétrica convencional não pode chegar, seja por ser muito onerosa para o consumidor ou ainda por falta da rede de distribuição da concessionária. O que deve ser salientado e ficar claro é que a energia distribuída pelo PRODEEM não deveria ser gerada por fontes convencionais, dando preferência a energia fotovoltaica. De modo a ter o respaldo governamental, o PRODEEM, ficou subordinado ao MME. Já a coordenação central ficou a cargo do Departamento Nacional de Políticas Energéticas – (DNPE) e as orientações técnicas, testes laboratoriais, equipamentos, especificações técnicas repassadas por fabricantes de materiais e equipamentos, ficou a cargo do Centro de Pesquisa da Eletrobrás - CEPTEL.

De acordo com a Assessoria de Comunicação Social do MME, as ações do PRODEEM se desenvolveram entre 1994, e 2002, quando o Tribunal de Contas da União – (TCU) iniciou uma auditoria de natureza operacional no programa. Esta auditoria recomendou uma reestruturação completa e a realização de seu controle patrimonial. O MME acolheu as recomendações e determinações do TCU e um dos resultados da reestruturação foi a integração do PRODEEM ao programa Luz Para Todos.

A reestruturação do PRODEEM foi iniciada com a consulta a todos agentes envolvidos: governos estaduais, centros de pesquisa, prefeituras municipais, especialistas, ONGs e usuários. A partir desta mobilização foi criado um plano de revitalização no qual em 2004 foram realizados o levantamento, a recuperação e a regularização da situação patrimonial dos equipamentos já instalados.

O PRODEEM em suas cinco fases, de 1996 a 2002, instalou em torno de 6000 sistemas (fases de I a IV) e, à partir de 2002, mais 3000 sistemas foram instalados (fase V). Entretanto durante a auditoria realizada pelo TCU foi constatado, além do pouco envolvimento das concessionárias no processo, um baixo envolvimento das

comunidades beneficiárias e ausência de capacitação para operação, manutenção, assistência técnica e sustentabilidade dos sistemas, além da inexistência de tombamento e controle patrimonial dos ativos do PRODEEM.

### 4.3. A matriz energética da Alemanha

O abastecimento energético primário da Alemanha está demonstrado na figuras 4.6.

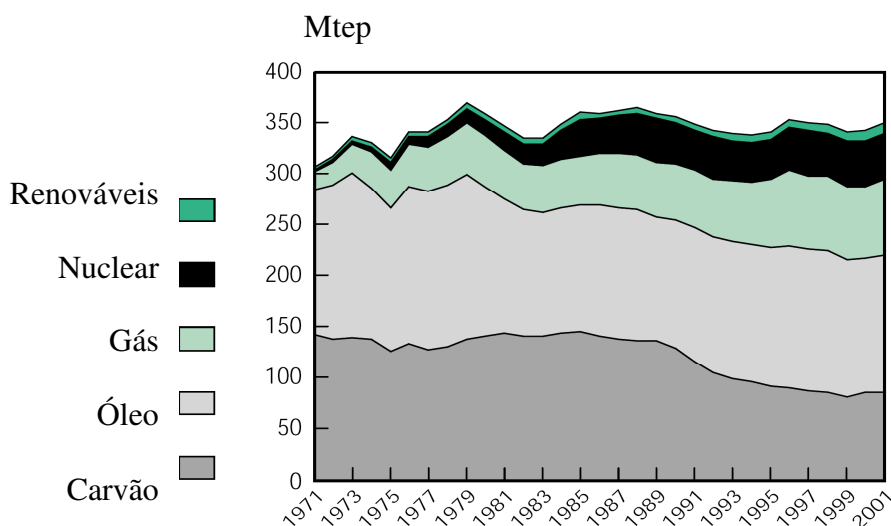


Figura 4.6 – Abastecimento energético primário total por fonte - Alemanha.

Fonte: IEA – (2004) - <http://www.iea.org>

A figura 4.6 mostra a grande dependência dos combustíveis fósseis na matriz energética da Alemanha. Desde a década de 1970 até 2001 é perceptível uma diminuição gradual, principalmente do uso do carvão e do óleo. Em contrapartida houve um pequeno aumento do uso do gás natural e um incremento maior na utilização da energia nuclear. No caso das fontes renováveis, o maior aumento ocorreu de modo mais perceptível a partir da década de 1990, com um maior aumento a partir de 2000.

A tabela 4.3 mostra a variação do suprimento total de energia primária por fonte na Alemanha entre 1970 e 2001. Nota-se que o crescimento do uso do gás e da energia nuclear possibilitou uma diminuição do uso do carvão. Neste período o crescimento das

fontes renováveis é notado, como mostra a tabela 4.4, porém não com a mesma intensidade das fontes anteriormente citadas, aquelas que tiveram um crescimento mais acentuado. Neste caso, as fontes de origem solar, eólica e de biomassa tiveram um crescimento maior, seguido pelas fontes de origem hídrica e nenhum crescimento significativo para as fontes geotérmicas.

**Tabela 4.3 – Suprimento total de energia primária por fonte - Alemanha**

Fonte (Mtep)	1970	1990	1995	2001
<b>Carvão</b>	147,8	128,5	91,6	85
<b>Óleo</b>	137,9	126,5	135,6	134,5
<b>Gás</b>	12,3	55	67,3	75,6
<b>Nuclear</b>	1,7	39,8	39,9	44,6
<b>Renováveis</b>	4	5,8	6,5	9,2

Fonte: IEA – (2004) - <http://www.iea.org>

**Tabela 4.4 - Suprimento total de energia primária por fonte renovável - Alemanha**

Fonte (Mtep)	1970	1990	1995	2001
<b>Biomassa</b>	2,5	4,3	4,4	6,3
<b>Hídrica</b>	1,5	1,5	1,9	1,8
<b>Geotérmica</b>	0	0	0	0
<b>solar e eólica</b>	0	0	0,2	1,1

Fonte: IEA – (2004) - <http://www.iea.org>

De acordo com o a IEA (2204) o abastecimento energético cresceu no período de 1990 a 2001, graças ao crescimento mais significativo do uso da biomassa e também da energia eólica. No caso da biomassa seu crescimento representou 69% do abastecimento energético renovável, seguido pela energia hidrelétrica (19%), eólica e solar (12%). Já o carvão utilizado para geração de energia elétrica responde por 52%, a energia nuclear por 29% e o gás natural por 10% da geração total de eletricidade em 2001. Devido à combinação de diferentes políticas de incentivo às energias renováveis, a Alemanha experimentou um rápido e contínuo crescimento na contribuição das energias renováveis para a produção de eletricidade. De acordo com as estatísticas alemãs, a energia renovável respondia por 7,9% da geração de eletricidade total em 2003. Há um

comprometimento do governo alemão com a União Européia em aumentar a eletricidade produzida com fontes renováveis para 12,5% até 2010 e 20% até 2020.

Com isto, dois terços da capacidade fotovoltaica total instalada na União Européia estão na Alemanha, chegando a 400 MW em 2003. A capacidade de crescimento da capacidade fotovoltaica Alemã de 1990 a 2001 atingiu a marca de 50% ao ano e a produção de eletricidade fotovoltaica cresceu cerca de 60% ao ano, chegando a uma capacidade de 195 MW em 2001. Embora a capacidade do uso da energia fotovoltaica total seja menor do que a de biomassa e eólica, seu crescimento foi significativo desde 1990. Com o programas “1000 telhados”, iniciado em 1991 que ofereceu subsídio para os custos de produção (60% nos estados federais orientais e 50% para os estados federais ocidentais), a capacidade de geração fotovoltaica na Alemanha tem crescido substancialmente nos últimos anos. Ao final do programa, em 1995, 2100 unidade geradoras com total de 5,3 MWpico, tinham sido instaladas. Outro programa, chamado de “100.000 telhados”, começou em 1999 com o objetivo de instalar 100.000 sistemas fotovoltaicos com capacidade de 3 kWpico. Com isso 55000 instalações já foram efetivadas até 2003, com uma capacidade total de 261 MW.

Com os expostos até agora, fica clara a necessidade da Alemanha em expandir o uso das energias renováveis em sua matriz energética, e com maior garantia no fornecimento de energia para o país nas próximas décadas, privilegiando o uso sustentável destas energias.

#### **4.4. A matriz energética do Japão**

De acordo com a IEA (2004), durante a década de 1990, o Japão teve seu abastecimento de energia primária total crescendo em cerca de 1,6% ao ano. Ainda assim, neste período, mesmo com uma forte demanda de energia renovável, seu crescimento foi de apenas 3,1% de demanda em 2001.

O Japão depende da importação para satisfazer as suas necessidades energéticas, 80% de sua demanda de energia é importada. Este contexto mostra a importância que este mercado tem para o país. Uma das maneiras de se diminuir esta dependência é o apoio e estímulo às energias renováveis. No entanto, barreiras geográficas tornam um pouco mais difícil a captação de energia renovável em comparação com outros países. O

Japão é um país insular, com uma topografia acidentada, o que limita, em parte a implementação mais acentuada de algumas tecnologias de geração de energia, como geotérmica e eólica, por exemplo. As regiões onde estas tecnologias podem ser aplicadas tendem a utilizar as mesmas para aplicações residenciais e agrícolas. A figura 4.7 mostra a evolução da energia primária total do Japão.

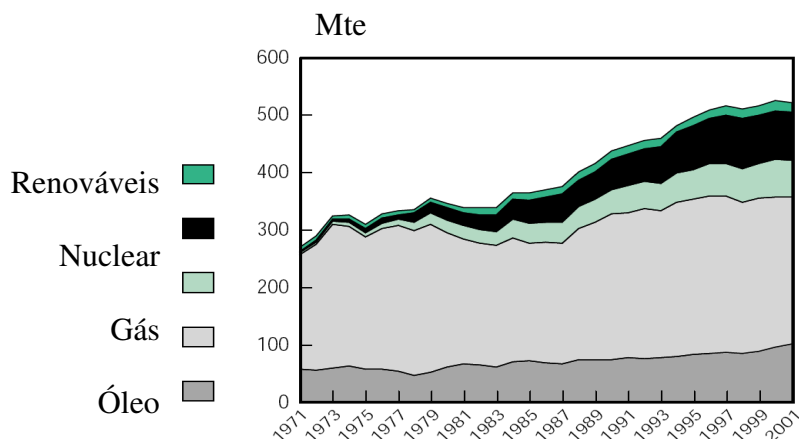


Figura 4.7– Abastecimento energético primário total por fonte no Japão.

Fonte: IEA – (2004) - <http://www.iea.org>

Observando a figura, é possível perceber que desde a década de 1970, existem esforços sendo realizados para a utilização de energias renováveis, porém o aumento de seu uso parece ser mais intenso à partir da década de 1990. A utilização do óleo e do carvão permaneceu sem grandes alterações neste período. O maior crescimento foi na utilização da energia nuclear e do gás natural. A figura 4.13 ressalta a evolução as energias renováveis no Japão do ano de 1971 até o ano de 2001.

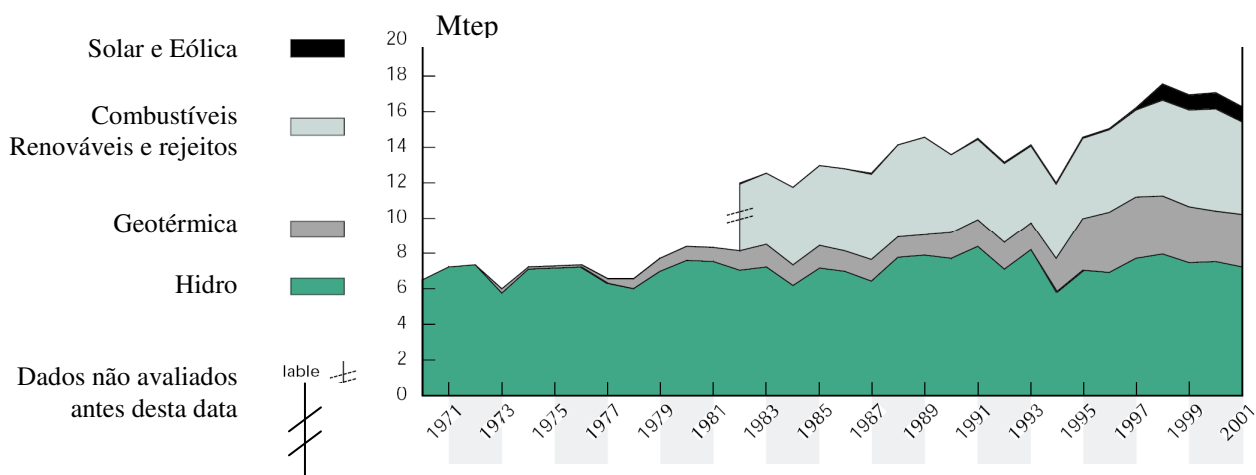


Figura 4.8 – Evolução das fontes renováveis no Japão de 1971 a 2001.

Fonte: IEA – (2004) - <http://www.iea.org>

Observando a figura 4.8, verifica-se que o desenvolvimento da energia fotovoltaica se fortaleceu a partir de 1997. Neste ano, a Lei para promoção de novas energias foi implementada para incluir a energia eólica e fotovoltaica no processo de desenvolvimento das energias renováveis no país. O mercado de fotovoltaicos cresceu rapidamente na década de 1990, indo de uma capacidade de 43 MWp em 1995 chegando à 452 MWp em 2001. Neste ano, a capacidade instalada no Japão respondeu por quase metade da capacidade fotovoltaica global. Este rápido crescimento na capacidade se deve também a indústria doméstica de fotovoltaicos do país. O Japão é o maior fabricante de células fotovoltaicas no mundo, chegando a cerca de 250 MW em sua capacidade industrial no ano de 2002. Graças ao apoio contínuo do governo em pesquisas e desenvolvimento de novas tecnologias, os preços das células vem diminuindo. A figura 4.9 mostra o crescimento da capacidade fotovoltaica de 1997 a 2001.

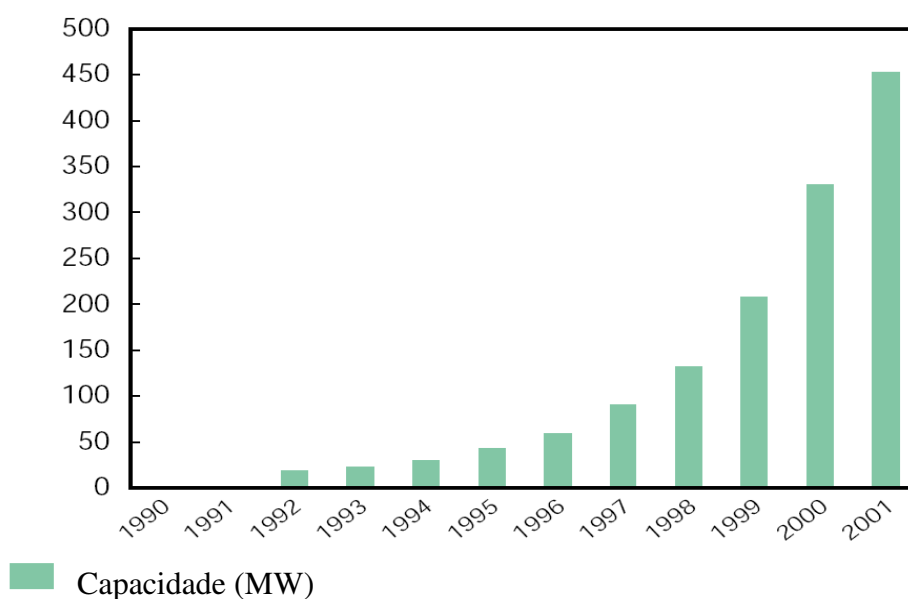


Figura 4.9 – Evolução da capacidade fotovoltaica instalada no Japão de 1990 a 2001.

Fonte: IEA – (2004) - <http://www.iea.org>

Outro fator a ser considerado é o incentivo dado às fontes renováveis de energia. No caso da energia solar fotovoltaica, durante o período de 1994 a 1996, foram oferecidos incentivos governamentais para sistemas domésticos, garantindo cerca de 50% dos custos de instalação. No ano de 2002, os sistemas PV foram incluídos na Lei de medidas especiais relativas ao uso de novas energias.

De acordo com FRAINDENRAICH *apud* TOLMASQUIM (2003), quase todos os programas de incentivo a energia solar fotovoltaica tem como base o subsídio para aquisição dos equipamentos e para a venda de energia gerada. Os valores de compra pela concessionária normalmente atingem um valor acima da tarifa praticada normalmente para a energia elétrica residencial. No caso do “Programa Telhados PV”, a instalação de 70.000 sistemas PV interligados a rede, de 3 kW a 4 kW, contavam com um subsídio inicial de 50% do custo do sistema instalado, indo para 20% em 2002. O Japão aumentou a sua produção de células e módulos em 65%, chegando a 602 MW em 2004. Com isto o Japão lidera o mercado mundial de produção de células fotovoltaicas e capacidade de geração.

#### 4.5. A matriz energética dos Estados Unidos da América

O abastecimento energético primário dos Estados Unidos da América – EUA, de acordo com a IEA,(2004), aumentou de 1557 Mtep em 1970 para 2281 Mtep em 2001, gerando um crescimento anual de 1,2%. A figura 4.15, mostra que desde a década de 1970, o país tem investido no crescimento das fontes de energia., com um aumento gradual das fontes renováveis e nuclear. Ainda assim, é grande a dependência do carvão e do óleo.

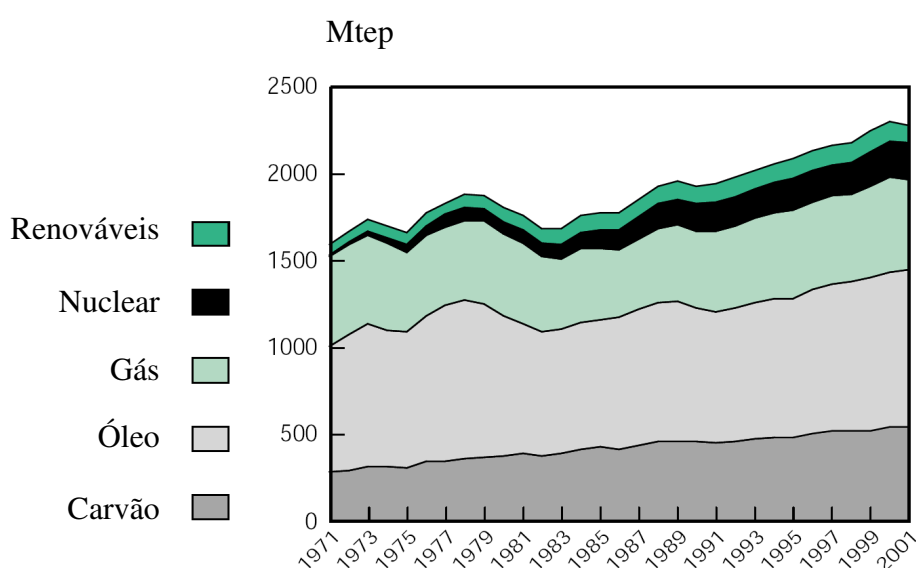


Figura 4.10 – Total do suprimento de energia primária por fonte - EUA.

Fonte: IEA – (2004) - <http://www.iea.org>

Observando-se a figuras 4.10, fica claro que a dependência de combustíveis fósseis é alto nos EUA. Neste cenário, o carvão domina a geração de eletricidade enquanto as energias renováveis são responsáveis por apenas 7% da geração de eletricidade em 2001. Outro fator importante a ser considerado é a forte dependência da importação de energia. Mais de 25% da energia utilizada nos EUA vem de importação. Mais de 60% de seu petróleo é importado. Com esta alta dependência em energias fósseis e importadas, o investimento em energias renováveis é de grande importância para o país. A tabela 4.5 mostra a capacidade geradora das fontes renováveis dos EUA de 1990 a 2002.

**Tabela 4.5– Capacidade de geração em fontes renováveis – Estados Unidos da América**

Fontes (MW)	Anos						
	1990	1995	1998	1999	2000	2001	2002
<b>Hidroelétrica</b>	73964	78563	79151	79393	79359	79484	79842
<b>Geotérmica</b>	2669	2968	2893	2846	2793	2216	2216
<b>Biomassa</b>	8796	10280	10495	10454	10024	9709	9733
<b>Solar PV</b>	339	333	335	389	386	392	392
<b>Eólica</b>	1911	1731	1720	2252	2377	3864	3982
<b>Total</b>	87679	93874	94595	95335	94939	95664	96165

Fonte: IEA – (2004) - <http://www.iea.org>

Com um crescimento anual de quase 20% de 1990 a 2001, os sistemas PV tem sido alvo de subsídios governamentais que provocaram um impacto bastante positivo na comercialização destes sistemas para consumidores individuais, alcançando uma boa capacidade de crescimento, como observado.

Nestes padrões, o segmento que mais cresce, assim como ocorre no mercado internacional, é o de sistemas conectados a telhados.

De acordo com FRAINDENRAICH *apud* TOLMASQUIM (2003), entre os incentivos oferecidos pelo governo dos EUA, destacam-se três programas:

- Califórnia PV: Este programa prevê o subsídio para a energia gerada à partir de fontes renováveis. Em 2000, foram oferecidos subsídios de US\$2,75 a US\$3,00 / W, ou seja, cerca de 50% do custo do sistema. Assim o custo da energia fotovoltaica varia de US\$0,16 a US\$0,41 /kWh contra um custo de US\$0,14/kWh para a energia da rede convencional.
- SMUD SOLAR Pioneer – Fase II (Sacramento Municipal Utility District): Este programa tem como base a instalação de 5 MW em sistemas fotovoltaicos entre 1999 e 2004, alcançando subsídios de US\$3,00 / W instalado
- LADWP PV – Pioneer (Los Angeles Department Of Water and Power): A estrutura deste programa trabalha com a inserção de subsídios de US\$5,0 / W para sistemas fotovoltaicos, com a condição de que os mesmos sejam instalados e produzidos no território de Los Angeles.

## CAPÍTULO 5 - METODOLOGIA

### 5.1 Introdução

Segundo NOGUEIRA (2001), uma vez que toda e qualquer atividade para realizar trabalho necessita de um fluxo de energia, pode-se então quantificá-la de acordo com sua demanda para realizar a atividade referida. Se o fluxo existe, então pode-se calcular o seu custo em energia necessária para esta, seja ela de um ecossistema ou de parte dele. Assim, todo fluxo de energia utilizada em um determinado processo ou sistema, deve resultar em um equilíbrio entre as energias advindas das entradas e das saídas que a compõe. O princípio de conservação da matéria também diz que da transformação da matéria, seja em que instancia for, sempre resulta do processo algum tipo de resíduo.

Considerando o processo de fabricação de um determinado produto, neste existe um fluxo de energia utilizado. Economicamente falando a etapa de um fluxo de energia utilizado na fabricação deste produto pode receber um determinado valor, uma determinada quantificação de mercado. Assim, os valores adotados para cada situação e/ou produto variam de acordo com os critérios utilizados no processo de avaliação. Em cada caso diversos tipos de ferramentas podem ser utilizadas para encontrar e validar os valores adotados.

Para se avaliar adequadamente o fluxo de energia da produção de um módulo fotovoltaico, de acordo com o objetivo a ser alcançado, é necessário levantar o gasto energético de produção do equipamento bem como as emissões durante o processo para que posteriormente se possa realizar uma análise de equilíbrio energético, acompanhada de uma análise de mitigação de CO<sub>2</sub> e do potencial de amortização do passivo ambiental gerado no processo. De posse destes dados pode-se verificar se, com a produção de energia elétrica de um módulo fotovoltaico ao longo de seus 25 anos de funcionamento, ele poderá arcar com os custos energéticos, custos de mitigação de CO<sub>2</sub> e de amortização do passivo gerado. Caso ele consiga eliminar todos estes custos, quantos anos de vida útil ainda restam para que ele forneça energia elétrica limpa e sem custo adicional para o usuário.

Entre as ferramentas que podem ser utilizadas para efetuar a contento este estudo, tem-se a Análise do Passivo Ambiental – APA e a Analise do Ciclo de Vida - ACV de

processos e/ou produtos. Estas ferramentas, que serão utilizadas neste estudo, são descritas a seguir.

## 5.2 Passivo Ambiental

MINGACHO (2003), declara que por séculos a humanidade escolheu seus sistemas energéticos em função de sua disponibilidade técnica e a viabilidade econômica, apenas nas últimas décadas foi adicionada uma nova variável nesta equação, os impactos ambientais causados por sua utilização. Com o acréscimo desta nova variável, não se pode pensar em um futuro sustentável sem que se pense antes em novas soluções e ferramentas para implementá-lo de imediato. Hoje, preocupar-se com o meio ambiente é um interesse em escala mundial. Deste modo, as atividades econômicas com seus efeitos sobre o ambiente são questões que devem e são discutidas mundialmente. Para fazer com que seja evitado, minimizado ou ainda compensado um determinado impacto ambiental negativo, as atividades econômicas que possuem um potencial poluidor são alvo de legislações específicas na área ambiental.

É preciso encontrar barreiras para impedir estas ações agressivas ao ambiente. Esta afirmação é validada pelo aumento global dos danos ambientais causados pelo desenvolvimento principalmente dos países do primeiro mundo. Este tipo de conscientização mundial acaba por forçar as indústrias a adaptarem-se a uma realidade voltada para a preservação, correndo o risco de perder sua competitividade no mercado caso não assimilem estas novas regras. Com este intuito, foram criadas ferramentas capazes de efetiva e adequadamente aplicar as devidas responsabilidades e obrigações relativas à restauração de danos ao meio ambiente a quem de direito. Nesta instância, o passivo ambiental se mostra como uma eficaz ferramenta de gestão ambiental, aplicável neste estudo. (MINGACHO, 2003).

Para BARATZ (2000), a determinação econômica do passivo ambiental é de grande valia na gestão ambiental, auxiliando na utilização mais adequada dos recursos e ações envolvidos nas diversas áreas que compõe a empresa. O passivo ambiental é a obrigação das empresas com terceiros e representa os danos causados no ambiente, representando a obrigação, a responsabilidade social da empresa frente a estes impactos ambientais.

Para NEVES (2006), o Passivo Ambiental é toda a agressão que se pratica ou praticou contra o ambiente, incluindo os valores investidos para reabilitação ambiental e/ou pagamentos de multas e indenizações. Neste contexto o passivo ambiental é também toda a obrigação contraída voluntariamente ou não e que é destinada à aplicação em ações de controle, preservação e recuperação do ambiente. Estes fatores acabam originando um custo ambiental. Estes custos podem ser classificados em:

- **Custos internos (privados):** estes custos são contabilizados ao longo de todo o processo produtivo e servem de base para a quantificação do preço de venda do produto.
- **Custos externos (sociais):** estes são gerados pelos impactos da atividade da empresa no ambiente e na sociedade. Estes impactos não geram uma responsabilidade financeira por parte da empresa. Como por exemplo, os custos com o tratamento de doenças respiratórias causadas pela poluição do ar resultantes das atividades da empresa.

Em termos contábeis, o passivo ambiental se converte em obrigações da empresa a terceiros, devendo estas ser reconhecidas como tal mesmo sem uma cobrança formal. Assim, passivo ambiental pode ser considerado como sendo o resultado de toda e qualquer degradação ambiental, causada por um processo ou produto, durante sua execução e/ou fabricação. Dentro do balanço patrimonial de uma empresa, o passivo ambiental é incluído, através de cálculos estimativos no passivo da empresa, como danos causados pelo passivo ambiental ao patrimônio da empresa, e no ativo são incluídas as aplicações de recursos que tem como objetivo a recuperação do ambiente e investimentos com tecnologias de processos de contenção ou eliminação de poluição. BARATZ (2000)

Estes passivos ambientais podem ser classificados de acordo com dois aspectos:

- **Aspectos administrativos:** neste, são adicionadas as observâncias às normas ambientais e procedimentos e estudos de caráter técnico realizados pela empresa (efetivação de estudos e relatórios de impacto ambiental das atividades da empresa, acordos comerciais como a certificação ambiental, resultados de auditorias ambientais, etc).

- **Aspectos físicos:** estes aspectos englobam as áreas de indústrias contaminadas, instalações desativadas, equipamentos obsoletos, recuperação de áreas degradadas, reposição florestal não atendida, efluentes industriais, baterias, pilhas e acumuladores, bacias de tratamento de efluentes abandonadas, móveis e utensílios obsoletos, contaminação do solo e da água, etc.

Para KRAEMER (2006), antes as organizações se preocupavam apenas com a eficiência dos sistemas produtivos. Porém hoje fica evidente que o contexto de atuação das empresas torna-se cada vez mais complexo e que o processo de tomada de decisão sofre restrições cada vez mais severas. Sendo assim, a contabilidade de uma empresa não pode desconhecer as realidades ambientais em que esta se encontra, já que é a contabilidade que expõe as medidas adotadas e os resultados alcançados pela empresa em seu processo de proteção e preservação ambiental. Portanto, as organizações deverão incorporar a variável ambiental em seus cenários decisórios, principalmente quando se tratar da compra, venda e/ou fusão entre empresas. Nestes casos durante a negociação deve ser considerado o fato de que junto com a empresa segue também as suas dívidas das mais diversas ordens inclusive seus “passivos ambientais”.

Quando se fala em passivo ambiental, é necessário detectar e identificar a degradação para que posteriormente se faça o gerenciamento desta área para diminuir os riscos à população e ao ambiente do entorno. Para facilitar o entendimento e realização desta tarefa existe a Lei 6.938/81 que define os chamados bens a proteger, é com base nestes itens que um estudo sobre o passivo ambiental pode ser iniciado.

- A saúde e o bem estar da população;
- Fauna e flora;
- A qualidade da água, ar e solos;
- Os interesses de proteção a paisagem / natureza;
- Segurança e ordem pública.

Muitas vezes é difícil a identificação do causador do dano ambiental e não se pode definir com segurança quem gerou o passivo analisado. Nestes casos os custos da degradação acabam recaindo sobre a sociedade ou em ultima instância sobre toda a humanidade. Às vezes a empresa desconhece que está gerando um passivo ambiental, ou ainda sabe, mas não tem o devido respeito ao ambiente ou não se importa com os resultados de degradação causados por suas atividades. Tais fatores acabam por fazer

com que estes passivos não sejam contabilizados pela empresa. Por isso é que a partir do momento em que possa ser medido ou previsto, o passivo ambiental deve ser reconhecido, mesmo que não ocorra uma cobrança formal ou de ordem legal do mesmo.

No caso em estudo, a Análise do Passivo Ambiental – APA, decorrente da fabricação de painéis fotovoltaicos envolve uma série de considerações que devem ser feitas para que se possa levantar adequadamente o passivo por ele gerado. A energia fotovoltaica, como qualquer fonte de energia renovável, possui seus prós e contras. Neste contexto, é válida uma análise sobre que tipo de passivo ambiental é gerado pelos painéis fotovoltaicos. Os impactos negativos causados por fontes renováveis de energia são, na maioria das vezes, de ação local e em muitos casos podem ser mitigados. Se cada fonte de energia renovável possui suas vantagens e desvantagens em suas aplicações, cabe levantar que tipo de passivo ambiental é causado pela energia solar fotovoltaica? Considerando 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 do passivo gerado pela fabricação dos módulos fotovoltaicos será limitado pelos dados na literatura sobre os processos de fabricação de três dos seus componentes estruturais:

- Fabricação das células fotovoltaicas de silício
- Fabricação do alumínio para a moldura que fornece parte da sustentabilidade mecânica ao painel.
- Fabricação do vidro plano utilizado sobre a placa de células de silício do painel.

Além da fabricação dos módulos fotovoltaicos compreendendo os três itens acima, será analisado também o passivo ambiental gerado pelas baterias de chumbo-ácido utilizadas para armazenagem de carga em sistemas fotovoltaicos autônomos. A inclusão deste item na análise é justificada graças aos riscos ambientais decorrentes da fabricação, utilização e deposição deste tipo de bateria.

### **5.3 Análise do Ciclo de Vida - ACV**

O interesse em tornar os processos produtivos mais condizentes com a necessidade de preservação ambiental sem uma diminuição dos lucros da produção, também faz surgir o interesse em se desenvolver métodos e técnicas para que se possa

compreender estes aspectos e diminuir os impactos por ele causados. Uma das técnicas em desenvolvimento e aplicada a este propósito é a Análise do Ciclo de Vida (ACV).

De acordo com a ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, (2001), a norma NBR ISO 14040 esclarece que ACV é uma técnica utilizada para avaliar aspectos ambientais e impactos potenciais ao longo da vida de um produto. Esta técnica é também conhecida por análise do “berço ao túmulo”, ou seja, desde a aquisição da matéria prima, passando pela produção, uso e disposição. Como dito acima, esta técnica possui um conjunto de normas que conduzem seus parâmetros de aplicação. As normas que oferecem os princípios, estruturas e requisitos metodológicos para a condução de estudos de ACV são as normas NBR ISO 14040, ISO 14041, ISO 14042, ISO 14043, ISO 14047, ISO 14048, ISO 14049.

De acordo com a ISO 14040 a ACV pode ajudar:

- A identificar as oportunidades de melhoria dos aspectos ambientais dos produtos em vários pontos do seu ciclo de vida;
- A tomar decisões em indústrias e em organizações governamentais em não-governamentais;
- No trabalho de divulgação da imagem da empresa (declarações ambientais, rotulagem ecológica etc.).

Considerando que todas as técnicas possuem algum tipo de limitação, o mesmo ocorre com a ACV. Entre as suas limitações podem ser citadas: de acordo com a norma ABNT ISO 14040 (2001)

- A natureza das escolhas e suposições feitas em uma ACV pode ser de cunho subjetivo, por exemplo: estabelecimento de fronteiras, fonte de dados e categorias de impacto.
- Estas suposições limitam os modelos utilizados para a análise do inventário do estudo ou a avaliação dos impactos e com isto estes podem não estar disponíveis para todos os impactos e aplicações;
- Nos estudos de ACV, as condições locais podem não ser adequadamente representadas em condições regionais e/ou globais.

- O acesso, a qualidade e a disponibilidade dos dados podem afetar a exatidão dos resultados de um estudo de ACV;
- A falta de dimensões espaciais e temporais dos dados do inventário usados para avaliar o impacto introduz incerteza nos resultados dos impactos. Esta incerteza varia de acordo com as características espaciais e temporais de cada categoria de impacto.

O usual é que se utilizem os resultados de um estudo de ACV como parte de um processo decisório, ou ainda, usar a ACV para compreender as soluções de compromisso amplas e gerais. Deste modo, a ACV se torna uma ferramenta indispensável para o melhor acompanhamento dos ciclos de produção e para identificação de alternativas de interação entre os processos. Esta avaliação inclui todo o circuito de produção de um produto e/ou serviço, ou seja, extração e processamento das matérias primas, fabricação, transporte, distribuição e uso, reemprego, manutenção, reciclagem, reutilização e disposição final.

Para se iniciar uma ACV é preciso primeiro construir um fluxograma do processo, onde se especifica todos os fluxos de material e energia que entram e saem do sistema. A figura 5.1, mostra os principais estágios do ciclo de vida de um produto.

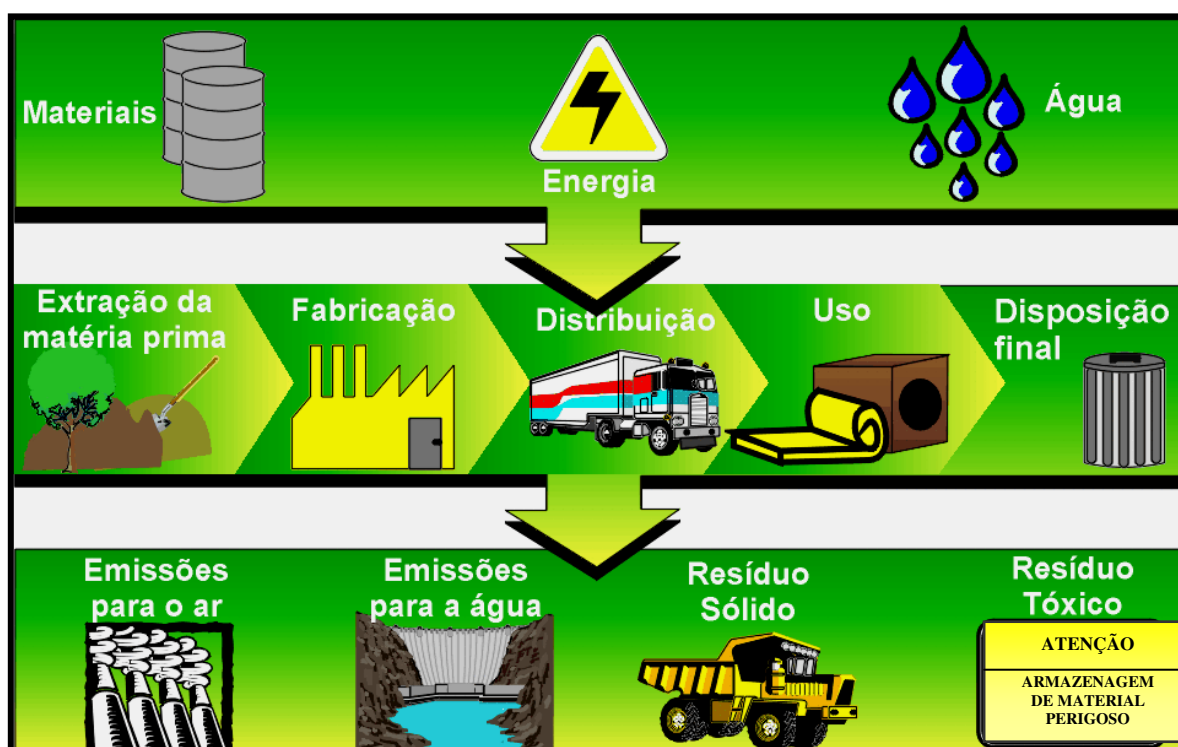


Figura 5.1 - Principais estágios do ciclo de vida de um produto

Fonte: Ometto (2005)

No caso da ACV, um tipo de análise bastante complexa, foi criada uma estrutura formal de trabalho que consta de: de acordo com a norma ABNT ISO 14040 (2001).

1. Definição dos objetivos
2. Limites de estudo
3. Escolha da unidade funcional
4. Realização do inventário de entradas e saídas de energia e materiais relevantes para o caso em estudo
5. Avaliação dos impactos ambientais associados às entradas e saídas de energia e materiais ou avaliação comparativa de produtos e processos.

Considerando as normas da ABNT específicas para a análise de ciclo de vida, mais especificamente a ISO 14040, ISO 14041, ISO 14042, pode-se analisar e estabelecer parâmetros bem definidos para a aplicação destas normas a painéis fotovoltaicos.

O objetivo de estudo da ACV deve declarar sem equívoco algum a sua aplicação pretendida e as razões para conduzir o estudo além de definir quem é o público alvo que receberá as informações obtidas com o estudo.

Neste caso, o que se deseja saber é a capacidade do painel fotovoltaico em amortizar o seu gasto energético de produção e emissões de CO<sub>2</sub> e também o passivo ambiental gerado no processo. O público alvo não é apenas a população que utiliza ou pretende utilizar os painéis fotovoltaicos, mas também os fabricantes de painéis. Assim os mesmos podem ter a certeza de que tipo de material estão adquirindo e façam melhorias em seu processo de fabricação (desde seu início, com a extração do silício e de outros materiais utilizados em sua confecção, até o processo de deposição dos materiais do painel, após o término de sua vida útil).

Com relação ao escopo do estudo, devem ser considerados e claramente descritos os seguintes itens:

1. Funções do sistema de produto;
2. Unidades funcionais (medida do desempenho das saídas funcionais – relacionadas com sua função);
3. O sistema de produtos a ser estudado;

4. Fronteiras do sistema de produto;
5. Procedimentos de alocação;
6. Tipos de impacto e metodologia de avaliação e interpretação subsequente a ser utilizada;
7. Requisitos dos dados (características dos dados necessários ao estudo – período de tempo, tecnologias cobertas, fontes, precisão);
8. Suposições;
9. Limitações e requisitos da qualidade dos dados iniciais;
10. Tipo de análise crítica, se aplicável;
11. Tipo e formato do relatório requerido para o estudo.

Alguns dos fatores com o qual se deve ter um cuidado especial são a função e a unidade funcional, além da correta definição das fronteiras do sistema. Uma unidade funcional é a medida do desempenho das saídas funcionais do sistema, ou seja, as saídas do sistema de produtos relacionadas com a sua função (ex. a saída funcional de um sistema de embalagens poderá ser a quantidade de material embalado). A unidade funcional fornece uma referência para com a qual as entradas e saídas são relacionadas. No caso da análise de passivo ambiental, os resultados pertinentes da ACV terão como referência o potencial de aquecimento global (PA) medido em relação a 1 kg CO<sub>2</sub> equivalente.

O escopo de um estudo de ACV deve especificar claramente as funções do sistema em estudo. Uma atenção especial deve ser dada às fronteiras do sistema. As fronteiras determinam quais as unidades do processo devem ser incluídas na ACV. Convém que o sistema seja modelado de forma que as entradas e saídas nas suas fronteiras sejam fluxos elementares, ou seja, matéria ou energia que entra no sistema em estudo, que foi retirada do ambiente sem a transformação humana prévia, ou ainda, que é descartado no meio ambiente sem transformação humana subsequente.

No estudo a ser realizado, 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). Além da fabricação e deposição das baterias de chumbo-ácido.

Os critérios utilizados no estabelecimento das fronteiras devem ser identificados e justificados no escopo do estudo.

A análise do inventário envolve a coleta de dados e os procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas pertinentes de um sistema de produto. Estas entradas podem incluir o uso de recursos e a liberação no ar, na água e no solo associados ao sistema. O processo de análise do inventário é interativo, por isso conforme os dados são coletados, podem ser identificados novos requisitos, ou ainda, limitações para os dados, o que pode requerer mudanças no processo de coleta de dados, mantendo, contudo os objetivos a serem alcançados. Caso se faça necessário pode-se nesta fase identificar questões que nos levem a uma revisão do objetivo e/ou do escopo do estudo. Esta fase do estudo deve contemplar os seguintes itens:

- **Coleta de dados:** Procedimentos de cálculo para quantificar as entradas e saídas. Este processo é interativo, podendo ser encontrados novos limites ou requisitos para os dados que necessitem de mudança no processo de coleta e cálculo. O cálculo do fluxo de energia deve considerar os diferentes combustíveis e fontes de eletricidade usada e a eficiência de conversão e distribuição do fluxo, assim como as entradas e saídas associadas com a geração e uso daquele fluxo de energia. Os procedimentos de alocação são necessários quando se lida com sistemas que envolvam produtos múltiplos (ex. refino de petróleo).
- **Avaliação dos impactos:** A avaliação dos impactos do ciclo de vida é dirigida aos impactos ambientais potenciais, que sejam significativos. Para isto usa-se os resultados da análise do inventário do ciclo de vida. A escolha dos impactos analisados e as metodologias usadas dependem do objetivo e do escopo do estudo. A fase de avaliação de impactos pode incluir, entre outros elementos, os seguintes tópicos:
  - Correlação de dados de inventário por categorias de impacto (classificação);
  - Modelagem dos dados de inventário dentro das categorias de impacto;

- Possível agregação de resultados em casos muito específicos e somente quando significativos (ponderação).
- **Interpretação do ciclo de vida:** Nesta fase da ACV são combinadas as constatações da análise do inventário e da avaliação de impacto. Esta combinação é feita de forma consistente, com o objetivo e o escopo definidos, para com isto alcançar as conclusões e recomendações.

As constatações desta interpretação podem tomar forma de conclusões e recomendações para uma tomada de decisão de forma consistente e de acordo com o que foi estabelecido durante as fases de objetivo e escopo do estudo.

Após esta fase é elaborado um relatório, destinado ao público alvo, de forma fiel, completa e exata. Neste relatório constam os resultados, dados, métodos, suposições e limitações transparentes apresentados com detalhes suficientes para permitir que o avaliador do relatório compreenda as complexidades e o teor pertinentes ao estudo da ACV.

Para o caso da ACV para fontes geradoras de energia elétrica sugere-se as seguintes etapas:

1. **Inventário de impactos ambientais:** Nesta fase é realizado o levantamento exaustivo de todas as entradas (matérias primas e recursos energéticos primários) e saídas (emissões residuais no ar, água e solo), produto final.
2. **Classificação dos impactos:** Aqui são levantadas quais são as substâncias contaminantes que contribuem em cada categoria de impacto considerada. Para a categoria de impacto aquecimento global. Existem vários gases que contribuem de forma diferente e em diferentes quantidades para o aquecimento global. Algumas substâncias contribuem em mais de uma categoria de impacto.
3. **Caracterização dos impactos:** Nesta fase as substâncias emitidas em cada impacto são traduzidas para uma unidade de referência equivalente em suas categoria de impacto. Assim é possível a contribuição de cada uma delas para o impacto analisado. Por exemplo, o dióxido de carbono e o aquecimento global. O CO<sub>2</sub>, por ser a substância mais representativa dentro desta categoria de impacto é

a unidade de referência, ou seja, as demais quantidades de substância e contaminantes que contribuem para o aquecimento global irão se traduzir em unidades de CO<sub>2</sub>. Como exemplo, a contribuição de 1 kg de CFC-113 no efeito estufa equivale a contribuição de 4500 kg de CO<sub>2</sub>.

4. **Normalização dos impactos:** Com esta etapa podemos comparar entre si, diferentes impactos. Isto é possível aplicando-se um fator de normalização nas quantidades resultantes de cada categoria de impacto, expressadas em suas respectivas unidades de referência. O fator de normalização é calculado à partir do volume pré-existente no meio ambiente de cada um dos compostos contaminantes de referência, retirando-se a quantidade do processo avaliado. O fator de normalização para cada tipo de impacto é o inverso do nível pré-existente em substância equivalente por habitante. Como exemplo tem-se, para categoria aquecimento global, 13000 kg de CO<sub>2</sub> por habitante, presente na atmosfera, logo seu fator de normalização será 1/13000, que é igual a 0,000076 kg.

No caso específico deste estudo, será exposto um resultado simplificado da ACV de um painel fotovoltaico. 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. Os resultados desta ACV simplificada serão exibidos no capítulo 6.

## 5.4 Análise Energética

Para ALSEMA & NIEUWLAAR (2000), toda nova tecnologia para geração de energia para ser chamada de “renovável” ou “sustentável” deve estar sujeita a uma análise de seu equilíbrio de energia, para verificar sua viabilidade dentro deste contexto. Isto é muito importante por que uma análise energética não é realizada apenas baseada em dados atuais dos sistemas de geração, mas também considerando as melhorias esperadas na produção e tecnologias utilizadas no sistema. Isto ocorre principalmente porque o consumo de energia geralmente tem significativas implicações ambientais.

Deste modo este tipo de análise pode se mostrar muito útil para o desenvolvimento de um ciclo de vida mais produtivo e ambientalmente correto.

A energia fotovoltaica é considerada, segundo ALSEMA & NIEUWLAAR (2000), como uma das mais promissoras fontes de energia renovável. Seu alcance em escala global e características de geração de energia tornam os sistemas fotovoltaicos como uma fonte capaz de contribuir de modo significativo para o abastecimento energético sustentável e para a mitigação de emissões dos gases de efeito estufa (GEE), principalmente considerando que em uma hora a Terra recebe do Sol energia suficiente para suprir, por um ano, suas necessidades energéticas.

A eletricidade produzida pelo painel fotovoltaico não emite nenhum tipo de poluição ou 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”, 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.

No reembolso energético, o equilíbrio do sistema fotovoltaico é avaliado para se verificar, não só o tempo gasto para se amortizar a energia gasta para a produção do módulo fotovoltaico, mas também para analisar as emissões de CO<sub>2</sub> durante o ciclo de vida dos painéis. 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.

No caso deste estudo, esta análise energética servirá para comparar o processo de produção de painéis fotovoltaicos entre 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 CO<sub>2</sub> e sua capacidade em amortizar o passivo ambiental gerado por sua produção em seu ciclo de vida.

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

$$EPBT = ER = \frac{E_{utilizada}}{E_{economizada}} \quad (5.1)$$

Onde:

- **ER** → Energia reembolsada (anos).
- **EPBT** → Energy Payback Time ou tempo de reembolso de energia (anos).
- **Eutilizada** → Contribuição de energia durante o ciclo de vida do módulo, incluindo o uso de energia para fabricar, instalar, utilização de energia durante operação e deposição ao final da vida útil do equipamento.
- **Eeconomizada** → É a economia de energia devido à energia elétrica produzida pelo painel durante seu funcionamento ao longo de um ano.

Os valores adotados para a energia utilizada e economizadas serão exibidos no capítulo 7, bem como os cálculos utilizados para gerar estes valores.

A utilização da ER (ou EPBT) para análise energética tem se mostrado como uma ferramenta interessante para estudos graças a sua proximidade com os cálculos de reembolso econômico, com a desvantagem de não poder ser utilizado para cálculos de retorno durante o restante da vida econômica dos painéis.

## 5.5 Análise Ambiental

Como é necessário um determinado gasto energético para produção de um módulo fotovoltaico é preciso verificar se esta energia pode ser recuperada, amortizada através da produção de energia elétrica gerada pelo painel ao longo de sua vida útil. Deve

ser considerado também que existe 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.

De acordo com o que foi exposto nos capítulos anteriores, a competitividade e as barreiras de mercado acabam por adicionar estes custos ambientais no processo de produção. Este novo elemento pode inclusive se tornar um diferencial, já que a estrutura de mercado esta cada vez mais rigorosa com relação às normas e legislações ligadas, direta ou indiretamente, ao comportamento ambiental das empresas.

No caso dos painéis fotovoltaicos, existe a possibilidade de se realizar uma análise das emissões de CO<sub>2</sub> durante o ciclo de vida do módulo fotovoltaico. Para isto seria necessário um exame mais profundo das fontes de CO<sub>2</sub> que atuam no local de produção do módulo e também durante o seu ciclo de vida (produção, transporte, instalação e operação). Na maioria dos casos, o uso de energias renováveis, como é o caso da energia fotovoltaica, pode reduzir as emissões de gás carbônico de um país de modo considerável.

Um fato a ser considerado é o de que para calcular os efeitos de mitigação de CO<sub>2</sub>, se os limites utilizados pelo ciclo de vida do sistema alcançar apenas um nível nacional, os resultados podem se mostrar úteis dentro do processo nacional de mitigação de CO<sub>2</sub>, 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 CO<sub>2</sub>. 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. Com a utilização de mais de um tipo de planta de geração de energia, diferenças significativas ocorrem no processo de emissão de CO<sub>2</sub>. Transpondo estas diferenças para as matrizes energéticas dos países produtores de painéis fotovoltaicos, de acordo com a composição

da matriz energética de cada país, tem-se um maior ou menor potencial de mitigação de CO<sub>2</sub> pelos sistemas fotovoltaicos fabricados.

Dessa forma, neste trabalho a análise ambiental será realizada fazendo-se comparações sobre os potenciais de mitigação de CO<sub>2</sub> dos PV se fabricados em um dos seguintes países: Alemanha, Japão, EUA, Brasil Sistema Isolado - Brasil<sub>SISO</sub> e Brasil Sistema Interligado – Brasil<sub>SINT</sub>, e posto para operar no próprio país fabricante ou em um outro país, deste mesmo grupo já citado.

Além disto, a análise ambiental da produção de módulos fotovoltaicos conta com o uso de diversas ferramentas de análise ambiental, ou ainda, ferramentas de Estudos de Impacto Ambiental (EIA) para a verificação da possibilidade de amortização do passivo ambiental gerado por estes painéis.

Para BARBOSA (2004), em se tratando de avaliação ambiental, diversas metodologias foram desenvolvidas para facilitar este tipo de análise. Entre as diferentes aplicações metodológicas desenvolvidas para a avaliação de impactos ambientais encontram-se, entre outras:

- Metodologias espontâneas;
- Listagens;
- Matrizes de interações ou de correlação;
- Redes de interações;
- Metodologias quantitativas;
- Modelos de simulação;
- Mapas de superposição,
- Projeção de cenários.

De acordo com a Constituição Federal (1988), a Avaliação de Impactos Ambientais - AIA é uma ferramenta amparada por mecanismos de ordem legal em suas diversas instâncias. Sendo assim, baseado no Decreto 88.351/83 e no Artigo 8º da Lei 6.938/81, o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), expediu no dia 23 de janeiro de 1986 a resolução nº 001. Esta resolução define o impacto ambiental como

sendo “qualquer alteração das propriedades físicas, químicas ou biológicas do meio ambiente, causada por qualquer forma de matéria ou energia resultante das atividades humanas que, direta ou indiretamente afetem a saúde, a segurança e o bem-estar da população, as atividades sociais e econômicas, a biota, as condições estéticas e sanitárias do meio ambiente, e a qualidade dos recursos ambientais” (BARBOSA, 2004).

De acordo com MOREIRA apud BARBOSA (2004), os métodos de avaliação de impactos ambientais podem ser chamados de “*mecanismos estruturados para coletar, analisar, comparar e organizar informações e dados sobre os impactos ambientais de uma proposta (...)*”.

Dentre os métodos de análise de impactos ambientais citados será adotado o método das matrizes de correlação ou matrizes de interação por ser este um tipo de matriz utilizada para avaliar os impactos associados à implantação de quase todos os tipos de projeto. Estas matrizes foram inicialmente usadas em uma tentativa de eliminar as deficiências encontradas com a utilização do método de listagens. (BASTOS & ALMEIDA apud BARBOSA (2004)).

## **5.6 – Matrizes de Correlação**

Segundo BARBOSA (2004), as matrizes de correlação são listagens de controle bidimensionais que possuem linhas alocadas para os fatores ambientais, deixando nas colunas as ações características do projeto analisado, com isto, à interseção entre uma linha e uma coluna representa a relação causa/efeito gerada pelo impacto analisado.

O princípio básico desta matriz consiste em verificar as interações existentes entre as ações e os fatores, e estabelecer uma escala de 1 a 10 para a importância e magnitude de cada impacto analisado, além de assinalar se o mesmo é um impacto positivo ou negativo. Os impactos apresentam dois atributos: a magnitude e a importância. A magnitude é a grandeza definida em uma escala espacial e temporal de um impacto. Já a importância se fixa na intensidade do efeito relacionado com um determinado fator ambiental, com outros impactos ou ainda com determinadas características (direto/indireto, local/regional, temporário/permanente, reversível/irreversível etc).

Este tipo de matriz permite uma rápida identificação dos problemas ambientais envolvidos e por suas características se mostra com uma abrangência adequada às necessidades deste estudo, pois envolve aspectos físicos, biológicos e socioeconômicos do projeto analisado,(BARBOSA, 2004). Os impactos recebem atribuições tanto nominais quanto ordinais para sua qualificação.

Os atributos de impactos, segundo BARBOSA, (2004) possibilitam, uma melhora na análise qualitativa dos processos analisados, como mostrado a seguir:

- 1 **Tipo de ação:** Primária (definidas como uma simples reação de causa e efeito), secundária (reação secundária em relação à ação, quando faz parte de uma cadeia de reações), enésima (como uma reação enésima com relação à ação);
- 2 **Ignição:** Imediata (quando o efeito surge simultaneamente com a ocorrência da ação) e médio prazo e longo prazo (quando o efeito surge com alguma defasagem de tempo em relação à ação);
- 3 **Sinergia e criticidade:** De acordo com o nível de interatividade entre os fatores, de maneira a aumentar o poder de modificação do impacto podem ser chamadas de alta, média ou baixa;
- 4 **Extensão:** maior ou menor do que uma área pré-definida para a atuação do estudo. Definidas respectivamente quando o impacto sobre o subsistema abranger uma área maior, igual ou menor do que a área pré-definida.
- 5 **Periodicidade:** Permanente quando os efeitos não cessam sua manifestação enquanto durar a ação, variável quando não se conhece de modo preciso o tempo de duração de um determinado efeito, temporária quando o efeito tem uma duração limitada;
- 6 **Intensidade:** de acordo com a quantificação da ação impactante pode ser denominada de alta, média ou baixa.

Atualmente são utilizadas matrizes baseadas na Matriz de Leopold e que correspondem, na verdade, a uma listagem bidimensional capaz de identificar os impactos, porém acrescidos de uma atribuição de valores firmados em magnitudes e

importâncias diferenciadas para cada tipo de impacto analisado. Assim podem ser contemplados durante a análise tanto os impactos negativos quanto os positivos de cada meio analisado. Neste caso, no eixo vertical são alocados os impactos positivos ou negativos do meio analisado (físico, biótico, antrópico). Estes são alocados de acordo com a fase do projeto a que pertencem, sejam elas de atuação direta e/ou indireta. Os valores atribuídos a cada item podem variar de acordo com a sua atuação no meio e/ou fase analisada. Assim, cada impacto alocado para um determinado meio onde atua, possui subsistemas distintos distribuídos no eixo vertical, sobre o qual a análise do impacto é realizada nominal e ordinalmente, contemplando cada um dos atributos que lhe foram destinados.

Como o que se pretende é realizar um levantamento simples dos impactos ambientais causados pela produção do módulo fotovoltaico, será utilizada a matriz de interações, pois, de acordo com TOMMASI apud BARBOSA (2004), é um dos métodos mais utilizados em análise de impactos ambientais. Além de facilitar a análise de um número elevado de informações este método permite que se faça uma quantificação dos impactos analisados. No caso do estudo a ser efetuado, será elaborada uma matriz específica, baseada na matriz proposta em BARBOSA (2004). A matriz a ser elaborada irá quantificar os impactos ambientais identificados nas fases de extração de matéria prima, produção de material (alumínio, vidro, célula de silício e bateria), produção do módulo fotovoltaico e deposição da bateria de chumbo-ácido utilizada no sistema fotovoltaico. Após este levantamento será possível fazer uma previsão da quantidade de unidades de impactos associados produção deste módulo fotovoltaico, porém aplicados em 4 diferentes cenários de produção. Em cada um deles a análise dos impactos será considerada de acordo com o tipo de matriz energética utilizada em cada cenário para fornecer a energia elétrica necessária para a produção do módulo.

Como o objetivo desse trabalho é fazer um estudo comparativo dos passivos ambientais resultantes da fabricação do PV, feitos em diferentes cenários energéticos, não serão contemplados neste estudo os impactos positivos, como normalmente ocorre nos estudos feitos através da matriz de Leopold. Se os impactos positivos fossem considerados, ao se realizar a somatória final da matriz os mesmos iriam resultar em valores não condizentes com a realidade da análise efetuada.

Para que todos os cálculos e tabelas possam ser elaborados, serão utilizadas, ao longo dos estudos, planilhas eletrônicas para elaboração dos cálculos e gráficos.

# CAPÍTULO 6 - ESTUDO DE CASO: PAINEL FOTOVOLTAICO PADRÃO

## 6.1 - Princípio de funcionamento

De toda a radiação solar que chega às camadas superiores da atmosfera terrestre, apenas uma parte alcança a superfície terrestre, isto ocorre devido à reflexão e absorção dos raios solares pela atmosfera. A parte que alcança o solo é constituída por um componente direta e por uma componente difusa. A figura 6.1 ilustra este processo.

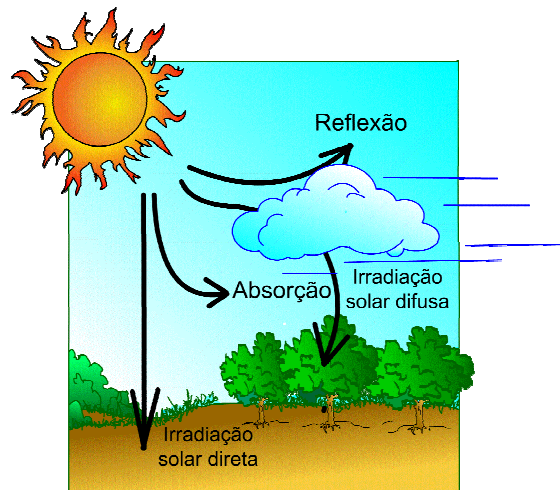


Figura 6.1 - Componente da radiação solar ao nível do solo

As modificações que ocorrem com a luz dependem da espessura da camada atmosférica, da distância Terra-Sol e das condições atmosféricas e meteorológicas. Devido a variáveis como alternância entre dia e noite, estações do ano e períodos chuvosos e de passagem de nuvens, o recurso energético solar apresenta grande variabilidade. Isto ocasiona a necessidade da seleção de um sistema adequado de armazenagem da energia convertida pelo sistema fotovoltaico.

A energia solar fotovoltaica é o nome dado à energia obtida com a conversão direta da luz solar em eletricidade. A esta conversão damos o nome de efeito fotovoltaico. Este efeito foi relatado pela primeira vez no ano de 1839 por Edmond Becquerel. Este fenômeno se refere

ao surgimento de uma diferença de potencial, ocasionada pela absorção da luz, nos extremos da estrutura de um material semiconductor. (ROSA, 2007).

Esta conversão é realizada por uma célula fotovoltaica, este é o nome dado a unidade fundamental deste sistema de conversão de energia. Estas células são formadas por pastilhas confeccionadas em material semiconductor, entre os mais utilizados temos o silício. Os átomos do silício caracterizam-se por possuírem quatro elétrons que se ligam aos elétrons vizinhos, formando assim uma rede cristalina. Esta estrutura cristalina molecular é formada por uma repetição angular em três dimensões da sua unidade fundamental, ou seja, seu átomo, apresentando assim a forma de um tetraedro com um átomo localizado em cada vértice deste tetraedro, conforme mostrado na figura 6.2 . (ROSA, 2007).

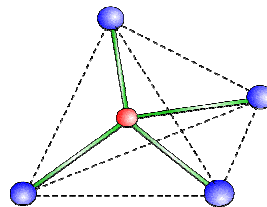


Figura 6.2 – estrutura do cristal de silício.

Ao se adicionar a este componente um elemento como o fósforo, que possui cinco elétrons de ligação, haverá um elétron em excesso na estrutura e que não poderá ser emparelhado, que ficará "sobrando" nesta rede cristalina. Como este elétron está fracamente ligado a seu átomo de origem, com pouca energia térmica, este elétron se torna livre, e migra para a banda de condução. Neste caso, o fósforo é chamado de material dopante doador de elétrons ou dopante tipo N. (ROSA, 2007).

Se durante o processo de construção da célula de silício, for adicionado outro elemento químico como, por exemplo, o boro, que possui três elétrons de ligação, ou seja, um elétron de enlace a menos que o silício, e não cinco elétrons como o fósforo, haverá a falta de um elétron para satisfazer as ligações com os átomos de silício da rede cristalina. Esta ausência de elétron recebe o nome de lacuna. Como o elétron está com pouca energia térmica, ocorre que um elétron da outra camada (tipo N) pode agora passar para esta banda e ocupar uma lacuna. Neste caso o boro recebe o nome de dopante tipo P.

Cada célula solar fotovoltaica é composta de uma camada fina de material tipo N e outra, com maior espessura, de material tipo P.

Quando separadas, as camadas são eletricamente neutras, porém ao formar o conjunto (união P-N), acaba por gerar um campo elétrico porque os elétrons do silício tipo N preenchem as lacunas do silício tipo P

Como a luz solar é constituída de diversos tipos de partículas elementares denominadas fótons. Quando os fótons atingem as pastilhas de silício que compões o painel fotovoltaico, os elétrons livres que formam este material ficam sensibilizados pela energia. Ao receberem a energia solar, através dos fótons, dependendo do fluxo de radiação solar, os elétrons aceleram seu movimento e se separam da camada onde se encontram (N) e são coletados pela outra camada (P). Assim uma camada ficará com excesso de carga positiva e a outra com excesso de carga negativa. Logo, se as duas superfícies forem adequadamente conectadas, eles seguirão um fluxo, um caminho através do material condutor, com isto surgirá o que chamamos de corrente elétrica.

O que ocorre nesta junção é que elétrons livres do lado N passam ao lado P onde encontram as lacunas que os capturam; isto faz com que haja um acúmulo de elétrons no lado P, tornando-o negativamente carregado e uma redução de elétrons do lado N, que o torna eletricamente positivo. Estas cargas, aprisionadas, dão origem a um campo elétrico permanente que dificulta a passagem de mais elétrons do lado N para o lado P; este processo alcança um equilíbrio quando o campo elétrico forma uma barreira capaz de barrar os elétrons livres remanescentes no lado N.

Se uma junção PN for exposta a fótons com energia maior que a barreira elétrica formada, ocorrerá a geração do par elétron-lacuna; se isto acontecer na região onde o campo elétrico é diferente de zero, as cargas serão aceleradas, criando assim, uma corrente através da junção; este deslocamento de cargas dá origem a uma diferença de potencial (ddp) que é chamado de Efeito Fotovoltaico. Esta é a base do funcionamento das células fotovoltaicas. O que deve ser salientado é que durante todo o processo não há armazenagem de energia elétrica, ele só gera energia enquanto recebe a incidência de energia luminosa.

Como outros elementos químicos podem ser utilizados neste processo, além do fósforo e do boro e da utilização de silício, pode-se formar mais de um tipo de célula fotovoltaica. Os tipos existentes são classificados de acordo com o seu método de fabricação, são eles: (ROSA, 2007).

- **Silício mono cristalino:** Este tipo de célula é obtido a partir de barras cilíndricas de silício mono cristalino produzidas em fornos especiais. As células são obtidas por corte das barras em forma de pastilhas quadradas finas da

ordem de 0,4 mm a 0,5 mm de espessura. A eficiência, na conversão de luz solar em eletricidade, deste tipo de célula é superior a 12%.

- **Silício policristalino:** Estas células são produzidas a partir de blocos de silício obtidos por um processo onde quantidades de silício puro são colocadas em moldes especiais e moldados por um processo de fusão. Uma vez nos moldes, o silício arrefece lentamente e solidifica-se. Neste processo, os átomos não se organizam num único cristal. Eles formam uma estrutura policristalina com superfícies de separação entre os cristais. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade é um pouco menor do que nas de silício mono cristalino.
- **Silício amorfo:** Estas células são obtidas por meio da deposição de camadas muito finas de silício sobre superfícies de vidro ou metal. Sua eficiência na conversão de luz solar em eletricidade varia entre 5% e 7%.

O rendimento elétrico atribuído a cada tipo de célula fotovoltaica é mostrado na tabela 6.1 abaixo.

**Tabela 6.1 - Rendimento elétrico de células fotovoltaicas**

<b>Tipo de célula fotovoltaica</b>	<b>Rendimento típico</b>	<b>Rendimento máximo registrado em aplicações</b>	<b>Rendimento máximo registrado em laboratório</b>
<b>Mono-cristalina</b>	12-15%	22,7%	24,0%
<b>Poli - cristalina</b>	11-14%	15,3%	18,6%
<b>Silício amorfo</b>	6-7%	10,2%	12,7%

Fonte: www.bp.com

## 6.2 Composição do módulo fotovoltaico

Um módulo fotovoltaico é composto por células individuais conectadas em série. A tensão nominal do módulo será igual ao produto do número de células que o compõem pela tensão de cada célula que é de aproximadamente 0,5 volts. Normalmente os módulos fotovoltaicos são formados por 30, 32, 33 e 36 células em série, dependendo do tipo de aplicação exigida pelo módulo.

Para que o módulo tenha a rigidez, isolamento elétrico e resista a fatores climáticos, as células fotovoltaicas são encapsuladas em um material plástico de tilvinilacelato e um vidro colocado na face do módulo voltada para o Sol. Uma moldura em alumínio é acrescentada para aumentar a rigidez do conjunto. Também é acrescentada uma caixa com as conexões para os terminais positivo e negativo. Nos conectores da caixa conectam-se os cabos que ligam o módulo ao sistema.

A corrente elétrica fotovoltaica poderá ser utilizada para acionar as cargas diretamente ou ainda poderá ser armazenada em baterias para ser utilizada mais tarde.

A quantidade de energia elétrica gerada pelo painel, chamada de energia fotovoltaica, dependerá da área coletora do painel a ser utilizado e da intensidade do brilho solar existente no local onde o painel for instalado. Sendo um sistema de energia elétrica, ele pode ou não ser utilizado em conjunto com a rede elétrica das concessionárias de energia elétrica existentes no mercado de energia.

Entre os tipos de sistemas fotovoltaicos existentes tem-se: (ROSA, 2007).

**1) Sistemas isolados:** Sistemas não ligados à rede convencional de energia elétrica. Em geral, estes sistemas utilizam alguma forma de armazenagem de energia.

**2) Sistemas híbridos:** Sistemas que, quando desconectados da rede convencional de energia, apresenta outras fontes de alimentação para suprir suas necessidades energéticas. Como exemplo destas fontes alternativas de energia, temos a energia eólica, a geração de energia elétrica a diesel, a energia gerada através da força das marés (maré motriz), geração de energia elétrica com biogás. Como são utilizadas várias fontes de energia, é necessário um controle mais rigoroso sobre as mesmas para que se consiga uma otimização do processo de captação e utilização da energia gerada.

**3) Sistemas interligados a rede:** Neste tipo de sistema, toda a geração de energia é entregue diretamente à rede de energia elétrica. Sendo assim o sistema interligado funciona como um complemento ao sistema elétrico de maior porte onde está conectado.

Entendendo o princípio de funcionamento dos painéis fotovoltaicos, o passo seguinte é conhecer os elementos que compõe este sistema, são eles:

### 6.2.1 Painel solar

De acordo com **MACIEL & LOPES (1999)**, o painel é constituído por uma ou mais placas solares, formadas por células fotovoltaicas. De acordo com a potência a ser utilizada tem-se uma área de painel a ser adquirida. O que se faz e agrupar mais de um painel, quando necessário, para formar um conjunto de painéis com a área necessária para suprir a potência calculada.

O painel é utilizado para gerar a energia necessária para acionar as cargas elétricas do sistema a ele conectado ou para carregar baterias que serão utilizadas posteriormente. Quanto maior a área do painel mais a se utilizar ou a se armazenar. Esta quantidade de energia depende também da intensidade solar incidente no painel. .

Por exemplo, uma placa solar de  $0,4 \text{ m}^2$  fornece uma tensão máxima de 14,5 V (Volts) e uma corrente contínua em torno de 2,5 A (Ampéres). Pode-se considerar que esta placa seja capaz de fornecer, em média uma energia de 150 Wh por dia de funcionamento, para efeito de cálculos em projetos com energia fotovoltaica, o que se utiliza é uma quantidade de 6 horas efetivas de incidência solar por dia.

As placas podem ser ligadas de diversas formas (em série, em paralelo ou ligação mista). De acordo com o tipo de ligação podemos aumentar a tensão ou a corrente, dependendo da necessidade do usuário.

A instalação do painel deve ser feita de maneira que ele receba o máximo de insolação ao longo do dia. Como um sistema onde o painel pudesse acompanhar o deslocamento do Sol ao longo do dia encarece o conjunto, o mais simples é fazer a instalação em um ângulo mais intermediário, fixo e que proporcione um maior aproveitamento de energia.

Os momentos de maior perda de conversão da energia solar em energia elétrica ocorrem no início da manhã e ao final da tarde, em contrapartida o horário de maior aproveitamento fica entre 11 horas e 14 horas. Para um melhor aproveitamento da energia solar, é necessário que a inclinação do painel seja igual a da latitude local e com a face do painel voltada para a direção norte, quando ele estiver sendo instalado no hemisfério sul e voltado para o sul quando ele estiver instalado no hemisfério norte.

A capacidade real de geração de energia dos módulos fotovoltaicos é medida em determinadas condições que seguem um padrão de normas de controle e que são utilizadas por todos os fabricantes deste tipo de painel. A potencia produzida pelo painel fotovoltaico

nestas condições é expressa em uma unidade denominada  $W_p$  (Watts pico). Como a energia solar varia ao longo do dia, fica claro que a produção de energia dos módulos ao longo do dia não é constante, não é fixa neste valor máximo de pico de produção de energia, ela varia de acordo com a intensidade de incidência dos raios solares.

Além de tudo o que foi exposto, o painel deve ser instalado em local limpo, de fácil acesso e sem a presença de obstáculos que possam projetar sombras sobre o painel ao longo do dia. O painel deve também ficar o mais próximo possível do local onde as cargas elétricas serão instaladas. Ele pode ser instalado diretamente sobre o telhado ou ainda fixado em mastros de modo adequado, como nas figuras 6.3 e 6.4.



Figura 6.3 – Painel fotovoltaico para iluminação externa.



Figura 6.4 – Poste com iluminação fotovoltaica em detalhe mostrando o painel, a bateria de armazenagem de energia e as lâmpadas.

Independente da forma como for instalado, o painel não pode ficar a mais de 10 metros do conjunto de baterias e do centro de distribuição dos circuitos para que não ocorram perdas significativas de tensão graças a resistência natural dos fios condutores (MACIEL E LOPES (1999)).

### **6.2.2 Baterias**

As baterias servem para acumular energia para que ela possa ser utilizada nos equipamentos em horários sem a presença do sol ou quando a energia captada pelo painel e fornecida ao sistema for menor do que a necessária.

O número de baterias a ser utilizado depende da carga instalada. O recomendado é a utilização de uma bateria de 100 Ampéres-hora para cada placa de 0,4 m<sup>2</sup> de área instalada no painel solar. Deste modo o sistema pode operar com a devida segurança. Recomenda-se ainda a utilização de baterias seladas para se evitar a troca periódica do seu nível de solução eletrolítica. Podem ser utilizadas as baterias seladas automotivas, porém seu tempo de vida útil é pequeno, por volta de 2 a 3 anos. O recomendável é a utilização de baterias estacionárias de ciclo profundo, que possuem uma vida útil de 4 a 5 anos. Outro fator a ser considerado no caso das baterias é o de que, na maioria dos casos, são utilizadas as baterias de chumbo-ácido para o armazenamento de energia vinda do painel fotovoltaico. Estas baterias, após o fim de sua vida útil devem ser devidamente descartadas, já que parte de seus componentes possuem um caráter tóxico elevado.

### **6.2.3 Condutores**

Os sistemas alimentados por painéis fotovoltaicos utilizam condutores nos mesmos padrões dos sistemas de energia elétrica de baixa tensão, devendo ser de cobre e com isolamento termoplástico.

### **6.2.4 Fusíveis**

Os fusíveis são dispositivos utilizados para proteção de circuitos elétricos contra ocorrência de correntes anormais (curto-circuito e sobrecarga). Normalmente são utilizados em equipamentos e circuitos domésticos e em indústrias. Os tipos de fusível mais comuns são:

- A) **Tipo Cartucho:** (figura 6.5 e 6.6): Proteção de circuitos residenciais com aproveitamento de energia solar. Este tipo de fusível é confeccionado e lacrado em fábrica. Ele é formado por um corpo “oco” de material não condutivo (vidro, porcelana, etc.). Em seu interior está o material condutor que liga duas cápsulas de metal que formam seus terminais, nos extremos do fusível.



Figura 6.5 – Fusível tipo cartucho

Fonte: [www.fusivel.com.br](http://www.fusivel.com.br)



Figura 6.6 – Fusível tipo cartucho confeccionado em vidro.

Fonte: <http://br.geocities.com/saladefisica>

- B) **Tipo NH e tipo Diazed:** (figura 6.7 e 6.8): Para circuitos de alimentação de motores como no bombeamento de água, por exemplo.



Figura 6.7 – Fusível tipo NH

Fonte: [www.suldistribuidora.com.br](http://www.suldistribuidora.com.br)



Figura 6.8 – Fusível tipo Diazed

Fonte: [www.elcose.it](http://www.elcose.it)

Independente do tipo utilizado eles devem ser sempre instalados no condutor positivo e dimensionados de acordo com a corrente absorvida pelo circuito e pela capacidade de condução de corrente do condutor. A capacidade nominal do fusível deve ser sempre maior do que a corrente absorvida pelo circuito e menor do que a capacidade de condução do condutor.

### 6.2.5 Controlador de carga

O controlador de carga, (figura 6.9), é um componente eletrônico utilizado para controlar o consumo de energia dos sistemas que utilizam a bateria. O controlador possui 3 pares de pólos para conexão dos terminais de ligação. Um par para conexão do painel solar, outro para conectar a bateria e o último para conectar os condutores que vão alimentar as cargas. Deve-se tomar o cuidado de conectar as polaridades de modo adequado, sempre positivo com positivo e negativo com negativo.

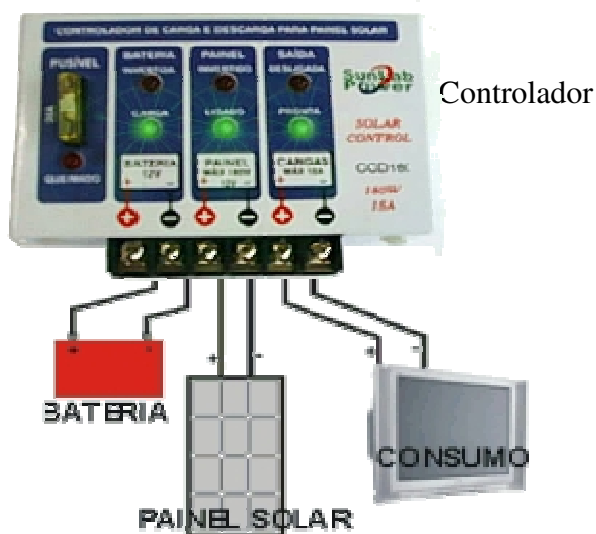


Figura 6.9 – Controlador de carga.

Fonte: [www.sunlab.com.br/energiasolar.htm](http://www.sunlab.com.br/energiasolar.htm)

O controlador de carga é utilizado para que a bateria não se descarregue por completo durante a utilização do sistema, mais precisamente quando a carga da bateria atinge um nível de 30% de sua carga total. Ao chegar neste nível de carga o controlador desconecta as cargas ligadas a bateria e começa a carregá-la. Assim que a bateria estiver com 80% de sua carga

total o controlador volta a conectar as cargas ao fornecimento de energia. Neste ponto a bateria esta com cerca de 13,5 Volts. Quando a bateria atingir 14,5 Volts, ou seja, estiver com sua carga máxima o controlador interrompe o carregamento da bateria.

Estes procedimentos aumentam a vida útil da bateria e em consequência de todo o sistema. Para escolher o controlador devemos utilizar os valores de tensão de alimentação e corrente que o painel irá fornecer. A tabela 6.2, mostra alguns exemplos de modelos de controlador.

**Tabela 6.2 - Modelos de controlador de carga**

<b>Especificação</b>	<b>Recomendado para painéis formados por:</b>
06 Ampéres	Uma ou duas placas solares
12 Ampéres	Três ou quatro placas solares
20 Ampéres	Cinco ou seis placas solares
30 Ampéres	Sete ou oito placas solares

Fonte: [www.cresesb.cepel.br/visitavirtual\\_cse.htm](http://www.cresesb.cepel.br/visitavirtual_cse.htm)

### **6.2.6 Inversor**

O inversor, (figura 6.10), é um dispositivo eletrônico utilizado para que os equipamentos com alimentação em corrente alternada (CA) possam funcionar. Os painéis solares fornecem corrente contínua (CC), porém alguns aparelhos eletrônicos funcionam apenas em corrente alternada (CA). Para que estes aparelhos possam utilizar a energia gerada pelo painel utiliza-se inversor, que deve ser instalado após o controlador de carga da bateria. Ao ser alimentado por corrente contínua, o inversor fornece na saída uma corrente alternada nas tensões de 110 Volts ou 220 Volts. Deve-se considerar que no processo de conversão existe uma perda de aproximadamente 10%. A escolha do inversor deve levar em conta a potência elétrica fornecida pelo painel solar. Como exemplo, temos inversores alimentados em corrente contínua, 12 Volts ou 24 Volts que fornecem na saída corrente alternada em 110 Volts ou 220 Volts fabricados para 125 W, 250 W, 300 W, 600W, 800W, 1500W.



Figura 6.10 – Inversores.

Fonte: [www.solener.com](http://www.solener.com)

## 6.3 Tipos de instalação

Uma das vantagens dos painéis fotovoltaicos é a sua modularidade, o que possibilita o uso de todos os seus elementos ou de apenas parte deles.

Existem basicamente quatro maneiras de se instalar os sistemas de fornecimento de energia fotovoltaica para alimentar as cargas elétricas.

### 6.3.1 Sistema: painel - carga:

Este é o mais simples de todos. As cargas são acionadas somente quando há a presença de Sol, já que a carga é ligada diretamente ao painel. Se for necessário, pode-se instalar um interruptor para ligar ou desligar a alimentação das cargas sempre que for necessário.

Um exemplo, citado anteriormente, é a utilização de bombas d'água acionadas com painéis fotovoltaicos, como mostra a figura 6.11.



Figura 6.11 – Sistema fotovoltaico painel – carga.

### 6.3.2 Sistema: painel – bateria – carga

Neste sistema (figura 6.12), o painel é utilizado para carregar a bateria e acionar a carga que estiver sendo utilizada. Com este sistema parte da energia gerada é utilizada para carregar a bateria e outra parte para acionar a carga durante o dia. Durante a noite utiliza-se da bateria para acionar a carga. Este sistema é também utilizado quando, mesmo em presença do Sol, a energia fornecida pelo painel não é suficiente para alimentar adequadamente a carga, deste modo às baterias são acionadas para suprir o sistema. A desvantagem deste sistema é a falta de controle sobre a carga da bateria. Dependendo do consumo, a bateria poderá se descarregar por completo, o que reduz sua vida útil e compromete o uso do sistema.

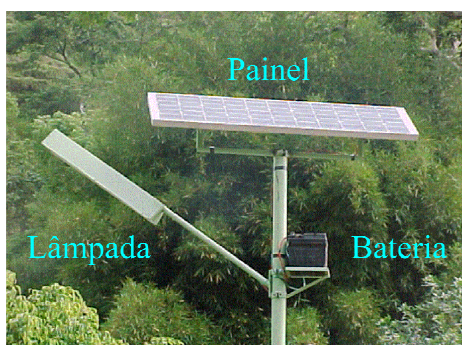


Figura 6.12 – Sistema fotovoltaico painel – bateria - carga.

### 6.3.3 Sistema: painel – controlador – bateria – carga

Este sistema é mais utilizado para alimentar cargas em corrente contínua. O controlador é responsável por coordenar a utilização da carga da bateria durante o uso. Este arranjo fornece uma autonomia de pelo menos 5 dias de funcionamento sem a presença de sol. A figura 6.13, mostra um esquema de instalação como o descrito acima.

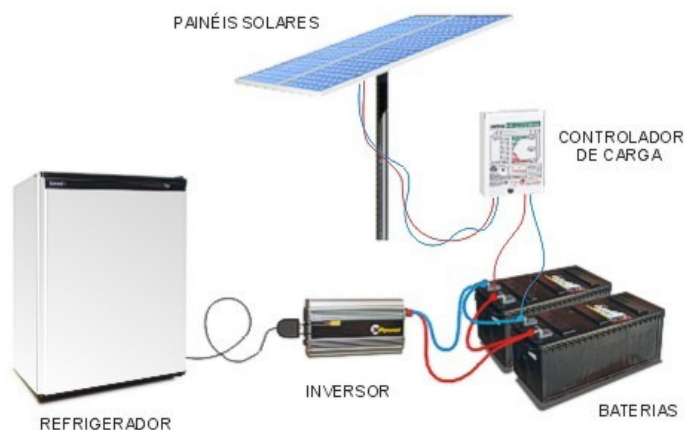


Figura 6.13 – Conjunto painel, controlador, bateria, carga.

Fonte: <http://www.mbtenergia.com.br>

### 6.3.4 Sistema: painel – controlador – bateria – inversor – carga

No mercado existe uma série de aparelhos que funcionam em corrente alternada, logo é necessário instalar um inversor no sistema de alimentação, caso se necessite utilizar algum destes equipamentos. Sua função é ser alimentado em corrente contínua em baixa tensão (12 Vcc ou 24 Vcc) e fornecer em sua saída corrente alternada também em baixa tensão (110 Vca ou 220 Vca). A figura 6.14 a seguir exibe um exemplo clássico de instalação de painéis fotovoltaicos.

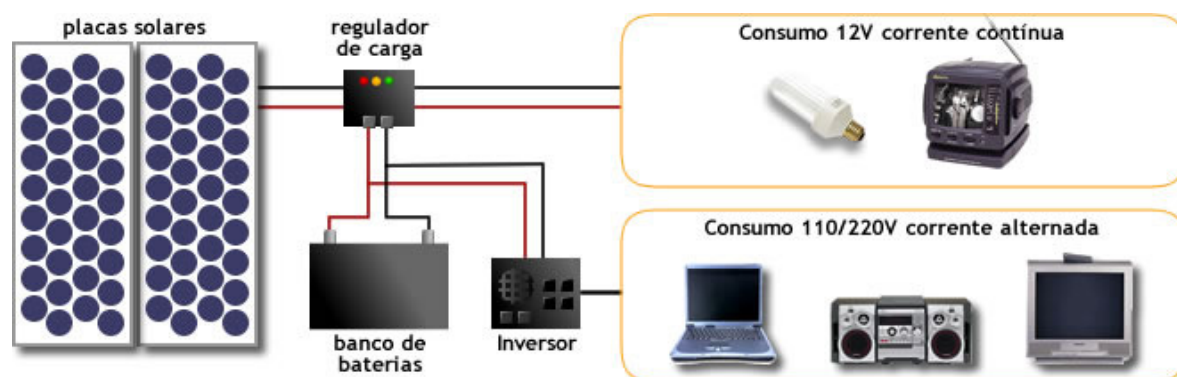


Figura 6.14 – sistema de geração de energia fotovoltaica completo.

Fonte: [www.heliodinamica.com.br](http://www.heliodinamica.com.br)

## 6.4 Análise do ciclo de vida de um painel fotovoltaico padrão

Como mencionado anteriormente, os limites adotados para este estudo compreendem apenas a produção de três dos elementos formadores dos módulos fotovoltaicos, ou seja, as células de silício, a placa de vidro plano e a moldura de alumínio. Além destes itens, ainda será considerada como parte do estudo a bateria de chumbo-ácido utilizada para a armazenagem da energia fornecida pelo painel. A decisão de considerar a bateria de chumbo-ácido neste estudo se deve a sua capacidade de geração de impactos ambientais negativos, não só no processo de fabricação, mas principalmente no descarte de material ao final de sua vida útil. Os demais equipamentos utilizados na geração de energia fotovoltaica não serão contemplados neste estudo.

Considerando estas limitações, na seqüência serão descritos os processos de fabricação dos elementos abordados.

### 6.4.1 A fabricação do alumínio

De acordo com Switkes (2005), o alumínio é um metal bastante comum e abundante em todo o planeta. Utilizado na construção de máquinas, peças de diversos tipos e usos, em ornamentos de cozinha, panelas e frigideiras; em latas de refrigerante e cerveja, bandejas de restaurantes etc.

Com estas características, o alumínio se mostra um material bastante versátil, além de ter baixo peso, ser resistente a corrosão, ter boa condutividade de eletricidade e calor, boa

resistência, além da possibilidade de ser derramado, prensado ou laminado. Tais possibilidades garantem ao alumínio uma presença cada vez maior em bens de consumo em todo o mundo.

Entretanto, o custo econômico aparentemente baixo do alumínio e sua quase onipresença não correspondem aos altos custos para o meio ambiente decorrentes de sua mineração e refinação. Seu passivo ambiental se estende desde a destruição de florestas e contaminação de águas com seus resíduos até a influência direta de contaminação em ecossistemas submersos. Além destes fatores, os custos humanos da produção de itens conhecidos em alumínio também são altos. Como exemplo tem-se os reassentamentos de indígenas e agricultores, e sérios impactos sobre a comunidade e a saúde do trabalhador, fatores que ocorrem desde a extração do minério até a sua manipulação industrial final em forma de lingotes e/ou produtos manufaturados. A conversão do minério de alumínio, a bauxita ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), em alumínio primário é também o processo industrial que mais consome energia no mundo, os produtores de alumínio utilizam mais eletricidade do que qualquer outra indústria. Além disto, a indústria do alumínio é um importante contribuinte para o aquecimento global.

De acordo com o relatado por Kim et al (2000) o alumínio primário é produzido em três estágios:

- **Extração do minério de Bauxita**
- **Obtenção da Alumina em grau metalúrgico pelo processo Bayer**
- **Obtenção do alumínio anodizado pelo processo Hall Heroult**

Os dados referentes a estes estágios bem como os dados sobre as entradas e saídas do processo podem ser vistos no anexo I.

### 6.4.2 A fabricação do vidro plano

De acordo com a Associação Técnica Brasileira das Indústrias Automáticas de Vidro – ABIVIDRO (2007), o vidro é composto basicamente por areia, calcário, barrilha, alumina e corantes ou descorantes. Toda produção de vidro resume-se essencialmente em reunir os materiais básicos necessários, ou seja, a sílica ( $\text{SiO}_2$ ), o óxido de ferro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), o cálcio ( $\text{CaO}$ ), O magnésio ( $\text{MgO}$ ), o sódio ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), o potássio ( $\text{K}_2\text{O}$ ) e a alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e pequenas quantidades de aditivos, convertendo-os a um produto extremamente refinado.

No caso dos painéis fotovoltaicos, é utilizado o vidro plano temperado com baixo teor de ferro, capaz de oferecer uma boa capacidade de absorver os raios ultravioleta e infravermelho, além de oferecer uma boa resistência a altas temperaturas e capacidade de operar adequadamente e condições climáticas extremas, cujo processo de fabricação, de acordo com Kim et al (2000), passa pelas seguintes etapas:

- **Peneiramento**
- **Secagem**
- **Mistura**
- **Fusão**
- **Têmpera e estiramento**
- **Recozimento**
- **Acabamento**
- **Corte**

Os dados referentes a estes estágios bem como os dados sobre as entradas e saídas do processo podem ser vistos no anexo II.

### 6.4.3 A fabricação da célula de silício e montagem do módulo fotovoltaico

De acordo com o tipo de materiais semicondutores que formam 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 primeiro tipo de célula fotovoltaica a ser produzido em escala industrial foi a célula de silício mono-cristalino.

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 (1995):

- **Mineração e refino de sílica**
- **Redução da sílica para**
- **Produção de Silício de alto grau de pureza**
- **Produção da célula de silício**
- **Montagem dos “Wafers” (bolachas) de de Silício**
- **Gravação e texturização dos “wafers”**
- **Formação do emissor P-N**
- **Metalização:**
- **Camada anti-reflexiva:**
- **Teste das células:**
- **Encapsulamento**

#### 6.4.4 A fabricação da bateria de chumbo-ácido

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 uma quantidade razoável de baterias terá sido utilizada e descartada no ambiente. Com isso uma série de problemas ambientais pode ocorrer e, portanto devem ser considerados com atenção.

De acordo com Diniz (2001), a bateria de chumbo-ácido foi inventada por Gaston Planté no ano de 1860. Hoje, após os aprimoramentos tecnológicos ocorridos ao longo de 146 anos, a bateria de chumbo-ácido tornou-se bastante confiável e capaz de atender as mais diversas aplicações. A bateria mais utilizada para armazenar a energia gerada pelo módulo fotovoltaico em sistemas autônomos é a bateria automotiva selada, por possuir vantagens de custo, manutenção, densidade de energia, rendimento de processo e tempo de vida. A composição básica de uma bateria é formada por chumbo (chumbo metálico, ligas de chumbo, sulfato de chumbo e bióxido de chumbo), ácido sulfúrico (solução aquosa com concentração em volume de 27% - 37%) e materiais plásticos (composição da base de fixação e caixa da bateria).

Hoje o principal uso do chumbo está ligado a fabricação de baterias de chumbo-ácido. O chumbo utilizado na indústria de baterias pode ser classificado como primário (retirado das minas) e secundário (obtido através do refino de material reciclado). No caso do Brasil, o país quase não possui reservas minerais de chumbo, assim a sucata das baterias descartadas é torna-se um material interessante para a indústria das baterias. O agravante neste processo é que existe no mundo hoje uma legislação (Convenção de Genebra) que proíbe a exportação de lixos ou rejeitos perigosos, incluindo as sucatas de bateria. Logo para um posterior aumento de produção é necessário que o Brasil importe o chumbo primário ou secundário para garantir a produção.

Considerando o citado dito acima, 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 pela seguintes fases, (Diniz (2001)).

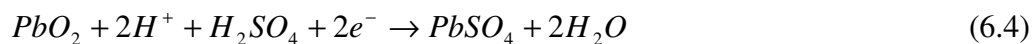
- Refino do chumbo
- Produção do óxido de chumbo (empastação)
- Processamento do óxido de chumbo
- Produção das placas
- Produção das grades de chumbo
- Processamento das placas
- Fabricação das conexões
- Fabricação da tampa e da caixa de polipropileno
- Fabricação dos separadores de polietileno
- Montagem da bateria

O princípio de funcionamento de uma bateria é simples, nela existe um ânodo (chumbo) e um cátodo (bióxido de chumbo), ambos são convertidos em sulfato de chumbo durante o processo de descarga. No processo de recarga o sulfato de chumbo é convertido em chumbo e bióxido de chumbo regenerando o cátodo e o ânodo.

Seu processo de funcionamento tem como base a seguinte reação:



Que por sua vez é o resultado de:



De acordo com o Serviço Brasileiro de Respostas Técnicas RT, qualquer bateria de automóvel (selada ou não) produz gases quando está sendo utilizada. Por isso as baterias seladas têm um respiro, por onde estes gases podem escapar. Caso estes gases permanecessem presos dentro da bateria, com o tempo haveria um aumento de pressão o que acabaria por fazer com que a bateria explodisse.

O esquema da bateria automotiva é apresentado na figura 6.15.

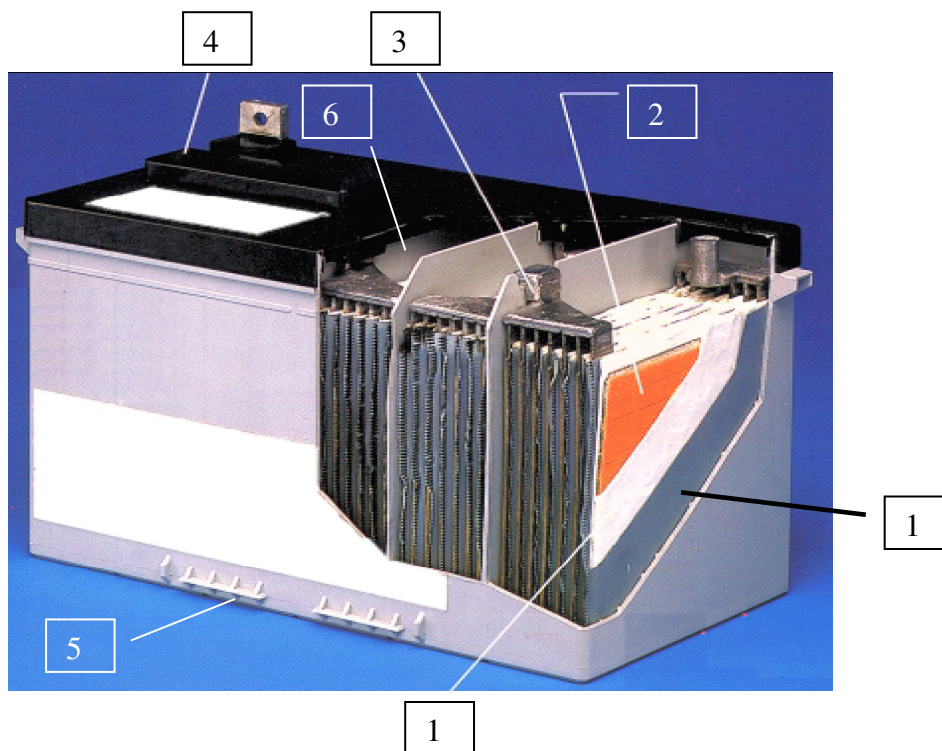


Figura 6.15 – Bateria em corte

Fonte: Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito - CRESESB – [www.cresesb.cepel.br](http://www.cresesb.cepel.br)

Onde:

- 1 – Envelope separador;
- 2 - Placa negativa envelopada;
- 3 – Placa positiva;
- 4 - Monobloco de Polipropileno;
- 5 – Sistema de fixação;
- 6 – Solução eletrolítica

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. Considerando que 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 da bateria será de:

$$12K\text{ kg} \times 13,89 \frac{\text{kWh}}{\text{kg}} = 166,68\text{kWh} \quad (6.5)$$

A figura 6.16 mostra um fluxograma das fases de produção de uma bateria de chumbo-ácido.

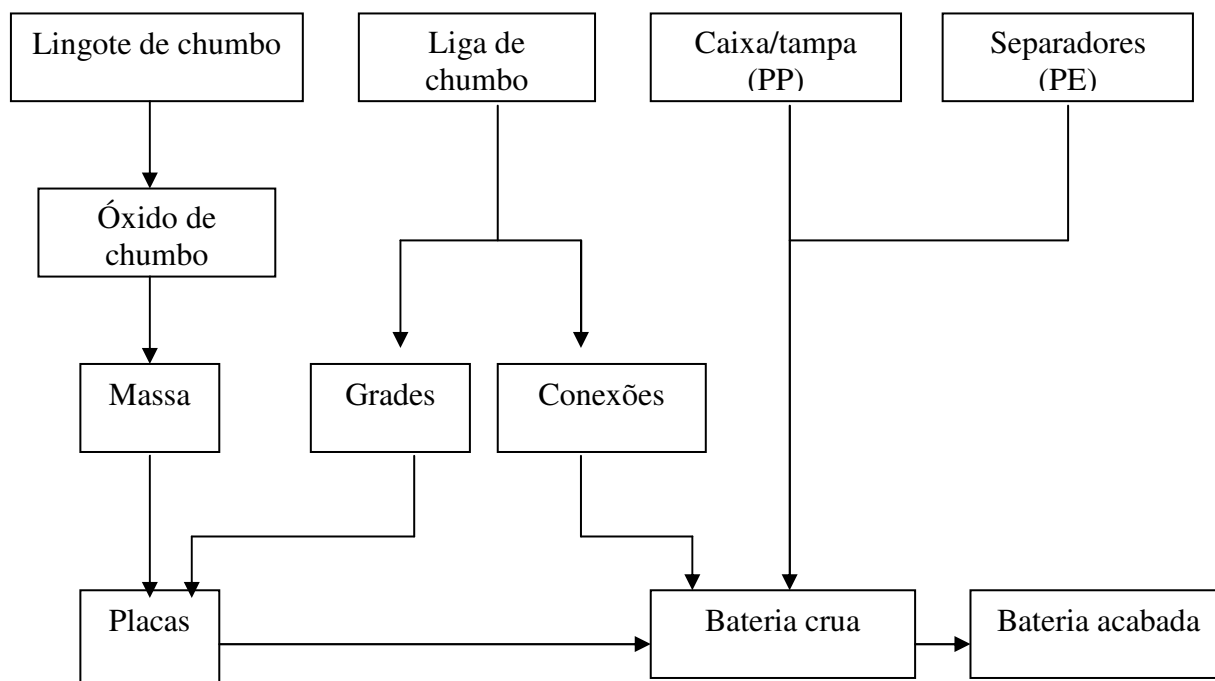


Figura 6.16 – Fluxograma do processo de produção da bateria de chumbo-ácido

Fonte: Diniz (2001)

Após a exposição dos dados relativos ao estudo de caso, o próximo capítulo trata da análise do equilíbrio energético e da mitigação do passivo ambiental gerado pela produção do módulo fotovoltaico.

# CAPÍTULO 7 – ANÁLISE DE EQUILÍBRIO ENERGÉTICO E AMORTIZAÇÃO DO PASSIVO AMBIENTAL

## 7.1 Análise do Equilíbrio Energético

Toda nova tecnologia de geração de energia deve estar sujeita a uma análise de seu equilíbrio de energia e de sua viabilidade energética antes de ser denominada como renovável ou sustentável. Neste contexto, a energia solar fotovoltaica é uma das mais promissoras tecnologias de geração de energia renovável e possui um potencial de abastecimento energético bastante significativo, além de auxiliar na mitigação das emissões de CO<sub>2</sub>.

A eletricidade produzida pelo módulo fotovoltaico não produz nenhum tipo de poluição e não emite nenhum tipo de GEE. Estes benefícios ambientais são uma vantagem para o sistema fotovoltaico. Ainda assim, embora não necessite de uma fonte de energia fóssil ou nuclear para operar, o sistema fotovoltaico necessita de uma quantidade razoável de energia para ser produzido. 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.

Os impactos ambientais ligados à mudanças climáticas e a acidificação estão fortemente ligados ao tipo de sistema de energia utilizada. É necessário nestes casos que se encontre um parâmetro de desempenho do uso de energia como um indicador para a tensão ambiental causada pelos sistemas fotovoltaicos (Alsema & Nieuwlaar, 1997).

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. Neste caso a verificação do tempo de reembolso de energia se mostra um bom indicador de desempenho por ser semelhante ao tempo de reembolso econômico, embora possua a desvantagem de não responder pelo ganho de energia durante o restante da vida econômica do módulo fotovoltaico.

Considerando o sistema fotovoltaico, seu cálculo de amortização de energia depende de diversos fatores:

- Tipo de célula fotovoltaica utilizada;
- Tipo de armação;
- Tipo de encapsulamento;
- Tipo de aplicação do sistema (autônomo ou interligado);
- Quantidade de irradiação solar absorvida;
- Exigência de energia para a fabricação de outros itens que compõe o módulo (alumínio da armação, placa de vidro etc).

Neste estudo, foram considerados os gastos de energia para a produção da armação de alumínio, produção da placa de vidro plano, produção das células de silício e do módulo, bem como da produção da bateria de chumbo-ácido. No caso das células de silício foram consideradas as células mono cristalinas e poli cristalinas, já que, como mostrado ao longo do capítulo 2 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.

De acordo com o que foi explicado nos itens anteriores, para realizar a análise energética da fabricação do módulo PV tem-se os seguintes passos:

1. Levantamento dos dados relativos ao ciclo de vida da cadeia de produção dos itens abordados (produção do alumínio, silício e vidro, bateria de chumbo-ácido). Nesta etapa são recolhidas as informações pertinentes ao tipo de processo utilizado, gasto energético e emissões ocorridas durante cada fase de produção. As emissões desta fase são chamadas de emissões diretas.

2. Conversão das emissões ocorridas durante o ciclo de vida do módulo PV em kg equivalentes de CO<sub>2</sub>. No caso deste estudo o total de emissões é de 54,781 kg equivalentes de CO<sub>2</sub>, calculado de acordo com o citado no capítulo 3, item 3.2 (página 27), com o auxílio da tabela 3.1 (página 28) e cujo o resultado é exibido na tabela 7.6 (página 138).
3. Levantamento dos dados relativos ao módulo finalizado (área do módulo, área das células, número de células, potência do módulo, etc).
4. Soma dos gastos energéticos de cada processo analisado, de acordo com a literatura abordada, para obter o gasto total de energia necessária para a fabricação do módulo.
5. Levantamento de dados relativos ao fator de emissão de CO<sub>2</sub> de cada país analisado, ou seja, quanto cada país emite em kg de CO<sub>2</sub> /kWh gerado.
6. Cálculo da quantidade emitida de CO<sub>2</sub> no país de origem para que o mesmo possa produzir a quantidade de energia necessária à fabricação do módulo. Este cálculo é feito multiplicando-se a quantidade de energia necessária para se fabricar o módulo PV (tabela 7.1) pelo valor do fator de emissão de CO<sub>2</sub> do país de origem do módulo PV. O valor encontrado recebe o nome de emissão indireta, já que estas emissões ocorrem durante a produção da energia necessária para a fabricação do módulo PV e não diretamente em seu processo de fabricação.
7. Cálculo da quantidade total de CO<sub>2</sub> emitido durante a fabricação do módulo PV (somatório das emissões diretas e indiretas), para cada país analisado. Este valor é obtido somando-se o valor encontrado no item 6 e a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida durante o processo de fabricação do módulo PV (ver item 7.1).
8. Cálculo da quantidade de energia produzida em um ano pelo módulo analisado. Este cálculo é feito multiplicando-se a potência do painel pela quantidade de horas diárias de funcionamento e também multiplicando-se pelo número de dias do ano, ou seja, 365 dias (ver tabela 7.2). Neste caso, quando da realização de projetos com módulos PV, o recomendado é que se considere o funcionamento do módulo com 6 horas de funcionamento diário com sol pleno.

9. Cálculo da quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> evitadas com o uso do painel anualmente no país de destino (ver item 7.2, sub-item 4).
10. Cálculo do tempo de amortização da energia necessária para a fabricação do módulo (EPBT). Este cálculo é feito dividindo-se a quantidade de energia necessária para a fabricação do módulo PV pela quantidade de energia produzida pelo módulo em um ano (ver capítulo 5, item 5.4, equação 5.1).
11. Cálculo do tempo necessário de funcionamento do módulo para amortizar as emissões de CO<sub>2</sub> de sua fabricação. Este cálculo é feito dividindo-se a quantidade de emissões (diretas e indiretas) geradas pelo módulo para sua fabricação no país de origem pelo valor de emissões evitadas pelo funcionamento anual do módulo no país de destino (ver tabelas 7.7 e 7.8)
12. Estimar o tempo necessário de funcionamento do módulo PV para que este possa amortizar os custos gerados pelo passivo ambiental de sua fabricação.
13. Calcular o tempo de funcionamento do módulo PV para amortizar tanto seus gastos energéticos, de emissões de CO<sub>2</sub> e do passivo ambiental de acordo com o país de origem e de destino do módulo ( ver tabelas 7.10 e 7.11).
14. Cálculo do tempo de vida ambientalmente útil que resta ao módulo PV. Neste caso, deve-se atribuir ao mesmo um determinado tempo de vida útil e subtrair deste, para cada caso, o tempo total de amortização dos gastos energéticos, das emissões de CO<sub>2</sub> e do passivo ambiental (ver tabela 7.12).

De acordo com Wild-Scholten & Alsema (2006), a tabela 7.2 exibe um resumo sobre os dados relativos ao módulo analisado

**Tabela 7.1 – Levantamento do gasto energético da fabricação do módulo PV**

<b>Gasto Energético (kWh)</b>			
Área do módulo (m <sup>2</sup> )	0,58		
Área das células (m <sup>2</sup> )	0,49		
<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	Wild-Scholten / Alsema	Kim et al	—
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>			1373,72

Fonte: Wild-Scholten & Alsema (2006), Kim et al (2000), Mingacho (2003), modificados.

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 7.2 abaixo. Salienta-se que os valores foram alocados de acordo com a quantidade de material necessário para a fabricação de um módulo PV que utiliza 5,2 kg de vidro, 2,6 kg de alumínio e uma bateria de chumbo-ácido de 12 kg. deste modo os valores encontrados na literatura foram recalculados, quando necessário, de acordo com os parâmetros utilizados pelo módulo estudado.

**Tabela 7.2 – 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
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

Fonte: Wild-Scholten / Alsema (2006), modificados.

De acordo com os dados da tabela 7.3, o módulo PV necessita de um gasto energético para ser produzido de 1373,72 kWh. Se for considerado um módulo PV com vida útil de aproximadamente 25 anos, o mesmo é capaz de gerar 4051,50 kWh neste período, ou seja, 162,06 kWh/ano, 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.

O valor de 8,48, quando comparados com os 25 anos de vida útil do painel, pode ser considerado um valor elevado, atingindo 33,92 % do tempo total de vida útil do módulo dado como exemplo.

**Tabela 7.3 – Cálculo do Equilíbrio energético da produção do módulo fotovoltaico.**

<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>
Gasto energético de produção ou $E_{utilizada}$ [kWh/módulo]	1373,72
Energia economizada pelo painel em 1 ano ou $E_{economizada}$ [kWh/ano]	162,06
<b>EPBT [anos] = <math>E_{utilizada} / E_{economizada}</math></b>	<b>8,48</b>

Fonte: Elaboração própria

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, o que será feito nos próximos itens.

## **7.2 Análise da Capacidade de Amortização das emissões de CO<sub>2</sub> do Módulo PV**

Para analisar a capacidade do módulo fotovoltaico em equilibrar as emissões de CO<sub>2</sub> de seu processo de produção, ou ainda sua capacidade em auxiliar na mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> na produção de energia, é preciso fazer um levantamento mais apurado

tanto das emissões ocorridas em seu processo de produção quanto das emissões de CO<sub>2</sub> das fontes energéticas utilizadas.

Neste estudo serão consideradas tanto as emissões diretas (gases emitidos durante a produção do alumínio, vidro, das células fotovoltaicas, bateria de chumbo-ácido e durante a fabricação do módulo), quanto às emissões indiretas (emissões equivalentes de kg de CO<sub>2</sub>/kWh gasto na produção do módulo).

Para calcular os valores de kg de CO<sub>2</sub>/kWh gasto na produção do módulo devem ser utilizados os valores do fator de emissão de CO<sub>2</sub>, adotados pela composição da matriz energética de cada um dos países analisados, como mostrado na tabela 7.4.

**Tabela 7.4 – 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>
<b>Brasil<sub>SINT</sub></b>	0,054(1)
<b>Japão</b>	0,439(2)
<b>Alemanha</b>	0,530(2)
<b>EUA</b>	0,703(3)
<b>Brasil<sub>SISO</sub></b>	0,821(4)

Fonte: Elaboração Própria á das seguintes fontes: (1) Ministério de Minas e Energia - <http://www.mme.gov.br/>, (2) Krauter & Rüter (2003), (3) EnergyStar (2006) [www.energystar.gov](http://www.energystar.gov) e (4) Tiago Filho et al (2006).

Para o Brasil, foram adotados dois valores distintos, um para o sistema interligado - Brasil<sub>SINT</sub> e outro para o sistema isolado - Brasil<sub>SISO</sub>. Na formulação de dados foi adotada considerando-se que é do interesse deste estudo uma análise das possibilidades de inclusão dos sistemas fotovoltaicos tanto em países com uma matriz energética mais “limpa” quanto em países com uma matriz energética mais fóssil dependente. Deste modo é possível avaliar se é viável ou não a produção de sistemas fotovoltaicos no Brasil em seu sistema interligado, Brasil<sub>SINT</sub>, para utilização no sistema isolado, - Brasil<sub>SISO</sub>, e vice-versa. Além de poder analisar, dentro de um mesmo país, a variação dos custos ambientais e energéticos da produção de módulos PV, o Brasil se mostra como foco de interesse por possuir matriz energética diferenciadas dos demais países abordados neste estudo. Deste modo a atribuição dos valores do FE para os

sistemas Isolado e Interligado torna possível uma avaliação mais precisa sobre o processo de fabricação do módulo no Brasil.

Salienta-se ainda que, de acordo com o Departamento de Desenvolvimento Energético (DDE) do MME, não estão disponíveis os dados relativos 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 SIN que possui características diferenciadas dos sistemas elétricos de outros países onde a maioria das metodologias de cálculo de emissões foram elaboradas. 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 no ano de 2005, 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). Estes valores são mostrados na tabela 7.5.

**Tabela 7.5 – Emissão de CO<sub>2</sub> em uma unidade termoeletrica em função do combustível.**

<b>Combustível Fóssil</b>	<b>Toneladas de CO<sub>2</sub> por MW/hora</b>
<b>Gás Natural</b>	0.491
<b>Óleo Combustível</b>	1.018
<b>Diesel</b>	0.975
<b>Propano</b>	0.552
<b>Carvão Mineral</b>	1.069
<b>Total</b>	4.105
<b>Média</b>	0.821

Fonte: Tiago Filho et al (2006)

Com os dados obtidos até agora é possível montar uma tabela cruzando os valores da quantidade de CO<sub>2</sub> emitido de acordo com a energia consumida na fabricação do módulo e com a quantidade de CO<sub>2</sub> evitada com o funcionamento do módulo durante sua vida útil em cada país analisado. A montagem da referida tabela foi feita de acordo com a seguinte metodologia:

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

$$EI = FE \times GEM \quad (7.1)$$

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):

ED é igual a Soma dos valores de emissão de CO<sub>2</sub> e de diversos outros gases (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 7.6 montada de acordo com os valores de equivalente de CO<sub>2</sub> da tabela 3.1.

**Tabela 7.6 - Cálculo de emissão direta em equivalente de CO<sub>2</sub> para a produção do módulo.**

<b>EMIÇÃO DIRETA EQUIVLENTE - CO<sub>2</sub> (kg)</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Silício</b>	
	Quantidade (kg)	eq -CO <sub>2</sub> (kg)
C	1,000	3,670
FC-gases (CF <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> , SF <sub>6</sub> , NF <sub>3</sub> )	kg CO <sub>2</sub> -eq	0,044
<b>Total parcial (Si)</b>	—	<b>3,714</b>
<b>Alumínio</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Alumínio</b>	
	Quantidade (kg)	eq -CO <sub>2</sub> (kg)
CO <sub>2</sub>	13,623	13,623
SO <sub>2</sub>	0,0056	1,520
C	0,867	3,181
<b>Total parcial (Al)</b>	—	<b>18,324</b>
<b>Vidro</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Vidro</b>	
	Quantidade (kg)	eq -CO <sub>2</sub> (kg)
CO <sub>2</sub>	3,557	3,557
SO <sub>2</sub>	0,0014	0,386
<b>Total parcial (Vidro)</b>	—	<b>3,943</b>
<b>Bateria (Chumbo-Ácido)</b>		
<b>Elemento</b>	<b>Bateria (Chumbo-Ácido)</b>	
	Quantidade (kg)	eq -CO <sub>2</sub> (kg)
CO <sub>2</sub> (para 1 bateria)	28,800	28,800
<b>Total parcial (para 4 Baterias)</b>	—	<b>115,200</b>
<b>Total emissões diretas - ED (kg eq. -CO<sub>2</sub>)</b>		<b>141,181</b>

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

$$ET = ED + EI \quad (7.2)$$

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

Como resultado dos cálculos efetuados foi elaborada a tabela 7.7

**Tabela 7.7 – Total equivalentes de emissões de kg CO<sub>2</sub> /kWh da fabricação do módulo PV.**

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

(1) Fator de emissão

(2)gasto d 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.

$$EE = 162,06 \times FE \quad (7.3)$$

Onde:

- EE - total de emissões evitadas com a utilização do módulo PV durante um ano de funcionamento no país de destino
- 162,06 kWh – 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 7.8

**Tabela 7.8 - Emissões de CO<sub>2</sub> Evitadas pelo módulo PV durante um ano de seu ciclo de vida – EE/módulo**

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

### 6) Cálculo do equilíbrio de emissões de CO<sub>2</sub> 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 obtem-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 para alcançar o equilíbrio das emissões de CO<sub>2</sub> de todo o processo. A tabela 7.9 exibe o resultado deste cálculo tendo como base nas diferentes possibilidades de mitigação de CO<sub>2</sub> pelo módulo, de acordo com o país onde for fabricado e/ou instalado. De acordo com os países em estudo.

**Tabela 7.9 – Saldo de emissões de CO<sub>2</sub> durante ciclo de vida do painel fotovoltaico [kg]**

		País de origem				
		Brasil <sub>SINT</sub>	Japão	Alemanha	EUA	Brasil <sub>SISO</sub>
País de destino	FE <sup>(1)</sup>	0,0540	0,4390	0,5300	0,7030	0,8210
<b>Brasil<sub>SINT</sub></b>	<b>0,054</b>	3,42	-525,46	-650,47	-888,12	-1050,22
<b>Japão</b>	<b>0,439</b>	1563,25	1034,37	909,36	671,71	509,61
<b>Alemanha</b>	<b>0,530</b>	1931,93	1403,05	1278,04	1040,39	878,29
<b>EUA</b>	<b>0,703</b>	2632,84	2103,96	1978,95	1741,30	1579,20
<b>Brasil<sub>SISO</sub></b>	<b>0,821</b>	3110,92	2502,04	2457,03	2219,38	2057,28

Fonte: Krauter & Rüther (2003), modificado.

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

De acordo com a tabela 7.9, valores negativos foram encontrados indicando que o painel necessita funcionar por um tempo maior que os 25 anos atribuídos para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> de seu processo de fabricação. Para calcular quanto tempo o módulo precisa funcionar para que ele possa mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> é preciso dividir a quantidade total de emissões durante a produção (considerando o local de produção do módulo) pela quantidade de emissão de CO<sub>2</sub> evitada durante um ano de funcionamento do painel (considerando o local de operação do módulo). Os dados da tabela 7.10, obtidos de acordo com o descrito no capítulo 5, item 5.4, equação 5, trata das diferentes possibilidades de mitigação de CO<sub>2</sub> pelo módulo de acordo com o país de origem/destino, para um tempo de vida útil do módulo PV estabelecido em 25 anos.

**Tabela 7.10 – Período de Amortização de emissões CO<sub>2</sub> durante ciclo de vida do painel fotovoltaico [anos].**

		País de origem				
		Brasil <sub>SINT</sub>	Japão	Alemanha	EUA	Brasil <sub>SISO</sub>
País de destino	FE <sup>(1)</sup>	0,054	0,439	0,530	0,7030	0,821
Brasil <sub>SINT</sub>	0,054	24,61	85,04	99,33	126,49	145,01
Japão	0,439	3,03	10,46	12,22	15,56	17,84
Alemanha	0,530	2,51	8,66	10,12	12,89	14,77
EUA	0,703	1,89	6,53	7,63	9,72	11,14
Brasil <sub>SISO</sub>	0,821	1,62	5,59	6,53	8,32	9,54

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

Depois de calcular o tempo necessário para que o módulo possa mitigar as emissões de CO<sub>2</sub>, é possível avaliar o tempo necessário para que o módulo possa cobrir tanto os gastos energéticos quanto os de mitigação de CO<sub>2</sub>, 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 e o tempo necessário para mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> de cada caso, os resultados são mostrados na tabela 7.11

**Tabela 7.11 - Tempo para amortizar gastos energéticos e de mitigação [anos]**

País de destino	FE <sup>(1)</sup>	País de origem				
		Brasil <sub>SINT</sub>	Japão	Alemanha	EUA	Brasil <sub>SISO</sub>
		<b>0,054</b>	<b>0,439</b>	<b>0,530</b>	<b>0,703</b>	<b>0,821</b>
<b>Brasil<sub>SINT</sub></b>	<b>0,054</b>	33,09	93,52	107,81	134,96	153,48
<b>Japão</b>	<b>0,439</b>	11,50	18,94	20,69	24,04	26,31
<b>Alemanha</b>	<b>0,530</b>	10,98	17,14	18,60	21,36	23,25
<b>EUA</b>	<b>0,703</b>	10,37	15,01	16,11	18,19	19,62
<b>Brasil<sub>SISO</sub></b>	<b>0,821</b>	10,10	14,07	15,01	16,80	18,01

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

Considerando-se apenas a amortização do gasto energético e das emissões de CO<sub>2</sub>, é necessário saber quanto tempo de vida ambientalmente útil possui o módulo fotovoltaico, em cada caso. Para obter este valor deve-se subtrair os valores obtidos na tabela 7.11, acima, do tempo de vida útil do painel considerado (25 anos). Os resultados são mostrados na tabela 7.12. Observa-se que um tempo de vida útil ambientalmente correta 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 impactos negativos advindos de sua produção.

**Tabela 7.12 - Tempo de vida útil ambientalmente correta do módulo fotovoltaico.**

País de destino	FE <sup>(1)</sup>	País de origem				
		Brasil <sub>SINT</sub>	Japão	Alemanha	EUA	Brasil <sub>SISO</sub>
		<b>0,054</b>	<b>0,4390</b>	<b>0,530</b>	<b>0,703</b>	<b>0,821</b>
<b>Brasil<sub>SINT</sub></b>	<b>0,054</b>	-10,59	-71,02	-85,31	-112,46	-130,98
<b>Japão</b>	<b>0,439</b>	11,00	3,56	1,81	-1,54	-3,81
<b>Alemanha</b>	<b>0,530</b>	11,52	5,36	3,90	1,14	-0,75
<b>EUA</b>	<b>0,703</b>	12,13	7,49	6,39	4,31	2,88
<b>Brasil<sub>SISO</sub></b>	<b>0,821</b>	12,40	8,43	7,49	5,70	4,49

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

Fica claro que é possível mitigar as emissões de CO<sub>2</sub> com o auxílio dos painéis fotovoltaicos, com a ressalva de que deve ser observado como critério de escolha tanto o local de produção quanto o local onde os mesmos irão entrar em operação. Após verificar as possibilidades de equilíbrio energético e amortização de CO<sub>2</sub>, resta ainda

analisar a capacidade do módulo em mitigar o passivo ambiental gerado por sua fabricação, assunto tratado no próximo item.

### 7.3 Análise do Passivo Ambiental

Baseando nas matrizes propostas por Barbosa (2004), como citado no capítulo 5, é possível elaborar uma matriz específica para quantificar os impactos ambientais identificados nas fases de exploração de matéria prima, produção de material e montagem do módulo fotovoltaico. Com isto é possível fazer uma previsão da quantidade de unidades de impactos ocasionados pela produção do módulo fotovoltaico nos 4 países analisados. Os impactos analisados apresentam dois atributos principais, a importância e a magnitude. Os parâmetros foram estabelecidos conforme a tabela 7.13 a (BARBOSA, 2004).

**Tabela 7.13 - Parâmetros e atributos para avaliação de impactos da Produção do módulo fotovoltaico.**

<b>Parâmetro</b>	<b>Atributo</b>
<b>REFLEXOS</b> (sobre o ambiente)	Direto ou indireto Negativo ou positivo
<b>ABRANGÊNCIA</b> (do impacto)	Pontual Local Regional
<b>FREQUÊNCIA</b> (com que o impacto se instala ou se manifesta)	Permanente Temporário Cíclico
<b>TEMPORALIDADE</b> (com que o impacto se manifesta)	Curto prazo Médio prazo Longo prazo
<b>REVERSIBILIDADE</b> (sem aplicação de medidas mitigadoras)	Reversível Irreversível
<b>MAGNITUDE</b> (grau de comprometimento da qualidade ambiental)	Alta Média Baixa

Fonte: BARBOSA (2004)

Depois de analisados os atributos e parâmetros descritos acima, foi elaborada a combinação dos atributos para a elaboração da escala de pesos. Para este tipo de combinação foram considerados os parâmetros mais importantes para a tomada de decisão. Tais parâmetros são:

- Reflexo sobre o ambiente: direto ou indireto;
- Abrangência do impacto: local ou regional;
- Reversibilidade: reversível ou irreversível;
- Magnitude: alta, média ou baixa.

Os pesos atribuídos a cada impacto foram distribuídos de acordo com a combinação dos atributos selecionados. Estes terão sua variação estabelecida de acordo com cada tipo de obra, ou seja, o que realmente vai determinar a escala de pesos e atributos são as variáveis ambientais dos sistemas físico, biótico e antrópico. Deste modo a tabela 7.14 apresenta os valores dos pesos.

**Tabela 7.14. - Escala de pesos atribuídos à combinação dos atributos**

Peso	Área de abrangência		Reflexo sobre o ambiente		Reversibilidade		Magnitude		
	Local	Regional	Direto	Indireto	Reversível	Irreversível	Baixa	Média	Alta
0 <sup>(*)</sup>	—	—	—	—	—	—	—	—	—
1									
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
11									
12									

(\*) O impacto descrito não ocorre em alguma das etapas de exploração de matéria prima, produção de material e montagem do módulo fotovoltaico.

Fonte: Barbosa (2005)

Depois de uma análise de cada um dos impactos, foram elaboradas as tabelas de 7.15A até 7.23B, e de posse dos pesos da tabela 7.14 basta inserir os impactos na matriz de acordo com suas fases de ocorrência, meio onde atua e de seus respectivos pesos. Como resultado foram implementadas as matrizes de impactos da produção de módulos PV para diversos países com pesos atribuídos em função da combinação de atributos mostradas nas tabelas de 7.24 a 7.27.

**Tabela 7.15A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações.**

Fase	Nº do impacto.	Meio onde atua	Identificação	Descrição	Área de abrangência	Reflexos sobre o ambiente	Reversibilidade
EXTRAÇÃO DE MATÉRIA PRIMA	1	Físico	Instalação/acirramento de processos erosivos e de movimentos de massa e as operações de desmate na área associados às obras de exploração de minério.	Retirada da camada superior do solo e cortes, aterros e exposição de solos ( associados ao desmate) nas áreas de obras, de infra-estrutura construtiva de apoio poderão induzir à instalação de processos erosivos e de instabilização de solo, ou mesmo ao acirramento de focos já existentes, constituindo fonte de sedimentos significativa para os corpos hídricos, com impactos sobre a qualidade de suas águas.	Local	Direto	Reversível
	2	Físico	Retirada das águas dos rios para abastecer as mineradoras	Uso da água dos rios próximos para utilização em diversas fases do processo de mineração e beneficiamento da matéria prima (limpeza e decantação de minério e rejeitos de mineração).	Regional	Direto	Reversível
	3	Físico	Disposição dos resíduos da mineradora	Armazenagem de rejeitos poluentes advindos do processo final de mineração e tratamento de material minerado (materiais cáusticos, resíduos de rocha etc).	Local	Direto	Irreversível
	4	Físico	Sólidos em suspensão no ar	Poeira em suspensão resultante dos trabalhos de implantação dos canteiros de obra , realização das obras de mineração e movimento de maquinário pertinente a mineração, trânsito de veículos, mobilização de entulho, podendo resultar em infecções respiratórias em trabalhadores e população local.	Local	Direto	Reversível

**Tabela 7.15B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações (continuação).**

Fase	Pesos e magnitudes atribuídos após a combinação dos atributos dos impactos analisados								
	nº do impacto	Magnitude / País				Pesos dos impactos / País			
		Magnitude Brasil	Magnitude Alemanha	Magnitude Japão	Magnitude EUA	Brasil	Alemanha	Japão	EUA
EXTRAÇÃO DE MATÉRIA PRIMA	1	Alta	Alta	Alta	Alta	3	3	3	3
	2	Média	Alta	Alta	Alta	5	6	6	6
	3	Alta	Alta	Alta	Alta	9	9	9	9
	4	Alta	Alta	Alta	Alta	3	3	3	3

**Tabela 7.16A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações.**

<b>Fase</b>	<b>Nº do impacto.</b>	<b>Meio onde atua</b>	<b>Identificação</b>	<b>Descrição</b>	<b>Área de abrangência</b>	<b>Reflexos sobre o ambiente</b>	<b>Reversibilidade</b>
<b>PRODUÇÃO DO MATERIAL</b>	<b>5</b>	Físico	Contaminação do solo	Contaminação provocada pela fuga de compostos como SiCl <sub>3</sub> , POCl <sub>3</sub> , HCl durante a produção das células.	Local	Direto	Reversível
<b>PRODUÇÃO DO MÓDULO</b>	<b>6</b>	Físico	Depleção dos recursos utilizados na produção das células de silício	Prata utilizada para a montagem das ligações entre as células é um recurso com um uso incompatível para uma ampla produção de módulos, podendo levar a uma escassez de recursos para este tipo de utilização.	Regional	Indireto	Reversível

Tabela 7.16B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações (continuação)

Fase	Pesos e magnitudes atribuídos após a combinação dos atributos dos impactos analisados								
	Magnitude / País					Pesos dos impactos / País			
	Nº. do impacto.	Magnitude Brasil	Magnitude Alemanha	Magnitude Japão	Magnitude EUA	Brasil	Alemanha	Japão	EUA
PRODUÇÃO DO MATERIAL	5	Média	Média	Média	Média	2	2	2	2
PRODUÇÃO DO MÓDULO	6	Média	Média	Média	Média	6	6	6	6

Tabela 7.17A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações.

Fase	Nº do impacto.	Meio onde atua	Identificação	Descrição	Área de abrangência	Reflexos sobre o ambiente	Reversibilidade
EXTRAÇÃO DE MATÉRIA PRIMA	7	Biológico	Perda da vegetação	Impacto provocado pelo desmate para extração de minério, com corte de árvores e vegetação herbácea, perda de germoplasma. Após esta intervenção é necessário trabalho de recuperação da área degradada.	Local	Direto	Reversível
	8	Biológico	Dispersão da fauna de vertebrados alados e terrestres	Dispersão da fauna, que se desloca para a área de entorno.	Local	Direto	Reversível
	9	Biológico	Contaminação de águas superficiais	Contaminação de lagos e rios com o descarte dos resíduos tóxicos de mineração.	Regional	Direto	Reversível

Tabela 7.17B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações (continuação)

Fase	Pesos e magnitudes atribuídos após a combinação dos atributos dos impactos analisados								
	Nº do impacto	Magnitude / País				Pesos dos impactos / País			
		Magnitude Brasil	Magnitude Alemanha	Magnitude Japão	Magnitude EUA	Brasil	Alemanha	Japão	EUA
EXTRAÇÃO DE MATÉRIA PRIMA	7	Alta	Alta	Alta	Alta	3	3	3	3
	8	Alta	Alta	Alta	Alta	3	3	3	3
	9	Alta	Alta	Alta	Alta	6	6	6	6

Tabela 7.18A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações.

Fase	Nº do impacto.	Meio onde atua	Identificação	Descrição	Área de abrangência	Reflexos sobre o ambiente	Reversibilidade
PRODUÇÃO DO MATERIAL	10	Biológico	Contaminação do solo por chumbo e ácido sulfúrico das baterias de chumbo-ácido	Contaminação do solo por resíduos de chumbo e ácido durante a armazenagem e manipulação do material utilizado na fabricação e montagem das baterias de chumbo-ácido.	Local	Direto	Irreversível
	11	Biológico	Lama vermelha do refino da alumina	Durante o processo de filtração são retirados o óxido de ferro insolúvel, titânio, sódio, sílica e outros óxidos. Este processo produz a chamada "Lama Vermelha", um material muito ácido que é descartado como rejeito. Com isto pode haver o comprometimento do lençol freático, córregos e elevar o teor de sódio dos poços artesianos vizinhos.	Regional	Direto	Reversível

Tabela 7.18B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações (continuação)

Fase	Pesos e magnitudes atribuídos após a combinação dos atributos dos impactos analisados								
	Magnitude / País					Pesos dos impactos / País			
	Nº do impacto.	Magnitude Brasil	Magnitude Alemanha	Magnitude Japão	Magnitude EUA	Brasil	Alemanha	Japão	EUA
PRODUÇÃO DO MATERIAL	10	Média	Média	Média	Média	8	8	8	8
	11	Média	Média	Média	Média	5	5	5	5

Tabela 7.19A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações

Fase	Nº do impacto.	Meio onde atua	Identificação	Descrição	Área de abrangência	Reflexos sobre o ambiente	Reversibilidade
PRODUÇÃO DO MATERIAL	12	Biológico	Emissão de grandes concentrações de fluoretos.	Durante o processo de fundição do alumínio emissões atmosféricas de grandes concentrações de fluoretos afetam os pastos, florestas e criações de gado próximos a refinaria. Este processo pode causar a fluorose dentária, esquelética ou sistêmica.	Regional	Direto	Reversível
	13	Biológico	Neblina e chuva ácida	Durante o processo eletrolítico (produção de alumínio) a emissão de poeira e partículas em suspensão ricas em SO <sub>2</sub> pode causar a chamada neblina ou chuva ácida, um gás que irrita o trato respiratório e é prejudicial as plantas.	Regional	Direto	Reversível

Tabela 7.19B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações (continuação)

Fase	Pesos e magnitudes atribuídos após a combinação dos atributos dos impactos analisados								
	Magnitude / País					Pesos dos impactos / País			
	Nº do impacto.	Magnitude Brasil	Magnitude Alemanha	Magnitude Japão	Magnitude EUA	Brasil	Alemanha	Japão	EUA
PRODUÇÃO DO MATERIAL	12	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	4	4	4	4
	13	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	4	4	4	4

Tabela 7.20A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações

Fase	Nº do impacto.	Meio onde atua	Identificação	Descrição	Área de abrangência	Reflexos sobre o ambiente	Reversibilidade
PRODUÇÃO DO MATERIAL	14	Biológico	Aumento do aquecimento global	A emissão de CO <sub>2</sub> e perfluorcarbonetos (PFC's) durante o processo de eletrólise colaboram para o chamado efeito estufa. Durante o chamado efeito anódico, quando o eletrólito se torna exaurido na alumina durante a fundição.	Regional	Direto	Reversível
	15	Biológico	Contaminação de aquíferos	Contaminação provocada pela fuga de compostos como SiCl <sub>3</sub> , POCl <sub>3</sub> , HCl durante a produção das células.	Regional	Direto	Reversível
	16	Biológico	Contaminação do solo pelas cubas eletrolíticas utilizadas na eletrólise..	Os revestimentos gastos das cubas eletrolíticas (feitas de aço) utilizadas na fundição do alumínio acabam contaminadas com fluoretos e cianetos. A disposição inadequada deste material pode causar a contaminação do solo e de lençóis freáticos ou rios onde estes despejos tóxicos são descartados.	Regional	Direto	Reversível

Tabela 7.20B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações (continuação)

Fase	Pesos e magnitudes atribuídos após a combinação dos atributos dos impactos analisados								
	Magnitude / País				Pesos dos impactos / País				
	Nº do impacto.	Magnitude Brasil	Magnitude Alemanha	Magnitude Japão	Magnitude EUA	Brasil	Alemanha	Japão	EUA
PRODUÇÃO DO MATERIAL	14	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	4	4	4	4
	15	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	4	4	4	4
	16	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	4	4	4	4

Tabela 7.21A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações.

Fase	Nº do impacto.	Meio onde atua	Identificação	Descrição	Área de abrangência	Reflexos sobre o ambiente	Reversibilidade
PRODUÇÃO DO MÓDULO	17	Biológico	Emissão indireta de CO <sub>2</sub>	Emissão indireta de CO <sub>2</sub> causada pelo gasto de energia necessária para a fabricação do módulo.	Regional	Indireto	Reversível
	18	Biológico	Emissão direta de CO <sub>2</sub>	Emissão direta, causada pela produção dos produtos utilizados na fabricação do módulo.	Regional	Direto	Reversível

Tabela 7.21B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações (continuação)

Fase	Pesos e magnitudes atribuídos após a combinação dos atributos dos impactos analisados								
	Magnitude / País					Pesos dos impactos / País			
	Nº do impacto.	Magnitude Brasil	Magnitude Alemanha	Magnitude Japão	Magnitude EUA	Brasil	Alemanha	Japão	EUA
PRODUÇÃO DO MÓDULO	17	Baixa	Média	Média	Alta	4	5	5	6
	18	Baixa	Média	Média	Alta	4	5	5	6

Tabela 7.22A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações.

Fase	Nº do impacto.	Meio onde atua	Identificação	Descrição	Área de abrangência	Reflexos sobre o ambiente	Reversibilidade
EXTRAÇÃO DE MATÉRIA-PRIMA	19	Antrópico	Desapropriação de terras e desalojamento de moradores locais.	Necessidade de relocação compulsória da população local para a implantação da área de mineração	Local	Direto	Irreversível
	20	Antrópico	Insegurança e ansiedade da população local	Informações insuficientes e/ou inadequadas, por vezes, extemporâneas, em virtude de indecisões referentes à construção do empreendimento, comuns à etapa que antecede a definição quanto à viabilidade de sua implantação; realização de trabalhos de campo preliminares, sem comunicação prévia e sem treinamento do pessoal; receio de perdas, prejuízos, transtornos.	Local	Direto	Reversível
	21	Antrópico	Retirada das condições de sobrevivência dos moradores próximos as áreas de mineração e refino de material.	Com a construção e implantação da mineradora a área utilizada pela mesma pode comprometer a capacidade de sobrevivência dos moradores locais que anteriormente utilizavam esta mesma área como fonte de renda (uso do local como área de caça, pesca ou para plantio).	Local	Direto	Reversível

Tabela 7.22B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações (continuação).

Fase	Pesos e magnitudes atribuídos após a combinação dos atributos dos impactos analisados								
	Magnitude / País				Pesos dos impactos / País				
	Nº do impacto	Magnitude Brasil	Magnitude Alemanha	Magnitude Japão	Magnitude EUA	Brasil	Alemanha	Japão	EUA
EXTRAÇÃO DE MATÉRIA-PRIMA	19	Alta	Alta	Alta	Alta	9	9	9	9
	20	Baixa	Baixa	Baixa	Baixa	1	1	1	1
	21	Média	Média	Média	Média	2	2	2	2

Tabela 7.23A – Impactos analisados para montagem da matriz de interações

Fase	Nº do impacto.	Meio onde atua	Identificação	Descrição	Área de abrangência	Reflexos sobre o ambiente	Reversibilidade
EXTRAÇÃO DE MATÉRIA-PRIMA	22	Antrópico	Sensibilidade química múltipla	Processo que afeta os trabalhadores e moradores do entorno das refinarias e é causado pelos resíduos secos espalhados pelo ar durante o processo de refino da alumina. Estas partículas e gases aerossóis cáusticos e gases ácidos alcançam as residências e quintais próximos às refinarias de alumínio, principalmente em períodos de seca.	Regional	Direto	Reversível
	23	Antrópico	Saturnismo	Intoxicação crônica ou aguda do organismo pelo chumbo metálico, seus compostos orgânicos e inorgânicos.	Local	Direto	Reversível
	24	Antrópico	Contaminação por $\text{SiCl}_3$	Substância moderadamente tóxica após inalada ou ingerida.	Local	Direto	Reversível
	25	Antrópico	Contaminação por $\text{POCl}_3$	Substância moderadamente tóxica depois de inalada ou ingerida.	Local	Direto	Reversível
	26	Antrópico	Ferimentos causados por HCl	Substância corrosiva.	Local	Direto	Irreversível
	27	Antrópico	Contaminação por óxido de chumbo	Contaminação por óxido de chumbo graças a emissão de vapores de chumbo durante a fundição do chumbo.	Local	Direto	Irreversível

Tabela 7.23B – Impactos analisados para montagem da matriz de interações

Fase	Pesos e magnitudes atribuídos após a combinação dos atributos dos impactos analisados								
	Magnitude / País				Pesos dos impactos / País				
	Nº do impacto.	Magnitude Brasil	Magnitude Alemanha	Magnitude Japão	Magnitude EUA	Brasil	Alemanha	Japão	EUA
PRODUÇÃO DO MATERIAL	22	Média	Média	Média	Média	5	5	5	5
	23	Média	Média	Média	Média	2	2	2	2
	24	Média	Média	Média	Média	2	2	2	2
	25	Média	Média	Média	Média	2	2	2	2
	26	Alta	Alta	Alta	Alta	9	9	9	9
	27	Alta	Alta	Alta	Alta	9	9	9	9

Tabela 7.24 – Matriz de impactos da produção do módulo para o Brasil.

		NIA / %	FASES IMPACTOS AMBIENTAIS	PRODUÇÃO DOS MÓDULOS NO BRASIL											UIA	%	
				EXTRAÇÃO DE MATERIA PRIMA				PRODUÇÃO DO MATERIAL				MONTAGEM DO MÓDULO					
				ALUMÍNIO	VIDRO	SILÍCIO	BATERIA	ALUMÍNIO	VIDRO	SILÍCIO	BATERIA	ALUMÍNIO	VIDRO	SILÍCIO			BATERIA
MEIOS	FÍSICO	6 / 22,23	1	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68	32,38
			2	5	5	5	0	0	0	0	0	0	0	0			
			3	9	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0			
			4	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0			
			5	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0			
			6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6			
		Avaliação qualitativa das unidades de impacto	20	20	20	0	0	0	2	0	0	0	6	0			
	BIOLÓGICO	12 / 44,44	7	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	101	48,10	
			8	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0			
			9	6	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0			
			10	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0			
			11	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0			
			12	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0			
			13	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0			
			14	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0			
			15	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0			
		16	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0				
		17	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4			
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	4	4				
	Avaliação qualitativa das unidades de impacto	12	12	12	0	21	0	4	8	8	8	8	8				
	ANTRÓPICO	9 / 33,33	19	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	19,52	
			20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
			21	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
			22	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0			
			23	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0			
			24	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0			
			25	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0			
26			0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0				
27		0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0					
Avaliação qualitativa das unidades de impacto	12	0	0	0	5	0	13	11	0	0	0	0					
Totais parciais 1	44	32	32	0	26	0	19	19	8	8	14	8					
Totais parciais 2	108				64				38								
TOTAL DE UNIDADES DE IMPACTO					210												
REPRESENTATIVIDADE / REDUÇÃO (%)	51,43				30,48				18,10						100		

NIA - NÚMERO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

UIA - UNIDADES DE IMPACTOS AMBIENTAIS

Tabela 7.25 – Matriz de impactos da produção do módulo para a Alemanha.

		NIA / %	FASES IMPACTOS AMBIENTAIS	PRODUÇÃO DOS MÓDULOS NA ALEMANHA												UIA	%
				EXTRAÇÃO				PRODUÇÃO DO MATERIAL				MONTAGEM DO MÓDULO					
				ALUMÍNIO	VIDRO	SILÍCIO	BATERIA	ALUMÍNIO	VIDRO	SILÍCIO	BATERIA	ALUMÍNIO	VIDRO	SILÍCIO	BATERIA		
MEIOS	FÍSICO	6 / 22,23	1	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	71	32,13	
			2	6	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0			
			3	9	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0			
			4	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0			
			5	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0			
			6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6			
			Avaliação qualitativa das unidades de impacto	21	21	21	0	0	0	2	0	0	0	6			0
			63				2				6						
	BIOLÓGICO	12 / 44,44	7	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	109	49,32	
			8	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0			
			9	6	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0			
			10	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0			
			11	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0			
			12	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0			
			13	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0			
			14	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0			
			15	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0			
			16	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0			
			17	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	5			
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	5					
	Avaliação qualitativa das unidades de impacto	12	12	12	0	21	0	4	8	10	10	10	10				
			36				33				40						
	ANTROPÓICO	9 / 33,33	19	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	18,55	
			20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
			21	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
			22	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0			
			23	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0			
24			0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0				
25			0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0				
26			0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0				
27			0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0				
Avaliação qualitativa das unidades de impacto	12	0	0	0	5	0	13	11	0	0	0	0					
		12				29				0							
Totais parciais 1				45	33	33	0	26	0	19	19	10	10	16	10		
Totais parciais 2				111				64				46					
TOTAL DE UNIDADES DE IMPACTO				221													
REPRESENTATIVIDADE / REDUÇÃO (%)				50,23				28,96				20,81				100	

NIA - NÚMERO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

UIA - UNIDADES DE IMPACTOS AMBIENTAIS

Tabela 7.26 – Matriz de impactos da produção do módulo para o Japão.

	NIA / %	FASES	PRODUÇÃO DOS MÓDULOS NO JAPÃO												UIA	%	
			IMPACTOS	EXTRAÇÃO				PRODUÇÃO DO MATERIAL				MONTAGEM DO MÓDULO					
				ALUMÍNIO	VIDRO	SILÍCIO	BATERIA	ALUMÍNIO	VIDRO	SILÍCIO	BATERIA	ALUMÍNIO	VIDRO	SILÍCIO			BATERIA
MEIOS	FÍSICO	6 / 22,23	1	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	71	32,13
			2	6	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0			
			3	9	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0			
			4	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0			
			5	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0			
			6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6			
	Avaliação qualitativa das unidades de impacto			21	21	21	0	0	0	2	0	0	0	0	6	0	
				63				2				6					
	BIOLÓGICO	12 / 44,44	7	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	109	49,32
			8	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0			
			9	6	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0			
			10	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0			
			11	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0			
			12	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0			
			13	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0			
			14	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0			
			15	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0			
			16	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0			
			17	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	5	5		
			18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	5		
Avaliação qualitativa das unidades de impacto			12	12	12	0	21	0	4	8	10	10	10	10			
			36				33				40						
ANTROPÓICO	9 / 33,33	19	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	18,55	
		20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
		21	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
		22	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0				
		23	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0				
		24	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0				
		25	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0				
		26	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0				
		27	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0				
		Avaliação qualitativa das unidades de impacto			12	0	0	0	5	0	13	11	0	0			0
			12				29				0						
Totais parciais 1			45	33	33	0	26	0	19	19	10	10	16	10			
Totais parciais 2			111				64				46						
TOTAL DE UNIDADES DE IMPACTO			221														
REPRESENTATIVIDADE / REDUÇÃO (%)			50,23				28,96				20,81				100		

NIA - NÚMERO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

UIA - UNIDADES DE IMPACTOS AMBIENTAIS

Tabela 7.27 – Matriz de impactos da produção do módulo para os EUA

	NIA / %	FASES	PRODUÇÃO DOS MÓDULOS NOS EUA												UIA	%	
			IMPACTOS	EXTRAÇÃO				PRODUÇÃO DO MATERIAL				MONTAGEM DO MÓDULO					
				ALUMÍNIO	VIDRO	SILÍCIO	BATERIA	ALUMÍNIO	VIDRO	SILÍCIO	BATERIA	ALUMÍNIO	VIDRO	SILÍCIO			BATERIA
MEIOS	6 / 22,23	FÍSICO	1	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	71	31,00
		2	6	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
		3	9	9	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
		4	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
		5	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0			
		6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0			
	Avaliação qualitativa das unidades de impacto			21	21	21	0	0	0	2	0	0	0	6	0		
				63				2				6					
	12 / 44,44	BIOLÓGICO	7	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	117	51,09
			8	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
			9	6	6	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
			10	0	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0		
			11	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0		
			12	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0		
			13	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0		
			14	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0		
			15	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0		
			16	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0		
			17	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6		
	18	0	0	0	0	0	0	0	0	6	6	6	6				
	Avaliação qualitativa das unidades de impacto			12	12	12	0	21	0	4	8	12	12	12	12		
				36				33				48					
	9 / 33,33	ANTROPÓICO	19	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	41	17,90
			20	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
			21	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
			22	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0		
			23	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0		
24			0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0			
25			0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0			
26			0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0	0			
27	0	0	0	0	0	0	0	9	0	0	0	0					
Avaliação qualitativa das unidades de impacto			12	0	0	0	5	0	13	11	0	0	0	0			
			12				29				0						
Totais parciais 1			45	33	33	0	26	0	19	19	12	12	18	12			
Totais parciais 2			111				64				54						
TOTAL DE UNIDADES DE IMPACTO			229														
REPRESENTATIVIDADE / REDUÇÃO (%)			48,47				27,95				23,58				100		

NIA - NÚMERO DE IMPACTOS AMBIENTAIS

UIA - UNIDADES DE IMPACTOS AMBIENTAIS

De posse destes dados é possível a realização de uma análise do passivo provocado pela fabricação do módulo fotovoltaico frente a sua capacidade em amortizar os impactos gerados. Esta análise está apresentada no capítulo 8.

## CAPÍTULO 8 – ANÁLISE DOS RESULTADOS

### 8.1 Equilíbrio Energético

Considerando os questionamentos feitos até agora e de posse dos dados levantados e calculados nos capítulos anteriores, pode-se realizar um levantamento da capacidade do módulo fotovoltaico em amortizar seus gastos energéticos de produção com relação à energia por ele produzida ao longo de todo o tempo de vida ambientalmente útil - TVAÚ. A tabela 8.1, exibe um resumo dos dados obtidos para o cálculo de amortização energética do módulo analisado, de acordo com os cálculos e tabelas exibidos ao longo dos capítulos 5 e 7, considerando 25 anos como o tempo de vida do módulo PV.

**Tabela 8.1 – Resumo de dados sobre a amortização energética (EPBT.)**

<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>
Energia produzida pelo módulo durante 25 anos (kWh)	4051,5
Energia produzida pelo módulo durante 1 ano (kWh)	162,06
Energia necessária para a fabricação do módulo (kWh)	1373,72
Tempo de amortização energética do módulo PV – EPBT (anos)	8,48
Tempo de vida ambiental útil - TVAÚ (anos) (*)	16,52
(*) – O TVAÚ foi calculado considerando-se o tempo de vida do módulo PV como sendo de 25 anos.	

Fonte: Elaboração própria

Os dados apresentados na tabela 8.1 mostram que é possível amortizar os gastos energéticos de fabricação do módulo PV. De acordo com o que foi calculado nos capítulos 5 e 7 o módulo produz em 25 anos 4105,5 kWh de energia e necessita de 873,68 kWh para amortizar a energia gasta na fabricação. Considerando que a cada ano o módulo PV gera 162,06 kWh de energia serão necessários 8,48 anos da vida útil do módulo PV, para amortizar seus gastos energéticos. Se o módulo PV tem vida útil de 25 anos e preciso de 8,48 anos para amortizar estes gastos energéticos ainda restam 16,52 anos de vida útil para o módulo

## 8.2 Capacidade de Amortização das Emissões de CO<sub>2</sub>

Outro fator que deve ser analisado é a capacidade de amortização das emissões de CO<sub>2</sub>, tanto da fabricação do módulo quanto da produção da energia utilizada no processo de fabricação, dentro do tempo de vida útil do mesmo. A capacidade de amortização diz respeito a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida pelo processo de fabricação do módulo.

Para avaliar a capacidade do módulo em amortizar a emissão de CO<sub>2</sub> de sua fabricação e também a sua capacidade em mitigar a emissão de CO<sub>2</sub> durante sua vida útil, ou seja evitar que uma determinada quantidade de CO<sub>2</sub> seja lançado na atmosfera graças a geração de eletricidade dentro da matriz energética de um país, foram levantados os dados relativos à sua fabricação e operação em 4 países (Brasil, Alemanha, EUA e Japão), que são mostrados no capítulo 7. Em um dos cenários abordados, considera-se o Brasil como importador de módulos PV. Neste caso serão considerados dois casos, o Brasil atendido pelo sistema interligado – Brasil<sub>SINT</sub>, região sul, sudeste, nordeste e centro oeste, e o Brasil atendido pelo sistema isolado - Brasil<sub>SISO</sub>, Região Norte. Esses dados estão apresentados na tabela 8.2 e nas figuras 8.1 a 8.20

**Tabela 8.2 – Total de emissões de CO<sub>2</sub> para a fabricação do módulo de acordo com a matriz energética de cada país**

<b>País</b>	<b>[kg eq - CO<sub>2</sub>]</b>
Brasil <sub>SINT</sub> .	215,362
Japão	744,242
Alemanha	869,250
EUA	1106,903
Brasil <sub>SISO</sub> .	1269,002

De acordo com os dados obtidos para cada matriz energética, é possível analisar a capacidade de amortização de CO<sub>2</sub> do módulo de acordo com o país de origem, onde ele é fabricado, e o país de destino onde ele será utilizado. As figuras de 8.1 a 8.5 mostram as possibilidades de amortização de acordo com o local de fabricação/operação do módulo. Os valores de emissão resultantes significam a quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> que vai ser evitada com utilização do módulo durante sua vida útil.

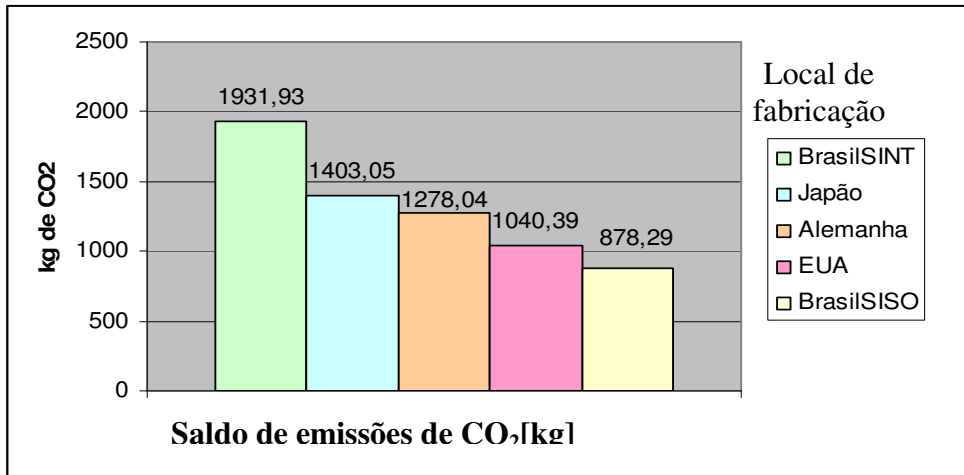


Figura 8.1 – Quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> evitadas por um módulo PV operando na Alemanha.

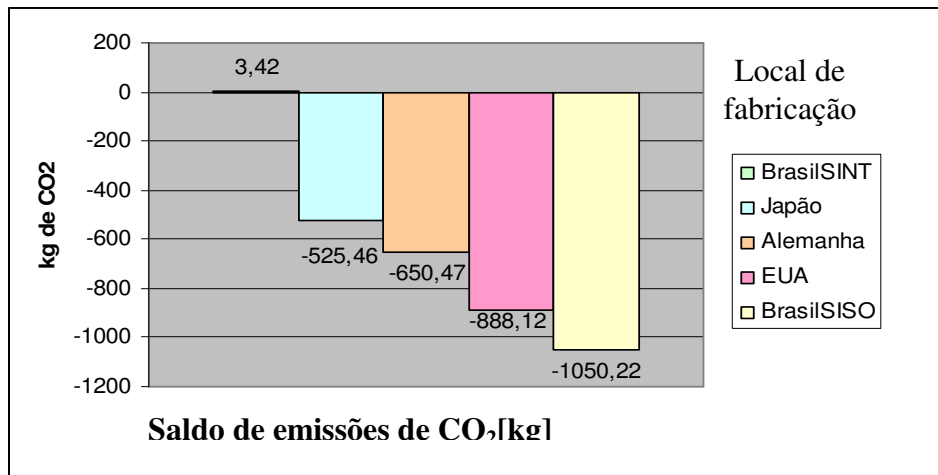


Figura 8.2 – Quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> evitadas por um módulo PV operando no Brasil<sub>SINT</sub>

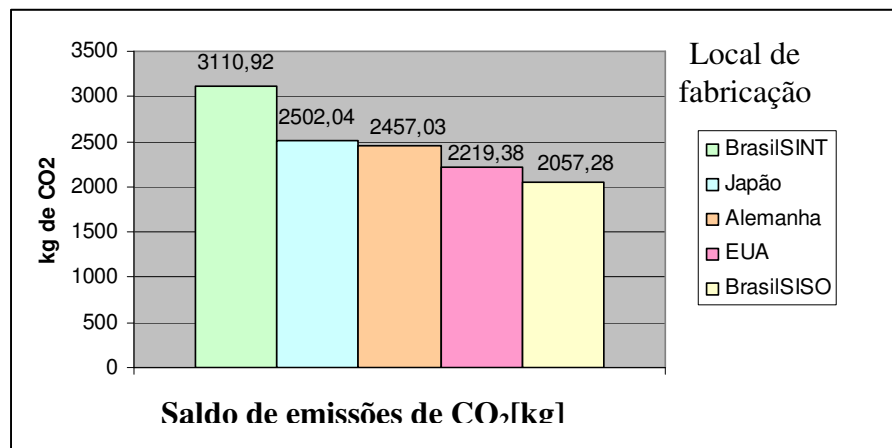


Figura 8.3 – Quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> evitadas por um módulo PV operando no Brasil<sub>SISO</sub>

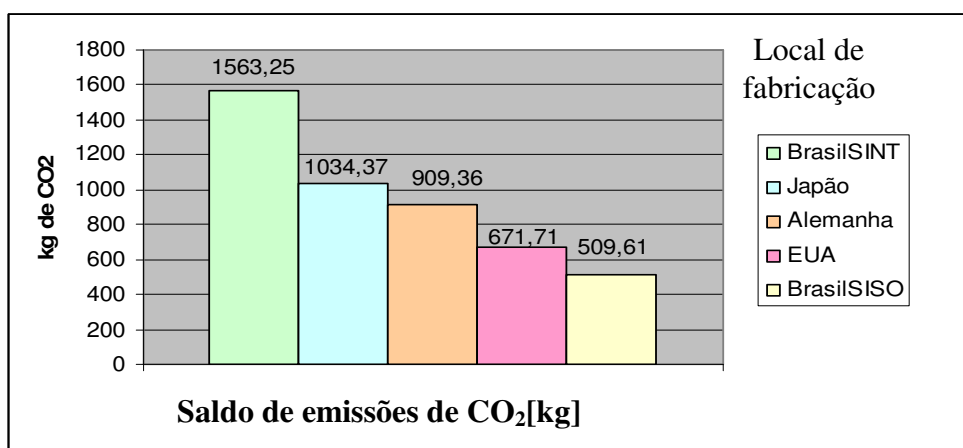


Figura 8.4 – Quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> evitadas por um módulo PV operando no Japão.

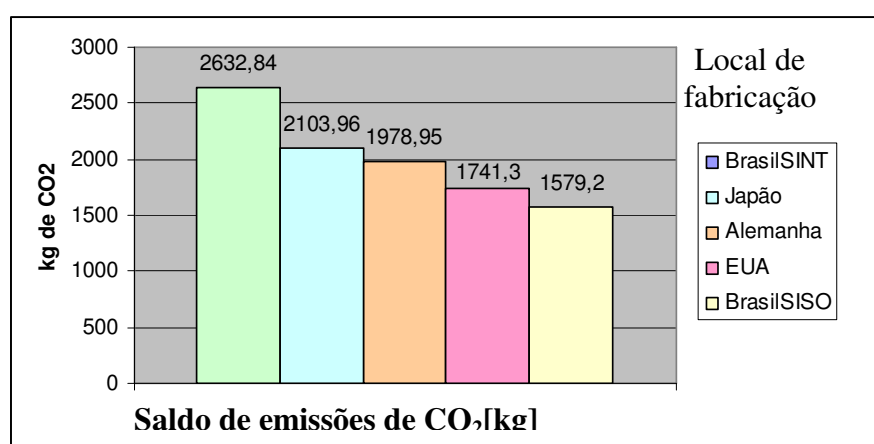


Figura 8.5– Quantidade de emissões de CO<sub>2</sub> evitadas por um módulo PV operando nos EUA.

As figuras de 8.1 a 8.5 mostram que a aplicação dos módulos fotovoltaicos fabricados no Japão, Alemanha, EUA e Brasil<sub>SISO</sub> operando no sistema interligado brasileiro é ambientalmente deficitário, uma vez que, independente do país de origem, o saldo de emissões de CO<sub>2</sub> equivalente é negativo, com exceção do módulo fabricado no Brasil<sub>SINT</sub> (figura 8.2) e que opera também no Brasil<sub>SINT</sub> gerando um pequeno ganho ambiental com um saldo positivo de CO<sub>2</sub> evitado.

Entretanto, se um painel fabricado em um país com uma matriz energética, menos poluente que a do sistema isolado brasileiro, for colocado a operar no sistema isolado brasileiro, ou seja, na região amazônica, ele torna-se muito atraente, em face aos ganhos ambientais. Ressalta-se que em todos os gráficos analisados anteriormente, os valores mais expressivos de saldo de emissão de CO<sub>2</sub> foram encontrados com a utilização de painéis fabricados no sistema interligado brasileiro e colocados a operar nos demais locais analisados.

Se o painel for fabricado em um país com uma matriz mais fóssil dependente e posto para operar em um país com matriz energética mais limpa, será necessário um tempo maior de funcionamento do painel para que ele possa amortizar as emissões e gastos energéticos necessários para a sua fabricação, podendo ocorrer que este tempo seja superior ao de sua vida útil, o que torna o procedimento inviável. No caso de ser fabricado em um país com uma matriz energética menos poluente e posto para operar em um país com uma matriz energética mais poluente este tempo tende a diminuir conforme o fator de emissão de CO<sub>2</sub> deste país aumentar. Esta afirmação é confirmada com a análise dos gráficos das figuras 8.6 a 8.10.

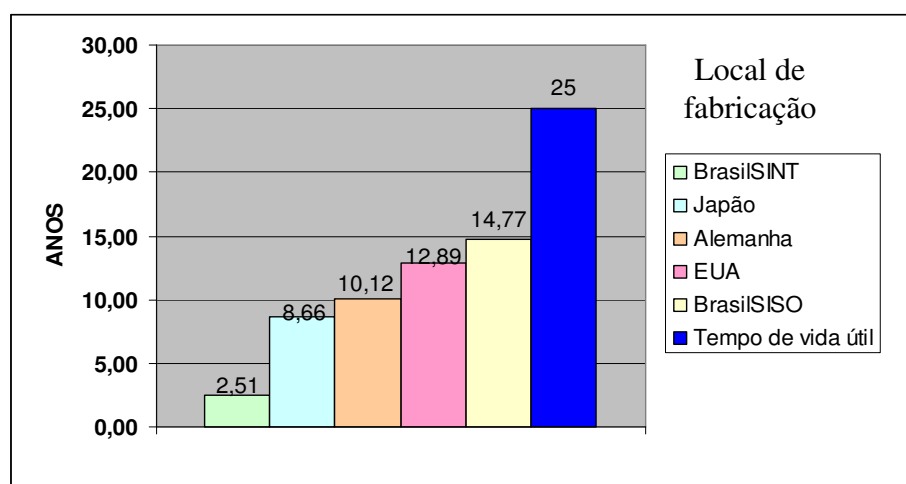


Figura 8.6 – Tempo de amortização de CO<sub>2</sub> para um módulo PV operando na Alemanha.

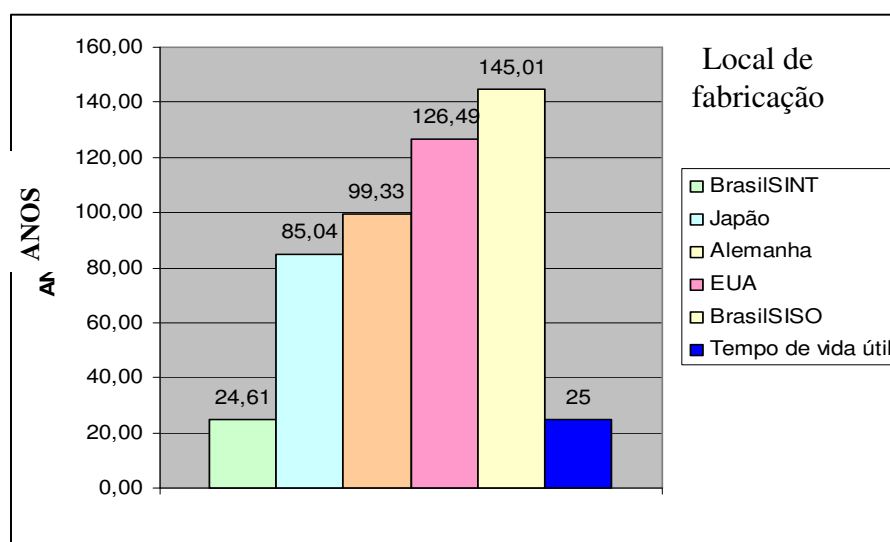


Figura 8.7 – Tempo de amortização de CO<sub>2</sub> para um módulo PV operando no Brasil<sub>SINT</sub>.

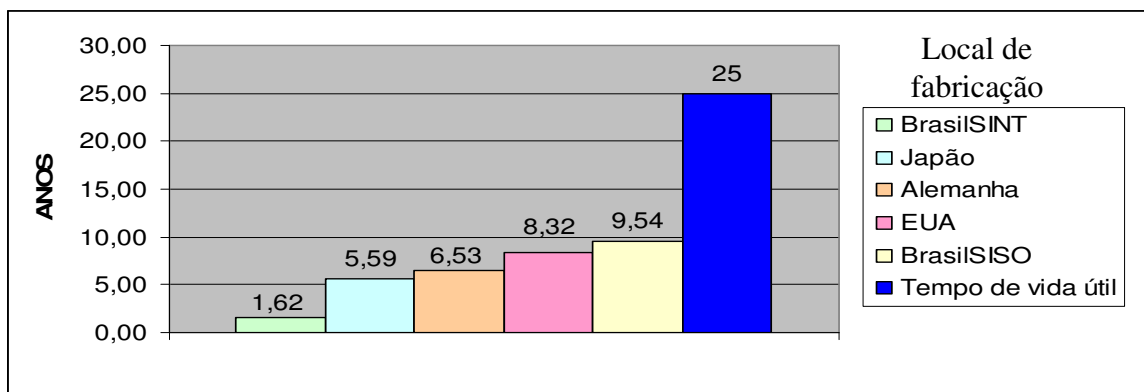


Figura 8.8 – Tempo de amortização de CO<sub>2</sub> para um módulo PV operando no BrasilSISO.

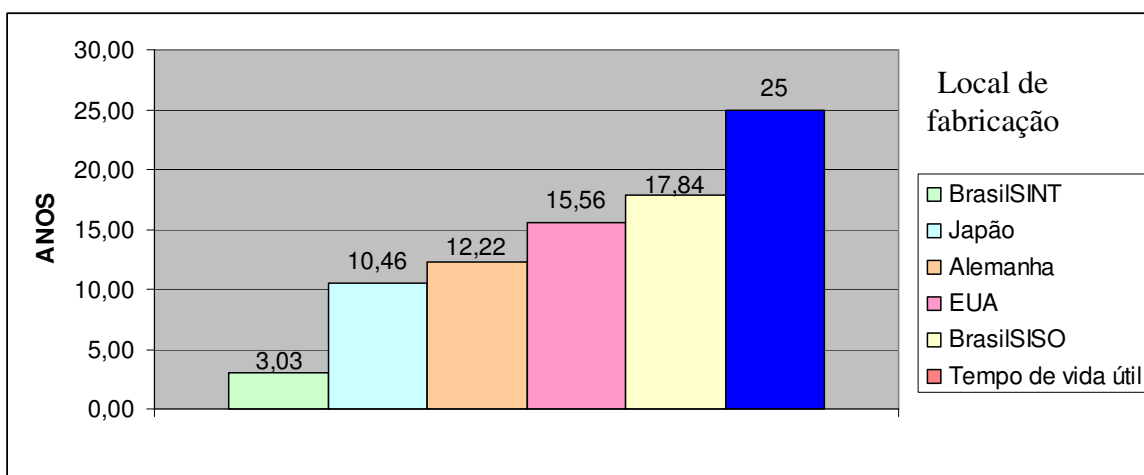


Figura 8.9 – Tempo de amortização de CO<sub>2</sub> para um módulo PV operando no Japão

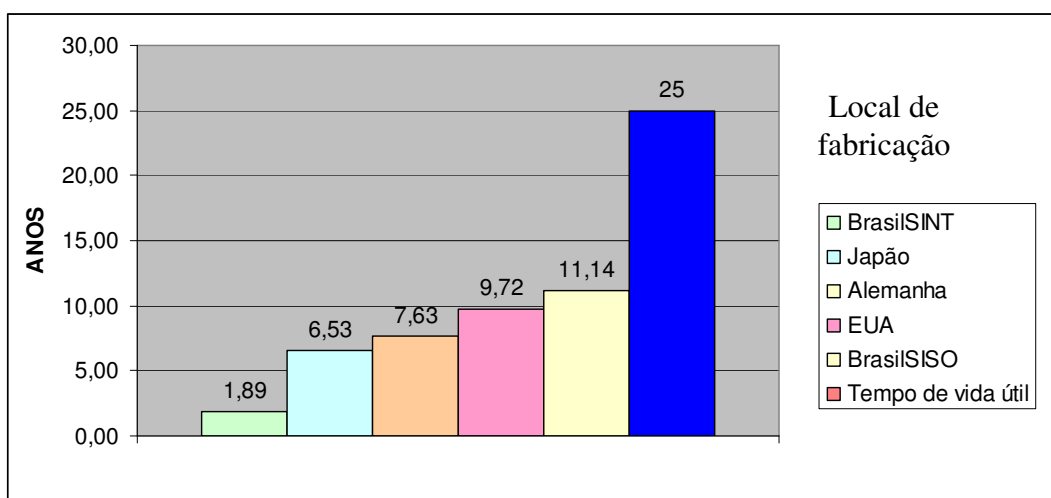


Figura 8.10– Tempo de amortização de CO<sub>2</sub> para um módulo PV operando nos EUA.

Observando-se as figuras de 8.6 a 8.10 é possível verificar que no caso do Brasil, se os painéis forem fabricados no exterior, em um país com uma matriz energética mais poluente, o módulo irá precisar de um tempo de vida útil muito superior a 25 anos (figura 8.7), o que torna deficitária a utilização deste tipo de sistema para amortização de CO<sub>2</sub> ou de qualquer outro tipo de amortização já que não resta tempo de vida ambiental útil para ser utilizado pelo painel. Caso o inverso ocorra, ou seja, o módulo fabricado no Brasil<sub>SINT</sub> seja utilizado nos demais países há uma queda acentuada no tempo de amortização. Deste modo o tempo de amortização tende a diminuir conforme o FE do país de operação do módulo tende a aumentar. Deve ser verificado ainda se o módulo é capaz de amortizar o conjunto gasto energético e emissões de CO<sub>2</sub> e se após este equilíbrio ainda resta vida útil ao módulo para auxiliar na mitigação de CO<sub>2</sub>. Para isto, as figuras 8.11 a 8.15 consideram o tempo de amortização do consumo de energia e das emissões do CO<sub>2</sub> emitido durante seu processo de produção. Os dados utilizados para elaboração das figuras 8.11 a 8.15 foram obtidos no item 7.2.

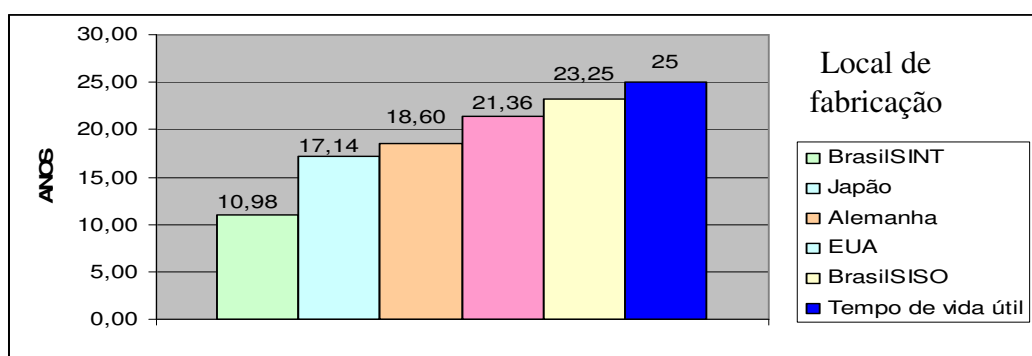


Figura 8.11 – Período de amortização de energia e emissões de CO<sub>2</sub> do módulo PV operando na Alemanha.

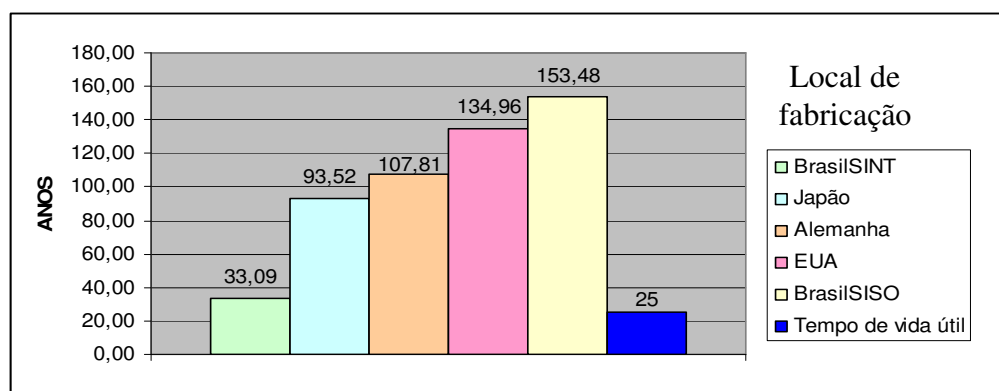


Figura 8.12 – Período de amortização de energia e emissões de CO<sub>2</sub> do módulo PV operando no Brasil<sub>SINT</sub>.

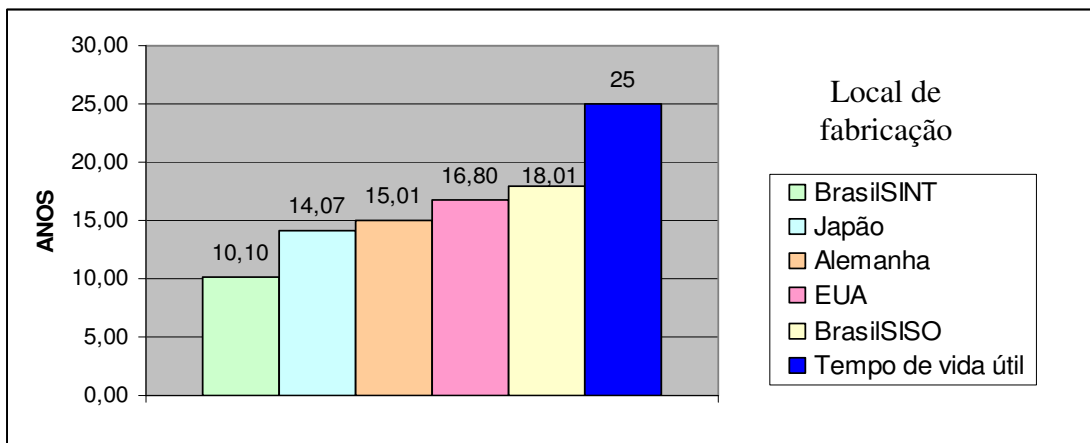


Figura 8.13– Período de amortização de energia e emissões de CO<sub>2</sub> do módulo PV operando no Brasil<sub>SISO</sub>.

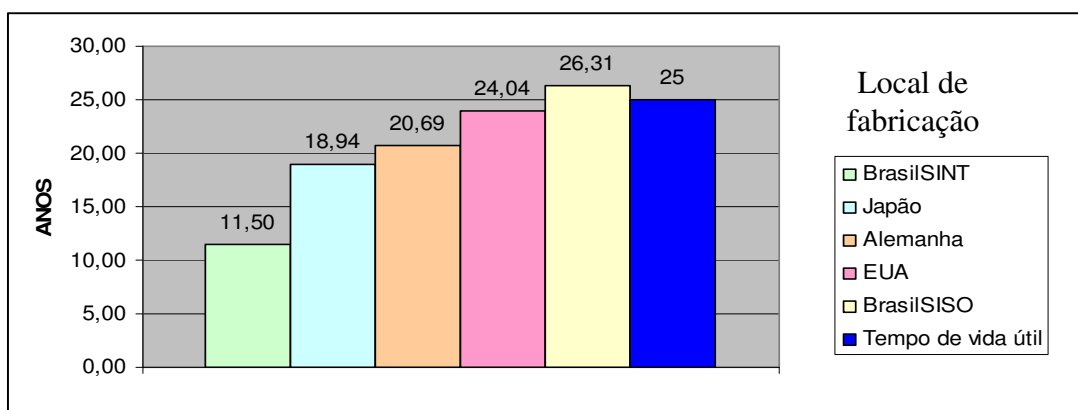


Figura 8.14- Período de amortização de energia e emissões de CO<sub>2</sub> do módulo PV operando no Japão.

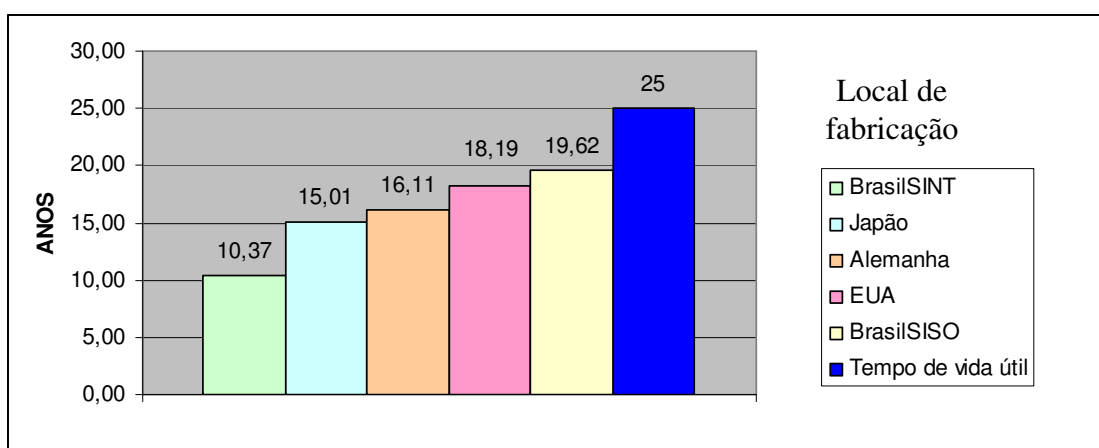
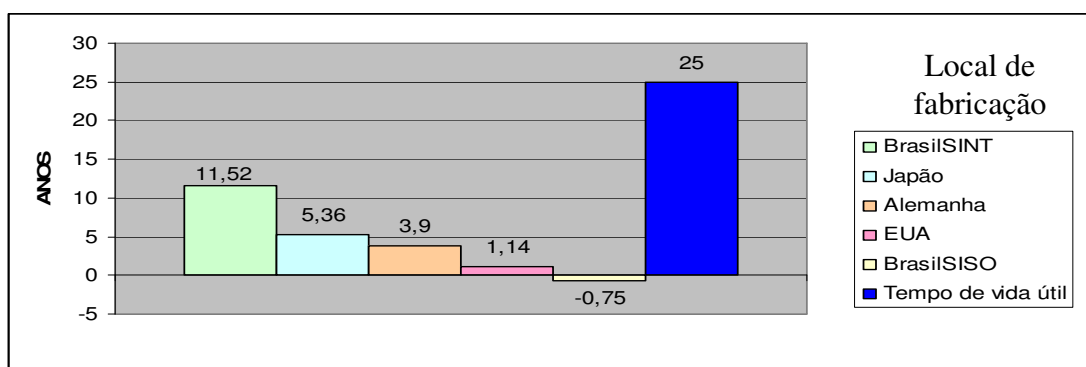


Figura 8.15 – Período de amortização de energia e emissões de CO<sub>2</sub> do módulo PV operando nos EUA.

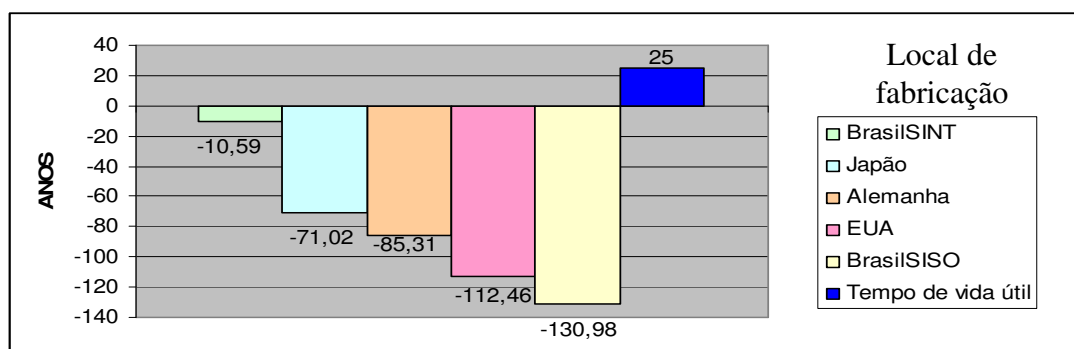
Analisando as figuras de 8.11 a 8.15 pode ser observado que produzir o painel no Brasil sistema interligado e utilizá-lo em outros países oferece a melhor relação ambiental de custo / benefício, principalmente se for utilizado em um país com uma matriz energética mais poluente do que a do Brasil. Em todas as situações citadas, para o módulo produzido no Brasil sistema interligado o tempo tende a diminuir conforme a matriz do país, onde for instalado o módulo, for mais fóssil dependente que a do Brasil.

Porém, considerando o oposto, ou seja, utilizar no Brasil sistema interligado os painéis produzidos pelos outros países (figura 8.12), se mostra ambientalmente deficitário, já que o tempo necessário para amortizar os gastos analisados resulta superior aos 25 anos de vida útil do módulo. Para melhor entendimento, as figuras de 8.16 a 8.20, mostram os resultados de acordo com o tempo de vida ambientalmente útil do módulo (tempo de amortização do custo energético e de emissões de CO<sub>2</sub> da produção subtraído do tempo de vida útil do módulo) para os casos analisados. Considera-se que um valor de tempo de vida ambientalmente útil negativo, demonstra que o módulo após sua vida útil de 25 anos, deveria ainda funcionar durante uma quantidade de anos equivalente ao valor negativo encontrado para alcançar o equilíbrio energético e de mitigação de emissões de CO<sub>2</sub> advindos do processo de sua fabricação.



Figura

8.16 – Período de vida ambientalmente útil do módulo PV operando na Alemanha.



Figura

8.17 – Período de vida ambientalmente útil do módulo PV operando no Brasil<sub>SINT</sub>.

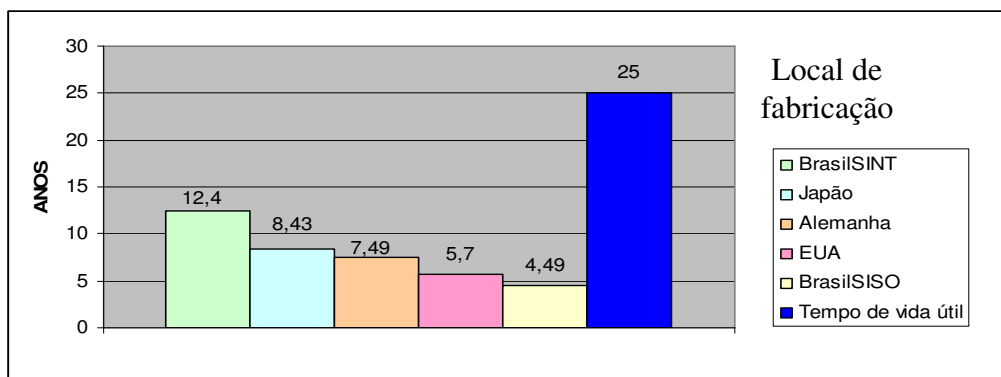
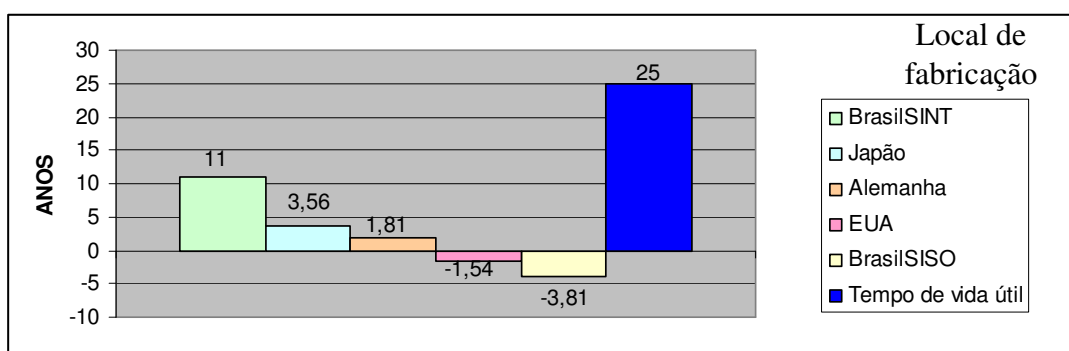
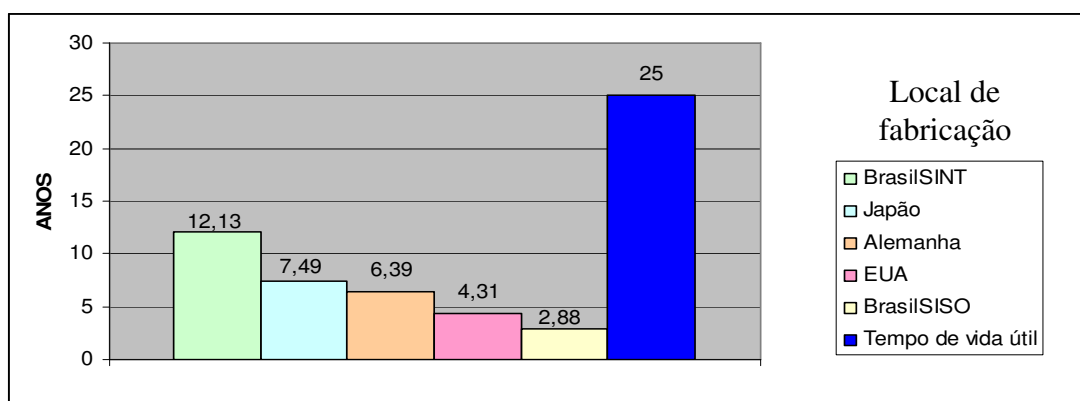


Figura 8.18 – Período de vida ambientalmente útil do módulo PV operando no Brasil<sub>SISO</sub>.



Figura

8.19 – Período de vida ambientalmente útil do módulo PV operando no Japão



Figura

8.20 - Período de vida ambientalmente útil do módulo PV operando nos EUA.

Analisando as figuras 8.16, 8.18, 8.19 e 8.20, verifica-se a vantagem nítida de vida ambientalmente útil do painel quando o mesmo é fabricado no Brasil Sistema Interligado e utilizado nos demais países e no Brasil sistema isolado. A inviabilidade de utilização do painel fica mais uma vez evidenciada pela figura 8.17. No próximo item será realizada a análise da

capacidade de amortização dos módulos com relação ao passivo ambiental gerado por ele quando de sua produção.

### **8.3 Capacidade de Amortização do Passivo Ambiental**

Com o auxílio dos dados levantados e da matriz de impactos montada ao longo do item 7.3, é possível estimar a capacidade do módulo em mitigar o passivo ambiental produzido pela fabricação do módulo fotovoltaico estudado.

Para a análise da capacidade de amortização do passivo ambiental gerado, algumas considerações cabem dentro do escopo deste estudo:

1. A análise realizada tem como base um levantamento simplificado dos dados relativos aos impactos referentes à cadeia produtiva do módulo PV, sendo considerados os dados de literatura encontrados na bibliografia abordada e não um Estudo de Impactos Ambientais – EIA, completo.
2. Para os impactos levantados, foi considerado que todos ocorrem durante o processo de produção do módulo para os países abordados.
3. O tipo de tecnologia e processo utilizado em cada uma das fases analisadas também é considerado o mesmo para os países analisados.
4. A matriz de impactos utilizada tem como base a matriz desenvolvida por BARBOSA (2004), na qual foram realizadas as modificações condizentes com as necessidades deste estudo, criando assim uma variação da citada matriz.
5. Os valores de gasto energético da cadeia produtiva do módulo foram concentrados na fase de montagem do módulo para uma melhor distribuição dos pesos na matriz de impactos elaborada, o que não altera o resultado final da análise realizada.

A matriz de impactos tem como base as unidades de representatividade quantitativa e qualitativa dos impactos analisados. A representatividade quantitativa diz respeito ao número de impactos analisados. Neste contexto foram analisados 27 impactos distribuídos entre os

meios físico, biológico e antrópico. Foram contabilizados 6 tipos de impactos atuando sobre o meio físico, 12 sobre o meio biológico e 9 sobre o meio antrópico.

A representatividade qualitativa revela que peso um determinado grupo ou tipo de impacto tem dentro da fase analisada, de acordo com o número de Unidades de Impacto Ambiental - UIA encontrados. Com base nos dados levantados pela matriz de impactos e conforme os dados da representatividade qualitativa dos impactos abordados foi elaborada a tabela 8.3.

**Tabela 8.3 – Representatividade qualitativa dos impactos em cada fase por país.**

<b>Meio</b>	<b>País</b>	<b>Extração de Matéria-prima</b>	<b>Produção de Material</b>	<b>Montagem do módulo</b>
<b>Biológico</b>	<b>Brasil</b>	36	33	32
	<b>Alemanha</b>	36	33	40
	<b>Japão</b>	36	33	40
	<b>EUA</b>	36	33	48
<b>Físico</b>	<b>Brasil</b>	60	2	6
	<b>Alemanha</b>	63	2	6
	<b>Japão</b>	63	2	6
	<b>EUA</b>	63	2	6
<b>Antrópico</b>	<b>Brasil</b>	12	29	0
	<b>Alemanha</b>	12	29	0
	<b>Japão</b>	12	29	0
	<b>EUA</b>	12	29	0

Observando os valores da tabela pode-se verificar que, embora haja uma representatividade quantitativa menor, os impactos no meio físico respondem por uma representatividade qualitativa maior na fase de extração de matéria prima. Nesta fase, considerando o meio físico, o Brasil possui uma representatividade qualitativa menor do que a dos demais devido ao impacto de número 2 (tabela 7.15A - retirada da água dos rios para abastecimento das mineradoras), justificado pela maior quantidade de recursos hídricos do Brasil frente aos demais países.

Com relação à fase de produção de material, a representatividade qualitativa dos impactos do meio biológico, 33 unidades de impacto ambiental, supera a do meio antrópico, 29 unidades de impacto ambiental, e a do meio físico que é bastante reduzida, 2 unidades de

impacto ambiental,. Tomando-se como referencia o total de UIA de cada meio por país tem-se a tabela 8.4.

**Tabela 8.4 – Total de Unidades de Impacto Ambiental – UIA por meio e por país**

	Unidades de Impacto Ambiental		
	Antrópico	Físico	Biológico
<b>Brasil</b>	41	68	101
<b>Alemanha</b>	41	71	109
<b>Japão</b>	41	71	109
<b>EUA</b>	41	71	117

A tabela 8.4 mostra que os maiores valores de UIA ocorrem no meio biológico, com a ressalva de que as UIA no meio biológico para o Brasil são menores que os encontrados nos outros países. Realizando uma análise mais apurada sobre as UIA do meio biológico e as etapas em que os impactos ocorrem tem-se a tabela 8.5 e a figura 8.21 a seguir.

**Tabela 8.5 - Avaliação qualitativa das unidades de impacto - meio biológico por etapa de ocorrência**

	Avaliação qualitativa das unidades de impacto - meio biológico por etapa de ocorrência		
	Etapa		
	Extração	Produção	Montagem
<b>Brasil</b>	36	33	32
<b>Alemanha</b>	36	33	40
<b>Japão</b>	36	33	40
<b>EUA</b>	36	33	48

Observando-se a tabela 8.5, elaborada com os dados obtidos nas tabelas 7.24 a 7.27, verifica-se que a variação citada anteriormente para o meio biológico ocorre graças ao processo de montagem do módulo, onde é perceptível que o Brasil possui um valor menor de UIA para a fase de montagem, o mesmo não ocorre com os demais países. Na etapa de montagem foram acumulados os valores de gasto energético de todo o processo de fabricação do módulo PV. Analisando-se os impactos mais expressivos nesta etapa, verifica-se que os impactos relativos à emissão direta (impacto 18) e indireta (impacto 17) de CO<sub>2</sub> são os que mais influenciam o resultado final da análise do passivo ambiental da fabricação dos módulos PV. A tabela 8.6 evidencia estas afirmações.

**Tabela 8.6 - Avaliação qualitativa das unidades de impacto - meio biológico**

	Número - Tipo de Impacto		
	17 - Emissão indireta de CO <sub>2</sub> (gasto energético)	18 - Emissão direta de CO <sub>2</sub>	Total
<b>Brasil</b>	16	16	32
<b>Alemanha</b>	20	20	40
<b>Japão</b>	20	20	40
<b>EUA</b>	24	24	48

Dentre os impactos analisados os que tiveram maior influência sobre a análise da representatividade qualitativa foram os impactos de número 17 e 18 relativos às emissões indireta e direta de CO<sub>2</sub>. Neste caso as emissões indiretas são as derivadas da geração de energia elétrica e variam de acordo com o fator de emissão de CO<sub>2</sub> de cada matriz energética. Estes impactos acabam por gerar uma variação das UIA no meio biológico que afetam a fase de montagem do módulo, provocando uma variação de UIA que favorece o Brasil. Esta variação nos pesos adotados para estes dois impactos ocorre graças ao tipo de matriz energética de cada país. Países que possuem uma matriz energética similar ou mais limpa que a do Brasil considerando o Sistema Interligado, ou seja, uma matriz energética menos poluente que a dos demais países, acabam gerando um ganho ambiental relativo à geração do passivo ambiental na fabricação do módulo PV. Assim, na totalização dos valores das UIA geradas (tabelas 7.24 a 7.25), têm-se os seguintes dados alocados na tabela 8.7.

**Tabela 8.7 – Total de Unidades de Impacto Ambiental geradas por país e por fase.**

Fase	UIA/País [%]			
	Brasil	Alemanha	Japão	EUA
<b>Extração de matéria-prima</b>	51,42	50,22	50,22	48,47
<b>Produção de materiais</b>	30,47	22,95	22,95	27,94
<b>Montagem do módulo</b>	18,09	20,81	20,81	23,58

A tabela 8.7 mostra que o Brasil encontra-se em uma posição mais favorável com relação aos demais países por possuir uma representatividade qualitativa menor nas fases de extração de matéria-prima Brasil (108 UIA), devido a maior quantidade de recursos hídricos, e de montagem do módulo (38 UIA), graças ao tipo de matriz energética utilizada na fabricação do módulo PV.

Observa-se que na fase de montagem do módulo o valor das UIA para Alemanha e Japão são iguais devido aos valores dos fatores de emissão, que são bastante próximos. O

mesmo não ocorre com o valor de UIA adotado para os Estados Unidos, que é maior do que os demais devido ao maior fator de emissão adotado para este país durante o estudo realizado. Como o estudo dos impactos ambientais analisados é um estudo simplificado, os valores dos pesos adotados nas fases de extração de matéria prima e de produção de materiais para a Alemanha, Japão e EUA são iguais, o que acarreta em valores de representatividade qualitativa das UIA também iguais. Um estudo mais detalhado destes impactos em todos os países pode resultar em uma atribuição diferenciada de pesos aos mesmos, o que acarretaria na formação de uma matriz de impactos com valores diferentes dos adotados neste estudo.

No caso da matriz de impactos estudada, itens como a valoração monetária e ambiental não foram abordados, o que dificulta a determinação com precisão dos custos destinados a mitigação ou reparação do passivo ambiental gerado, neste estudo será adotado um tempo estimado de 2,5 anos do tempo de vida útil do módulo para custear a mitigação deste passivo ambiental gerado pela produção do módulo. Subtraindo este valor do resultado obtido para o tempo de vida ambientalmente útil do painel (tabela 7.12) aplicado nos casos analisados, tem-se a tabela 8.8.

**Tabela 8.8 – Tempo de vida ambientalmente útil do módulo PV considerando os gastos com mitigação do passivo ambiental do módulo.**

País de destino	FE <sup>(1)</sup>	País de origem				
		Brasil <sub>sint</sub>	Japão	Alemanha	EUA	Brasil <sub>siso</sub>
		0,054	0,439	0,530	0,703	0,821
Brasil <sub>sint</sub>	0,054	-10,59	-71,02	-85,31	-112,46	-130,98
Japão	0,439	11,00	3,56	1,81	-1,54	-3,81
Alemanha	0,530	11,52	5,36	3,90	1,14	-0,75
EUA	0,703	12,13	7,49	6,39	4,31	2,88
Brasil <sub>siso</sub>	0,821	12,40	8,43	7,49	5,70	4,49

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

Considerando os dados levantados anteriormente verifica-se que os maiores valores para o tempo de vida ambientalmente útil do módulo ocorrem quando o painel é fabricado no Brasil dentro do sistema interligado e utilizado nos locais que possuem um fator de emissão mais elevado como é o caso do Brasil Sistema Isolado. Já os menores valores surgem quando o módulo é fabricado nos locais que possuem um fator de emissão mais elevado e posto para funcionar no local com um menor fator de emissão (Brasil Sistema Interligado).

Dando prosseguimento às análises, neste estudo os dados foram dispostos utilizando-se duas condições distintas. Na primeira considera-se a amortização das emissões de CO<sub>2</sub> do módulo e acrescentam-se os gastos para a amortização da energia necessária para a sua fabricação, na segunda condição, após a amortização dos gastos energéticos e das emissões de CO<sub>2</sub>, acrescenta-se a estimativa de tempo necessário para amortizar o passivo ambiental gerado (2,5 anos) e verifica-se qual é o tempo que resta ao módulo PV para que ele possa operar gerando energia “limpa”.

Considerando-se a amortização das emissões de CO<sub>2</sub> e da energia consumida na fabricação do módulo PV tem-se a tabela 8.9.

**Tabela 8.9 – Tempo (anos) de amortização das emissões de CO<sub>2</sub> e do gasto energético da fabricação do módulo PV**

País de destino	FE <sup>(1)</sup>	País de origem				
		Brasil <sub>sint</sub>	Japão	Alemanha	EUA	Brasil <sub>siso</sub>
		0,0540	0,4390	0,5300	0,7030	0,8210
Brasil <sub>sint</sub>	0,054	33,09	93,52	107,81	134,96	153,48
Japão	0,439	11,50	18,94	20,69	24,04	26,31
Alemanha	0,530	10,98	17,14	18,60	21,36	23,25
Eua	0,703	10,37	15,01	16,11	18,19	19,62
Brasil <sub>siso</sub>	0,821	10,10	14,07	15,01	16,80	18,01

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

De acordo com os dados da tabela 8.9, foram elaborados as figuras 8.21 e 8.22. . Na figura 8.21 o eixo X foi alocado como sendo o eixo dos fatores de emissão dos países de destino e o eixo Y como o eixo do tempo de amortização em anos. Para a figura 8.22 o eixo Y permanece como sendo o tempo de amortização e o eixo X passa a designar o fator de emissão dos países de origem do módulo PV.

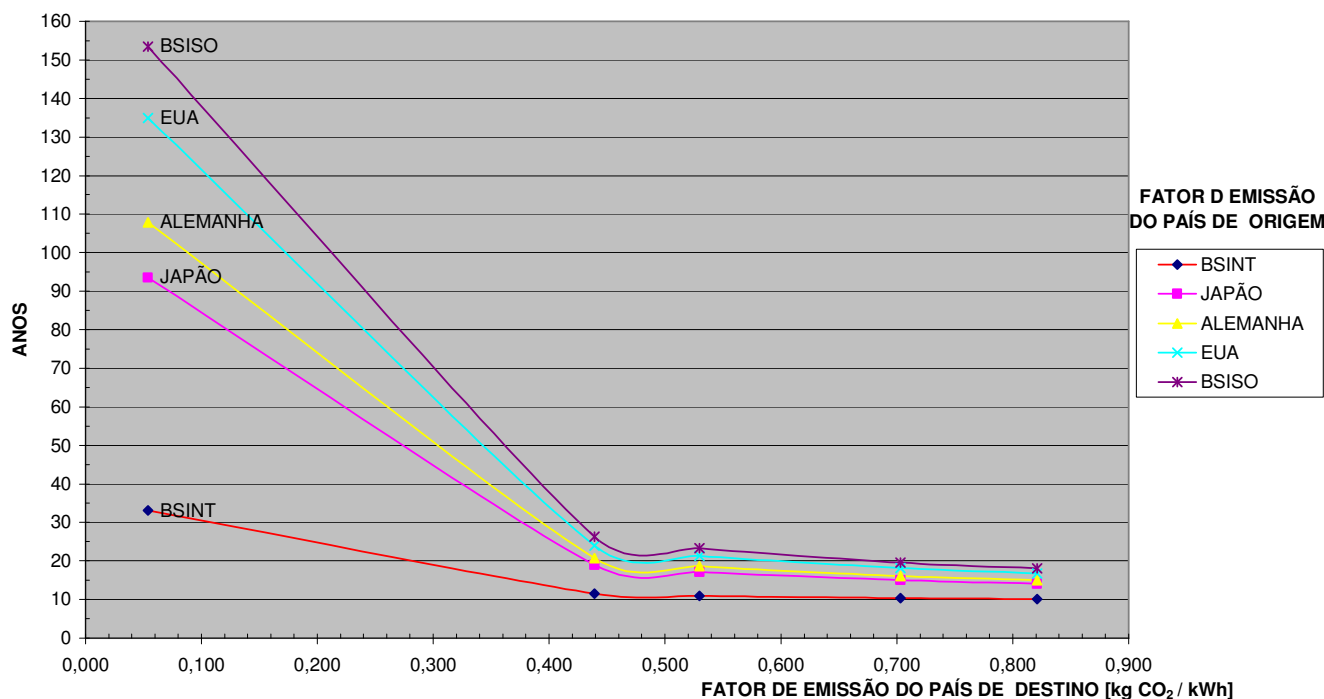


Figura 8.21 – Tempo de amortização das emissões de CO<sub>2</sub> e da energia gasta na fabricação do módulo PV versus fator de emissão do país de destino – ED

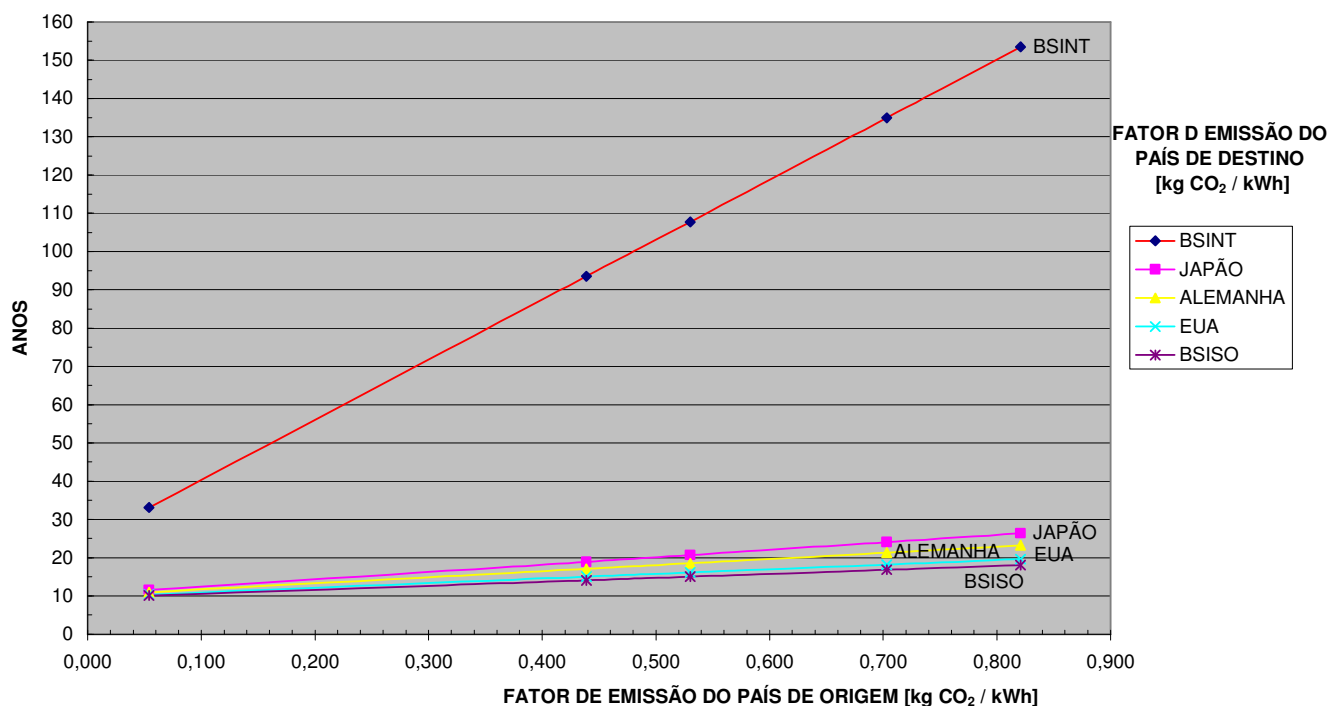


Figura 8.22 - Tempo de amortização das emissões de CO<sub>2</sub> e da energia gasta na fabricação do módulo PV versus fator de emissão do país de origem – EO

As curvas exibidas pelas figuras 8.21 e 8.22 mostram que conforme o FE de CO<sub>2</sub> do país de destino diminui e o valor do FE de CO<sub>2</sub> do país de origem aumenta, aumenta também o tempo necessário para que as emissões de CO<sub>2</sub> e o gasto energético da fabricação do módulo PV possam ser amortizados. O inverso também se verifica, ou seja conforme o FE de CO<sub>2</sub> do país de destino aumenta e o valor do FE de CO<sub>2</sub> do país de origem diminui, também diminui o tempo necessário para que as emissões de CO<sub>2</sub> e o gasto energético da fabricação do módulo PV possam ser amortizados. Os resultados deixam claro que, dependendo do tempo de vida útil estimado para o módulo PV, o tempo necessário para amortização poderá ser maior do que seu tempo de vida útil, o que torna ambientalmente inviável a utilização do módulo para estes tipos de amortização.

Observando-se os gráficos 8.21 e 8.22, nota-se também que curvas obtidas não interceptam o eixo dos anos necessários para a amortização no ponto zero. Isto ocorre devido a quantidade de CO<sub>2</sub> a ser amortizada. Além de amortizar a energia necessária para a fabricação do módulo (calculado em 8,48 anos - EPBT), é necessário amortizar as emissões de CO<sub>2</sub> que implicam em emissões diretas e indiretas. As emissões diretas dizem respeito ao CO<sub>2</sub> emitido durante o processo de fabricação, ou seja, durante as reações químicas, de queimas etc. Neste caso a quantidade de CO<sub>2</sub> a ser amortizada é de 141,181 kg de CO<sub>2</sub>, (vide tabela 7.6). As emissões indiretas são relativas ao CO<sub>2</sub> emitido durante o processo de geração da energia utilizada na fabricação do módulo PV.

Para amortizar as emissões diretas de CO<sub>2</sub> é necessário considerar que o tempo de amortização varia de acordo com a quantidade de CO<sub>2</sub> evitada anualmente pelo módulo PV em cada caso. Portanto, mesmo que o fator de emissão do país analisado seja zero, ainda resta ao sistema amortizar os gastos energéticos calculados em 8,48 anos e um determinado tempo relativo à amortização das emissões diretas de CO<sub>2</sub>. Com isto tem-se um aumento significativo no tempo de amortização em cada caso.

Ainda assim, nota-se a vantagem agregada ao Sistema Interligado do Brasil (fator de emissão de 0,054 kg CO<sub>2</sub>/kWh). Esta vantagem ambiental se verifica graças à posição ocupada pelo país no gráfico. Deste modo, como o Brasil possui um fator de emissão de CO<sub>2</sub> menor que os demais, graças ao tipo de matriz energética que possui, isto lhe garante uma vantagem com relação ao tempo de amortização de emissões de CO<sub>2</sub> e do gasto energético da fabricação do módulo PV.

Considerando-se que as curvas analisadas tendem a um valor determinado de tempo de amortização conforme os valores de emissão de destino e/ou de origem se aproximem de zero,

é possível, zerando os valores de EO e de ED nas equações das curvas analisadas, esboçar a curva limite para as figuras 8.21. Deste modo, zerando-se estes valores montou-se a tabela 8.10.

**Tabela 8.10 – variação dos valores de amortização de CO<sub>2</sub> e energia para E0 e ED tendendo a zero.**

País	Curvas Figura 8.27		Curvas Figura 8.28	
	Equações relativas aos países de origem	$\lim_{ED \rightarrow 0} A$ (anos)	Equações relativas aos países de destino	$\lim_{EO \rightarrow 0} A$ (anos)
<b>Brasil<sub>sint</sub></b>	$A = 63,02(ED)^2 - 84,038(ED) + 37,28$	37,28	$A = 156,97(E0) + 24,61$	24,61
<b>Japão</b>	$A = 217,78(ED)^2 - 290,42(ED)^2 + 108,03$	108,03	$A = 19,31(E0) + 10,46$	10,46
<b>Alemanha</b>	$A = 254,36(ED)^2 - 339,2(ED)^2 + 124,75$	124,75	$A = 15,99(E0) + 10,12$	10,12
<b>EUA</b>	$A = 323,91(ED)^2 - 431,93(ED)^2 + 156,54$	156,54	$A = 12,06(E0) + 9,72$	9,72
<b>Brasil<sub>siso</sub></b>	$A = 371,34(ED)^2 - 495,18(ED)^2 + 178,23$	178,23	$A = 10,33(E0) + 9,54$	9,54

Onde:  
A – tempo de amortização das emissões de CO<sub>2</sub> e do gasto energético  
ED – fator de emissão dos países de destino do módulo PV  
E0 – fator de emissão dos países de origem do módulo PV'

Com os dados da tabela 8.10 têm-se as figuras 8.23e 8.24 abaixo.

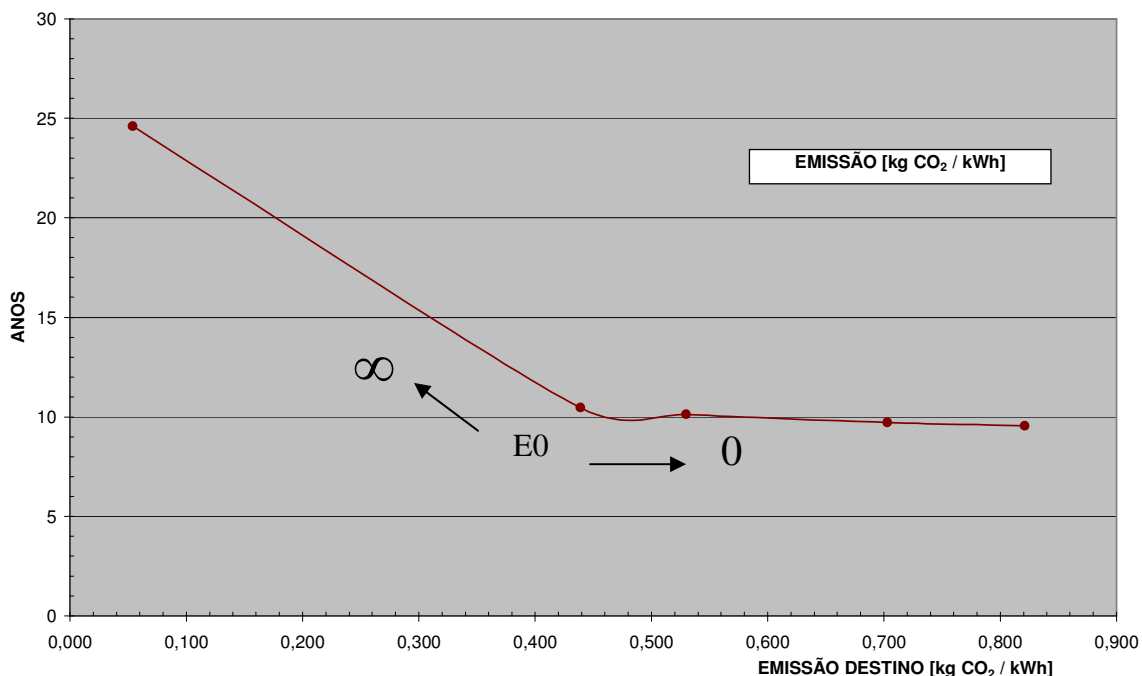


Figura 8.23 - Curva limite com E0 tendendo a zero

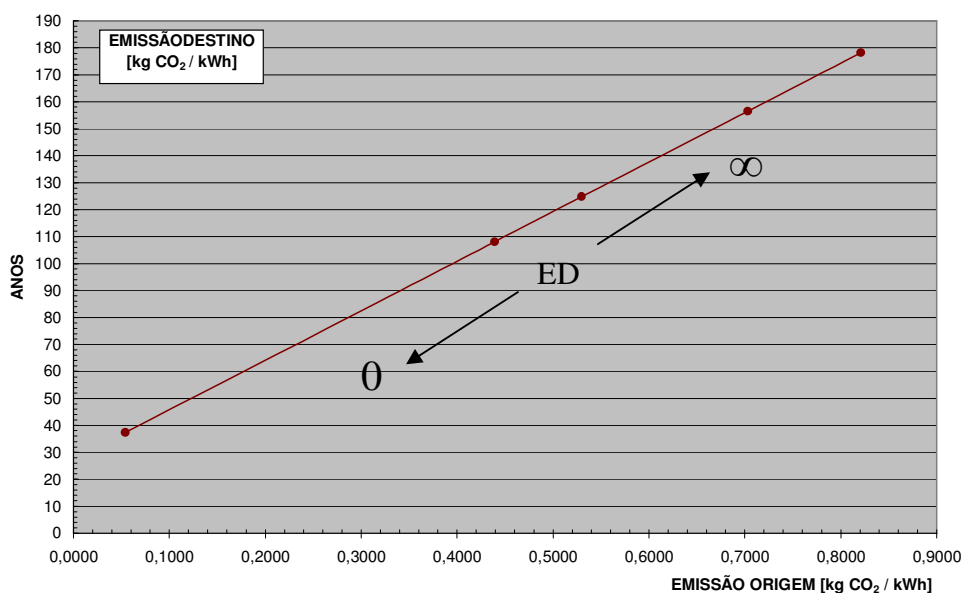


Figura 8.24 - Curva limite com ED tendendo a zero.

De posse das curvas limite citadas anteriormente, curvas e equações obtidas com a utilização do software Excell, figuras 8.23 e 8.24, pode-se calcular em cada caso os valores máximos em anos gastos com a amortização da energia utilizada na fabricação e das emissões de CO<sub>2</sub> para as equações das figuras 8.23 e 8.24. Para calcular estes valores deve-se zerar o valor de E0 e ED nas equações de tendências das curvas limite encontradas. Deste modo construiu-se a tabela 8.11 abaixo.

**Tabela 8.11 - Cálculo dos valores de tempo de amortização das curvas limite para E0 e ED tendendo a zero.**

<b>Curva limite Figura 8.29</b>	$\lim_{ED \rightarrow 0} A$ [anos]
$A = 41,329(ED)^2 - 55,101(ED) + 27,36$	27,36
<b>Curva limite Figura 8.30</b>	$\lim_{EO \rightarrow 0} A$ [anos]
$A = 183,76(E0) + 27,36$	27,36
Onde: A – tempo de amortização das emissões de CO <sub>2</sub> e do gasto energético ED – fator de emissão dos países de destino do módulo PV E0 – fator de emissão dos países de origem do módulo PV	

Com os dados sobre E0/ED e tempo de amortização dos gastos energéticos e emissões de CO<sub>2</sub> da fabricação do módulo PV, pode-se montar uma tabela que relacione os resultados obtidos com a relação E0/ED e o tempo de amortização necessário encontrado para cada valor obtido de E0/ED. Com os dados obtidos na tabela pode-se formar um gráfico capaz de fornecer, de acordo com o valor de E0/ED, o tempo, em anos, necessário para amortizar os gastos energéticos e de emissões de CO<sub>2</sub> de um determinado projeto de fabricação e operação de módulos PV, considerando os fatores de emissão de CO<sub>2</sub> dos países de origem e de destino deste projeto. Deste modo tem-se a tabela 8.12 e o gráfico da figura 8.25, abaixo.

**Tabela 8.12 - Valores de Tempo para a relação E0/ED considerando a amortização das emissões de CO<sub>2</sub> e do gasto energético de fabricação do módulo PV.**

País de destino		País de Origem				
		Brasil <sub>sint</sub>	Japão	Alemanha	EUA	Brasil <sub>siso</sub>
Brasil <sub>sint</sub>	E0/ED	1,00	8,13	9,81	13,02	15,20
	ANOS	17,04	55,48	64,56	81,83	93,61
Japão	E0/ED	0,12	1,00	1,21	1,60	1,87
	ANOS	6,82	11,55	12,67	14,79	16,24
Alemanha	E0/ED	0,10	0,83	1,00	1,33	1,55
	ANOS	6,58	10,49	11,42	13,18	14,38
Eua	E0/ED	0,08	0,62	0,75	1,00	1,17
	ANOS	6,29	9,24	9,94	11,26	12,17
Brasil <sub>siso</sub>	E0/ED	0,07	0,53	0,65	0,86	1,00
	ANOS	6,16	8,69	9,28	10,42	11,19

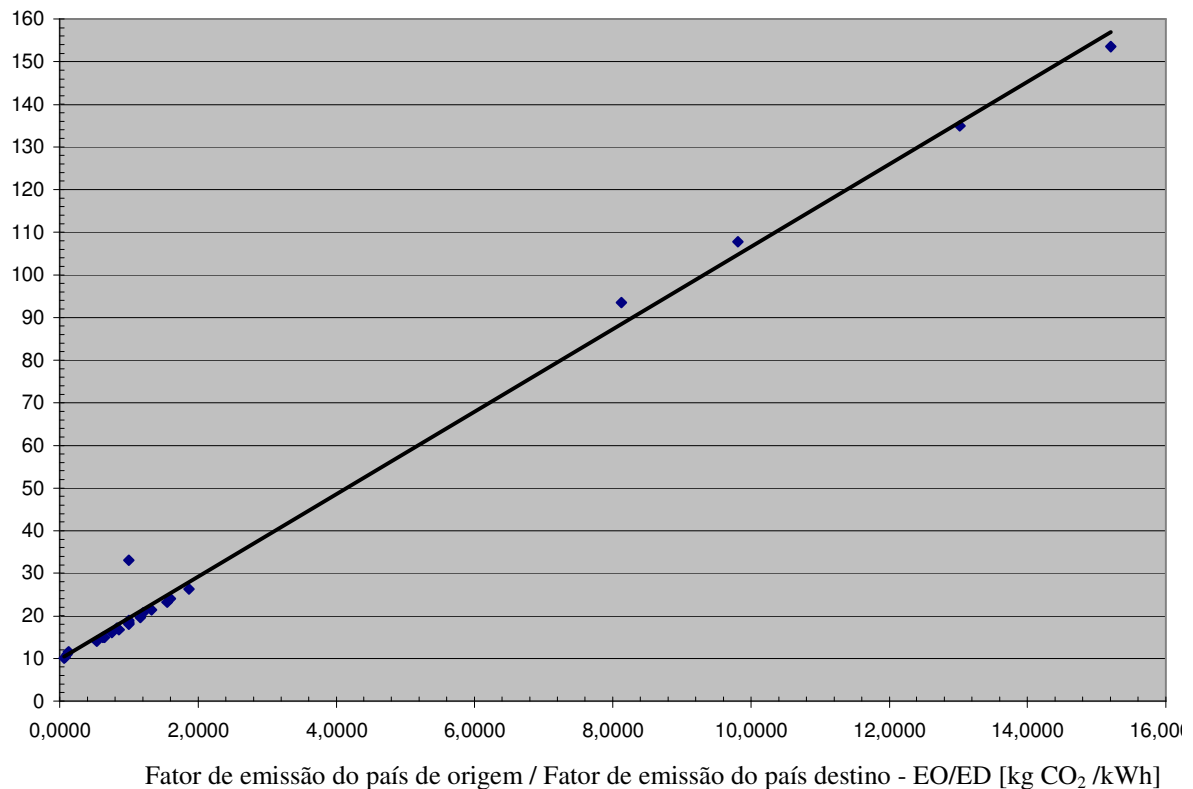


Figura 8.25 – Tempo de amortização da energia gasta e CO<sub>2</sub> emitido na fabricação do módulo PV versus a relação fator de emissão de origem / fator de emissão destino considerando os países de destino do módulo PV

A equação de tendência da curva da figura 8.31 é dada por:

$$\bullet \quad A = 9,68 (EO/ED) + 9,78 \quad (8.1)$$

Fazendo

$$\lim_{EO/ED \rightarrow 0} A = 9,78 \quad (8.2)$$

Onde

- A – tempo gasto na amortização das emissões de CO<sub>2</sub> e do gasto energético em anos
- EO/ED – relação entre os valores dos fatores de emissão de CO<sub>2</sub> dos países de origem e de destino considerados.

Observando-se o gráfico nota-se que alguns pontos encontram-se um pouco afastados da reta formada. Isto ocorre devido à diferença existente entre os valores dos fatores de emissão de CO<sub>2</sub> dos países analisados. Os pontos mais recuados da reta dizem respeito ao Brasil sistema interligado, que possui um fator de emissão de CO<sub>2</sub> muito menor do que os demais países. Para corrigir possíveis erros durante a tomada de valores diretamente no gráfico, podem-se elaborar dois outros gráficos, o primeiro apenas com os valores encontrados para o Brasil sistema interligado e o segundo com os valores encontrados para os demais países, ou ainda um gráfico para cada país em estudo. Como exemplo tem-se as figuras 8.26 e 8.273, relativas ao Brasil sistema interligado e aos demais países. Deste modo, é possível analisar as possíveis combinações entre os países estudados, considerando-se como país de destino o Brasil<sub>SINT</sub>, e como país de origem os demais países. Salienta-se que este mesmo raciocínio se aplica a utilização dos outros países.

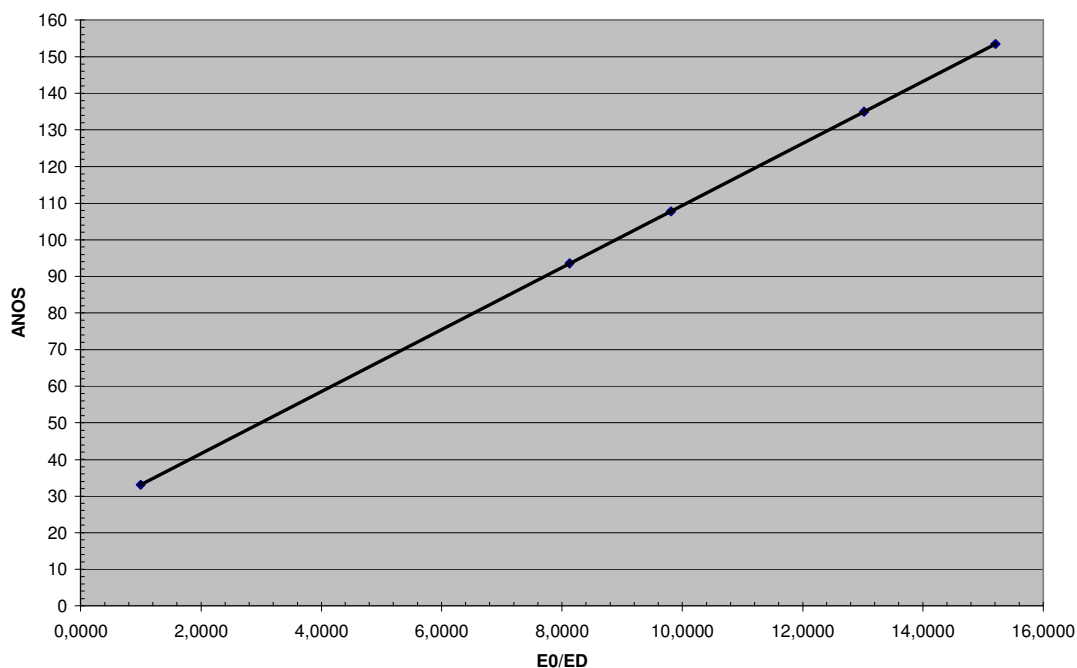


Figura 8.26 – Tempo de amortização das emissões de CO<sub>2</sub> e gasto energético versus os fatores de emissão E0/ED, para o Brasil<sub>SINT</sub> como país de destino do módulo PV.

A equação de tendência da curva da figura 8.26 é dada por:

$$A = 8,48(E0/ED) + 24,61 \quad (8.3)$$

Onde

- A – Tempo gasto na amortização das emissões de CO<sub>2</sub> e do gasto energético em anos

- E0/ED – relação entre os valores dos fatores de emissão de CO<sub>2</sub> dos países de origem e de destino considerados.

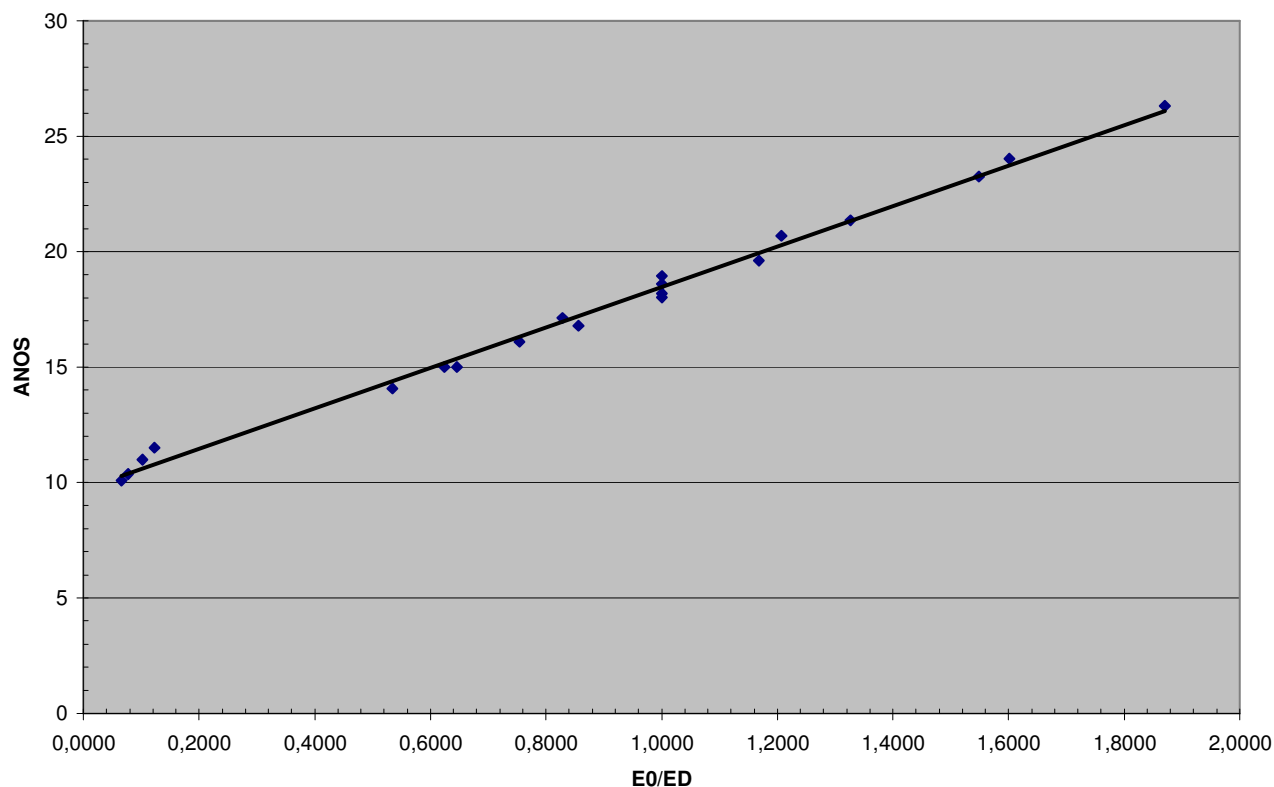


Figura 8.27 – Tempo de amortização das emissões de CO<sub>2</sub> e do gasto energético versus os fatores de emissão E0/ED, considerando Japão, Alemanha, EUA e Brasil sistema isolado como países de destino do módulo PV.

A equação de tendência da curva da figura 8.27 é dada por:

$$A = 8,77(E0/ED) + 9,71 \quad (8.4)$$

Onde

- A – Tempo gasto na amortização das emissões de CO<sub>2</sub> e do gasto energético em anos
- E0/ED – relação entre os valores dos fatores de emissão de CO<sub>2</sub> dos países de origem e de destino considerados.

Após as análises pertinentes ao período de amortização dos gastos energéticos e de emissões de CO<sub>2</sub> da fabricação dos módulos PV, deve-se agora verificar se, após a inclusão dos gastos de amortização do passivo ambiental gerado na fabricação do módulo PV, ainda resta algum tempo de vida útil ao módulo para que este possa gerar energia elétrica “limpa”

após estas amortizações, ou seja, quanto tempo resta ao módulo PV, após amortizar também seu passivo ambiental, para que ele produza energia limpa?.

Para estas verificações, neste estudo será considerado um módulo PV que possui um tempo de vida útil de 25 anos e que necessita de 2,5 anos para amortizar o passivo ambiental gerado em sua fabricação. Com estas considerações foram elaboradas a tabela 8.13 e as figuras 8.28 e 8.29.

**Tabela 8.13 – Tempo de vida ambientalmente útil (TVAU) do módulo PV após amortizações (emissões de CO<sub>2</sub>, energia de fabricação e passivo ambiental).**

País de destino	FE <sup>(1)</sup>	País de origem				
		Brasil <sub>sint</sub>	Japão	Alemanha	EUA	Brasil <sub>siso</sub>
		0,0540	0,4390	0,5300	0,7030	0,8210
<b>Brasil<sub>sint</sub></b>	<b>0,054</b>	-10,59	-71,02	-85,31	-112,46	-130,98
<b>Japão</b>	<b>0,439</b>	11,00	3,56	1,81	-1,54	-3,81
<b>Alemanha</b>	<b>0,530</b>	11,52	5,36	3,90	1,14	-0,75
<b>Eua</b>	<b>0,703</b>	12,13	7,49	6,39	4,31	2,88
<b>Brasil<sub>siso</sub></b>	<b>0,821</b>	12,40	8,43	7,49	5,70	4,49

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

Tempo de vida útil do módulo PV: 25

Tempo para amortizar o passivo ambiental: 2,5

De acordo com os dados da tabela 8.13, foram elaborados os gráficos 8.28 e 8.29. No gráfico 8.30 o eixo X foi alocado como sendo o eixo dos fatores de emissão dos países de destino e o eixo Y como o eixo do tempo de vida ambientalmente útil do módulo PV - (TVAU) em anos. Para o gráfico 8.31 o eixo Y permanece como sendo o TVAU e o eixo X passa a designar o fator de emissão dos países de origem do módulo PV.

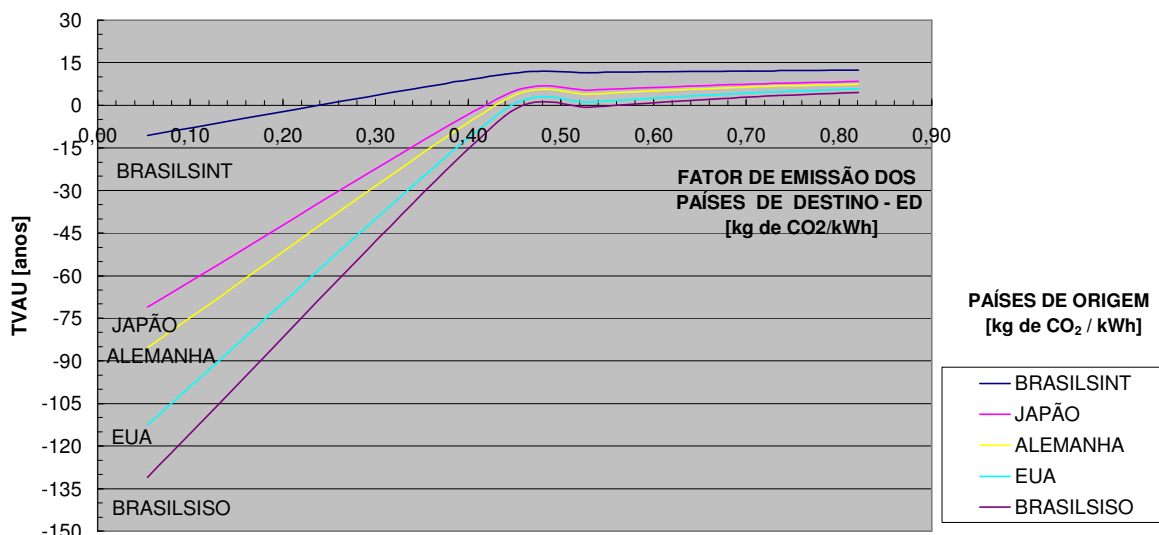


Figura 8.28 – TVAU - Tempo de vida ambientalmente útil do módulo PV com 1m<sup>2</sup> de área considerando as emissões dos países de destino (ED).

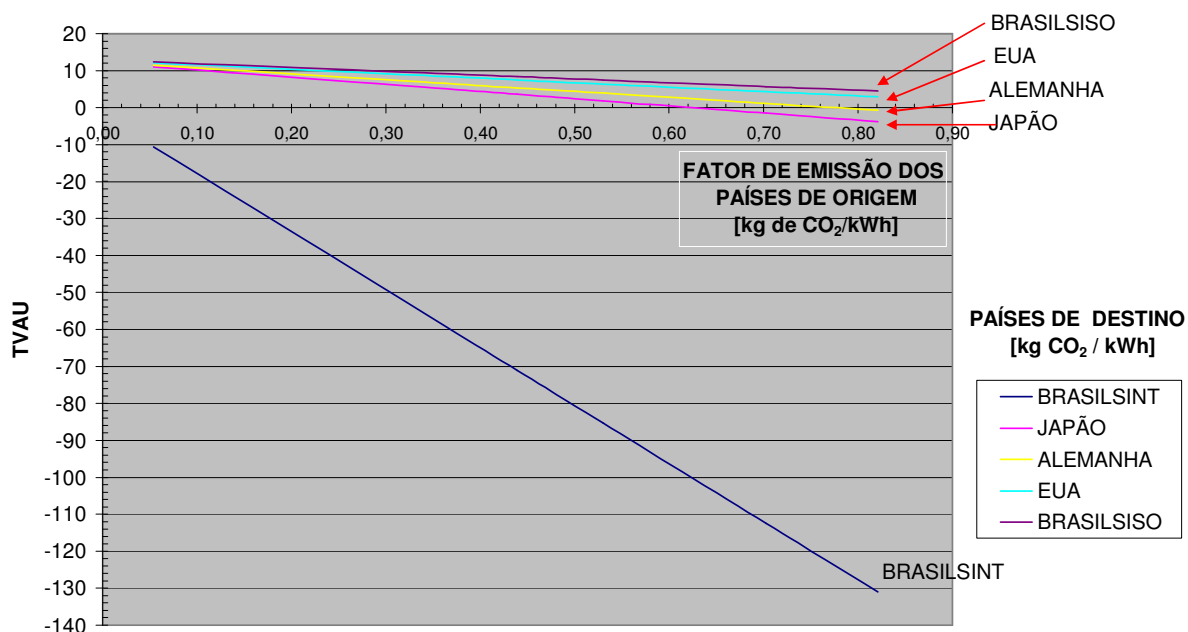


Figura 8.29 – TVAU - Tempo de vida ambientalmente útil do módulo PV COM 1m<sup>2</sup> considerando as emissões dos países de origem (EO)

A figura 8.28 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. Do mesmo modo que existe um ponto de saturação para as curvas de amortização, como o tempo de vida ambientalmente útil do módulo é um gráfico complementar aos demais, existe neste um ponto de saturação a partir do qual o tempo de vida ambientalmente útil do módulo decresce mais rapidamente.

No entanto, com a diminuição do valor do FE do país de origem e com o aumento do FE do país de destino, maiores são os valores de tempo de vida ambientalmente útil do módulo. Para encontrar o valor máximo deve-se subtrair dos 25 anos, admitidos para a vida útil do módulo PV, a soma dos valores obtidos para a amortização da energia empregada na fabricação do módulo PV(EPBT) calculada em 8,48 anos e da emissão direta de CO<sub>2</sub> e do passivo ambiental, estimada em 2,5 anos. 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 CO<sub>2</sub> para a geração da energia elétrica necessária para fabricar o módulo, ainda resta ao painel amortizar os custos das emissões diretas de CO<sub>2</sub> 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 CO<sub>2</sub> de emissões diretas ocasionadas pela fabricação do módulo PV (ver tabela 7.6).

O valor em anos para amortizar as emissões diretas de CO<sub>2</sub> depende da quantidade de CO<sub>2</sub> cada país é capaz de evitar anualmente com o funcionamento do módulo PV para a geração de energia elétrica, variando de acordo com o FE de CO<sub>2</sub> da matriz energética do país de destino. A tabela 8.14 mostra os limites máximos de tempo de vida ambientalmente útil alcançado pelos países de destino analisados.

**Tabela 8.14 – Tempo máximo de vida ambientalmente útil do módulo PV por país de destino (anos).**

<b>Pais de destino</b>	<b>A</b>	<b>B</b>	<b>TVAU</b>
<b>BRASIL<sub>SINT</sub></b>	8,75	16,13	-2,11
<b>JAPÃO</b>	71,14	1,98	12,04
<b>ALEMANHA</b>	85,89	1,64	12,38
<b>EUA</b>	113,93	1,24	12,78
<b>Brasil<sub>SISO</sub></b>	133,05	1,06	12,96

Onde:

A - Emissões de CO<sub>2</sub> evitadas anualmente com o módulo PV [kg de CO<sub>2</sub> / ano]

B - Tempo de amortização das emissões diretas de CO<sub>2</sub>, sendo  $B = 141,181 / A$  [anos]

TVAU - Tempo de vida ambientalmente útil, sendo  $TVAU = 25 - 2,5 - 8,48 - B$  [anos]

Os valores encontrados para TVAU, na tabela 8.14, indicam o valor máximo de TVAU alcançado por cada país de destino, considerando-se as emissões do país de origem como isenta de emissões de CO<sub>2</sub> (matriz energética completamente limpa), ou seja, mesmo que não haja emissão de CO<sub>2</sub> durante a geração da energia elétrica utilizada na fabricação do módulo PV, após as amortizações que devem ser realizadas, o módulo PV deverá funcionar com o tempo de vida ambientalmente útil exibido para cada país na coluna TVAU. No caso do Brasil<sub>SINT</sub> foi encontrado um tempo negativo porque, graças ao seu baixo fator de emissão ele demora mais do que 25 anos para amortizar o gasto energético e de emissões de CO<sub>2</sub> e para amortizar o passivo ambiental levantado.

Fica evidenciado que quanto mais baixo é o fator de emissão do país de destino, com relação ao país de origem, menor é o tempo de vida ambientalmente útil do módulo. Logo, torna-se mais vantajosa à utilização de painéis fabricados em países com uma matriz energética menos poluente como a do Brasil Sistema Interligado e sua utilização em países com uma matriz energética mais poluente como a do Brasil Sistema Isolado, ou ainda, em países com uma matriz energética com um FE de CO<sub>2</sub> muito maior do que o do Brasil Sistema Interligado, como é o caso do Japão, Alemanha e EUA.

Considerando-se que as curvas analisadas tendem a um valor determinado de tempo de amortização conforme os valores de emissão de destino e/ou de origem se aproximem de zero, é possível, zerando-se os valores de EO e de ED nas equações das curvas analisadas, esboçar a curva limite para as figuras 8.28 e 8.29, como apresentado na tabela 8.15 e nas figuras 8.30 e 8.31.

**Tabela 8.15 - Cálculo dos valores das curvas limite de TVAU para E0 e ED tendendo a zero**

PAÍS	Curvas Figura 8.27		Curvas Figura 8.28	
	Equações relativas aos países de origem	$\lim_{ED \rightarrow 0} A$ (anos)	Equações relativas aos países de destino	$\lim_{EO \rightarrow 0} A$ (anos)
<b>BRASIL<sub>SINT</sub></b>	$A = -63,02(ED)^2 + 84,04c - 14,79$	-14,79	$A = -156,97(E0) - 2,11$	-2,11
<b>Japão</b>	$A = -217,78(ED)^2 + 290,42(ED) - 85,53$	-85,53	$A = -19,309(E0) + 12,04$	12,04
<b>Alemanha</b>	$A = -254,36(ED)^2 + 339,2(ED) - 102,25$	-102,25	$A = -15,994(E0) + 12,38$	12,38
<b>EUA</b>	$A = -323,91(ED)^2 + 431,93(ED) - 134,04$	-134,04	$A = -12,058(E0) + 12,78$	12,78
<b>BRASIL<sub>SISO</sub></b>	$A = 371,34(ED)^2 + 495,18(ED) - 155,73$	-155,73	$A = -10,325(E0) + 12,96$	12,96

Onde:  
A – tempo de amortização das emissões de CO<sub>2</sub> e do gasto energético  
ED – fator de emissão dos países de destino do módulo PV  
E0 – fator de emissão dos países de origem do módulo PV'

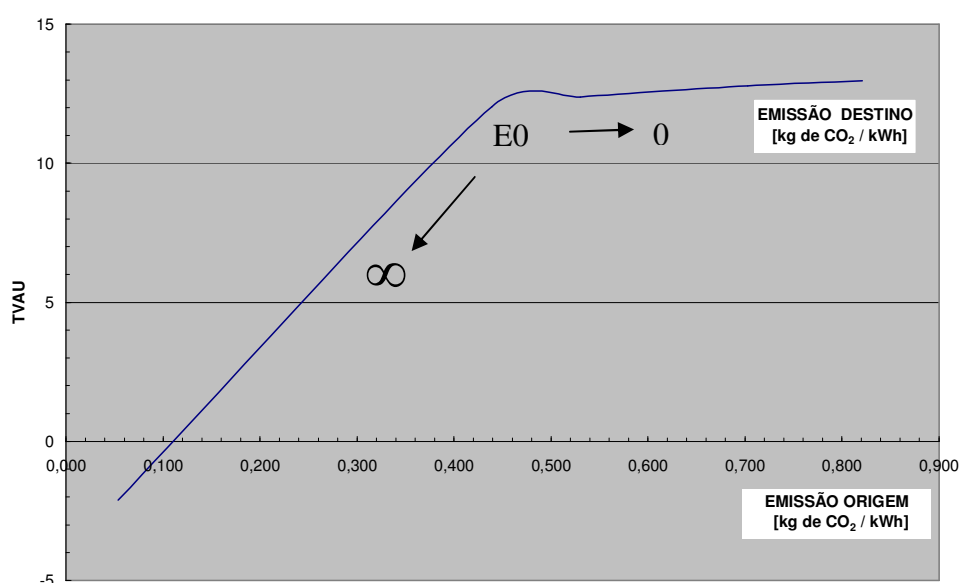


Figura 8.30 – Tempo de vida ambientalmente útil do módulo PV com 1m<sup>2</sup>.

A equação de tendência da curva gerada na figura 8.30 é dada por:

$$A = -41,329(E0)^2 + 55,101(E0) - 4,863 \quad (8.5)$$

Onde:

- A – Tempo gasto para a amortização da energia e das emissões de CO<sub>2</sub> durante a fabricação do módulo PV
- EO – Fator de emissão de CO<sub>2</sub> do país de origem

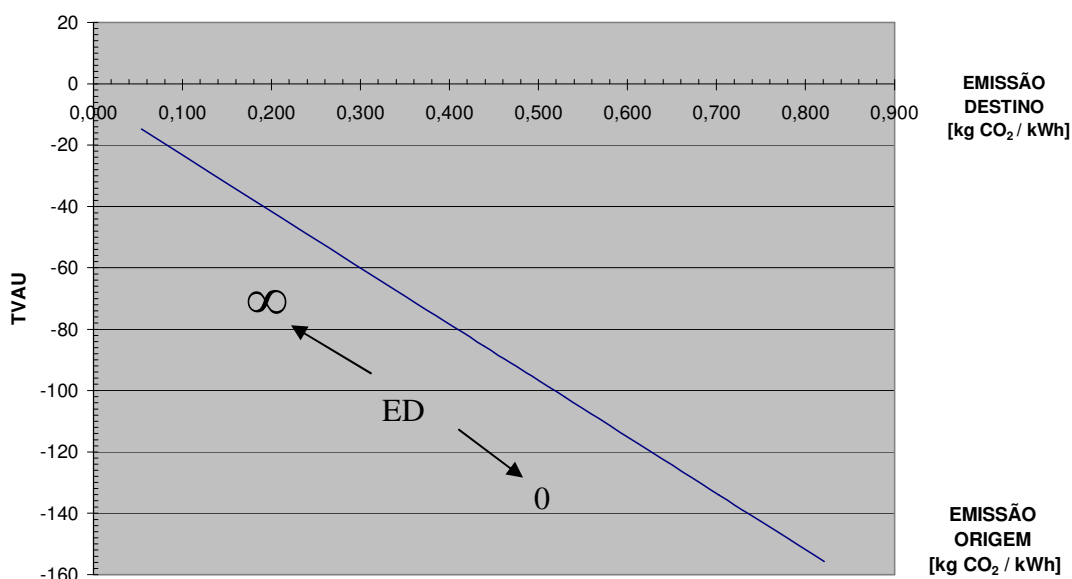


Figura 8.31 - Tempo de vida ambientalmente útil do módulo PV com 1m<sup>2</sup>.

A equação de tendência da curva gerada na figura 8.31 é dada por:

$$\bullet \quad A = -183,75(ED) - 4,8649 \quad (8.6)$$

Onde:

- A – Tempo gasto para a amortização da energia e das emissões de CO<sub>2</sub> durante a fabricação do módulo PV
- ED – Fator de emissão de CO<sub>2</sub> do país de destino

Analisando-se as figuras de 8.28 a 8.31, pode-se verificar que conforme aumenta o FE de CO<sub>2</sub> no país de origem e diminui o FE de CO<sub>2</sub> do país de destino menor é o tempo de vida ambientalmente útil do módulo e vice-versa, chegando a atingir valores negativos de tempo, ou seja, é preciso um tempo muito maior do que o tempo de vida útil do módulo (estimado em 25 anos) para que ele possa amortizar a energia, as emissões de CO<sub>2</sub> e o passivo ambiental gerado no processo de fabricação do módulo PV, além de não apresentar nenhuma vida ambientalmente útil.

De posse das curvas limite citadas anteriormente, figuras 8.30 e 8.31, 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 E0 e ED nas equações de tendências das curvas limite encontradas, como mostrado na tabela 8.16.

**Tabela 8.16 - Cálculo dos valores de TVAU das curvas limite para E0 e ED tendendo a zero**

<b>Curva limite Figura 8.36</b>	$\lim_{EO \rightarrow 0} A$ [anos]
$A = -41,31(E0)^2 + 55,10(E0) - 4,86$	- 4,86
<b>Curva limite Figura 8.37</b>	$\lim_{ED \rightarrow 0} A$ [anos]
$-183,75(ED) - 4,86$	- 4,86
Onde: A – tempo de amortização das emissões de CO <sub>2</sub> e do gasto energético ED – fator de emissão dos países de destino do módulo PV E0 – fator de emissão dos países de origem do módulo PV	

Os valores obtidos na tabela 8.16 indicam qual é o máximo tempo de vida ambientalmente útil alcançado pelo módulo PV quando os fatores de emissão de origem ou de destino tendem a zero. Com os dados sobre E0/ED e do tempo de vida ambientalmente útil do módulo PV, pode-se montar uma tabela que relacione os resultados obtidos com a relação E0/ED e o TVAU encontrado para cada valor obtido de E0/ED.

Com os dados obtidos na tabela 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 8.17 e a figura 8.32, abaixo.

**Tabela 8.17 - Valores de Tempo para a relação E0/ED considerando o tempo de vida ambientalmente útil do módulo PV**

País de destino		País de Origem				
		Brasil <sub>sint</sub>	Japão	Alemanha	EUA	Brasil <sub>siso</sub>
Brasil <sub>sint</sub>	<b>E0/ED</b>	1	8,13	9,81	13,02	15,20
	<b>ANOS</b>	-10,58	-71,02	-85,30	-112,46	-130,98
Japão	<b>E0/ED</b>	0,12	1	1,21	1,60	1,87
	<b>ANOS</b>	10,99	3,56	1,80	-1,53	-3,81
Alemanha	<b>E0/ED</b>	0,10	0,83	1	1,33	1,55
	<b>ANOS</b>	11,51	5,36	3,90	1,14	-0,75
EUA	<b>E0/ED</b>	0,08	0,624	0,75	1	1,17
	<b>ANOS</b>	12,13	7,49	6,39	4,31	2,88
Brasil <sub>siso</sub>	<b>E0/ED</b>	0,07	0,53	0,65	0,86	1
	<b>ANOS</b>	12,40	8,41	7,49	5,70	4,486

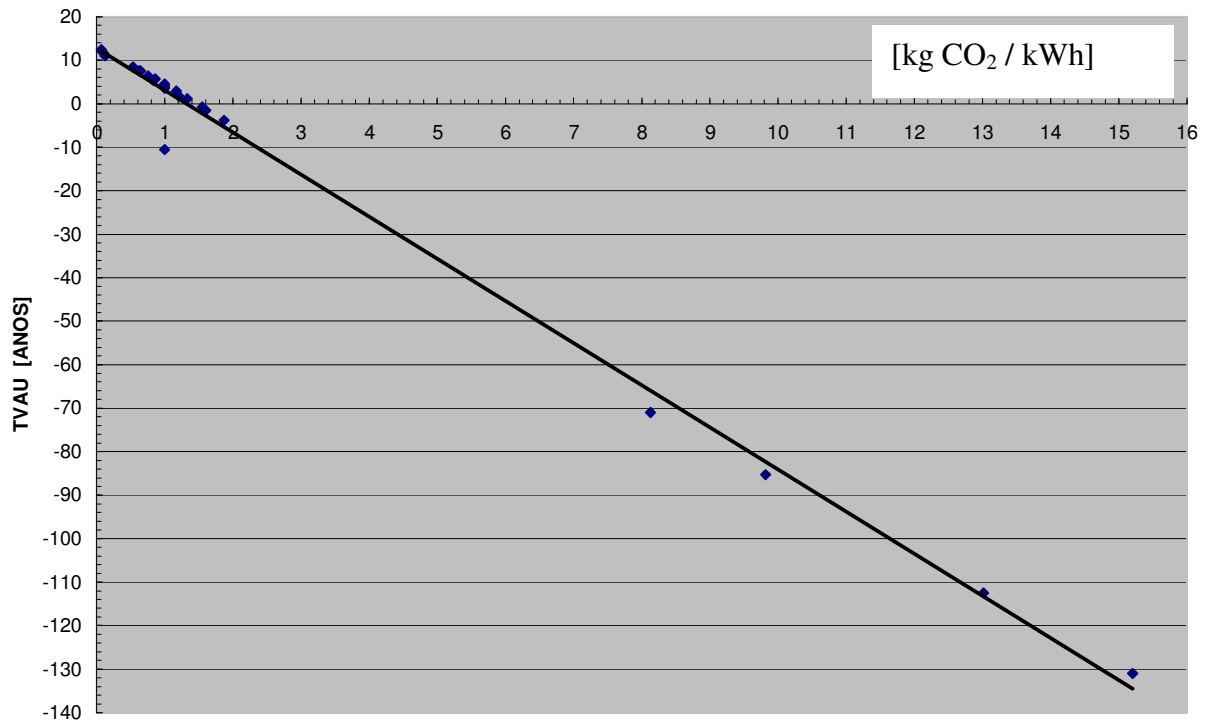


Figura 8.32 - Tempo de vida ambientalmente útil versus relação de emissão de CO<sub>2</sub> do país de origem / emissão de CO<sub>2</sub> do país de destino – EO/ED.

A equação de tendência da curva da figura 8.32 é dada por:

12,721

$$\bullet \quad A = -9,68 (E0/ED) + 12,72 \quad (8.7)$$

Onde :

A – Tempo e vida ambientalmente útil do módulo PV

E0/ED – relação entre os fatores de emissão de CO<sub>2</sub> dos países de Origem (E0) e de destino (ED) do módulo PV.

Assim, caso o valor de E0/ED seja zero (E0 = 0 ou ED tendendo para infinito), o maior TVAU encontrado é 16,60 anos, valor bem próximo do limite máximo esperado para o TVAU do módulo PV ( 12,72 anos)

A figura 8.32 mostra que a partir de um determinado valor de EO/ED (1,3) não é viável a utilização do módulo porque o mesmo após zerar seus custos ambientais tende a necessitar de um tempo cada vez maior do que o tempo de sua vida útil para amortizar estes

custos. Para valores abaixo de  $EO/ED = 1,3$  há um aumento gradativo do tempo de vida ambientalmente útil do módulo. não ultrapassando a marca dos 13 anos.

Analisando a curva da figura 8.32 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 12,72 anos. Analisando-se as equações de  $E0/ED$  versus tempo de vida ambientalmente útil e tempo de amortização de  $CO_2$  e energia, tem-se.

$$TA_{CO_2+E} = 9,68(E0/ED) + 9,78 \quad (8.87)$$

Onde:

$TA_{CO_2+E}$  - Tempo de amortização da energia e das emissões de  $CO_2$  durante a fabricação do módulo PV

$$TVAU = -9,68(E0/ED) + 12,72 \quad (8.9)$$

$$TVAU = VU - (TA_{CO_2+E} + TA_{PA}) \quad (8.10)$$

Onde:

$VU$  - tempo de vida útil dos equipamentos que formam o módulo PV

$TA_{PA}$  = Tempo de amortização do passivo ambiental gerado pela fabricação do módulo PV.

Substituindo-se 8.8 em 8.10

$$TVAU = VU - [(9,68(E0/ED) + 9,78) + TA_{PA}] \quad (8.11)$$

$$TVAU = VU - 9,68(E0/ED) - 9,78 - TA_{PA} \quad (8.12)$$

Com a equação acima, é possível estabelecer as variações de TVAU do módulo PV de acordo com as estimativas de vida útil e tempo de amortização do passivo ambiental do módulo PV.

No entanto, observa-se que na reta estabelecida pela figura 8.32, alguns pontos 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 erros de interpolação quando da tomada de dados relativos ao gráfico citado.

Assim, para minimizar os esta possibilidade, os dados relativos aos países analisados foram separados e uma família de curvas foi gerada para eliminar este problema, causado pela diferença de valores encontrados para os FE dos países estudados. Assim têm-se os gráficos 8.33 a 8.47.

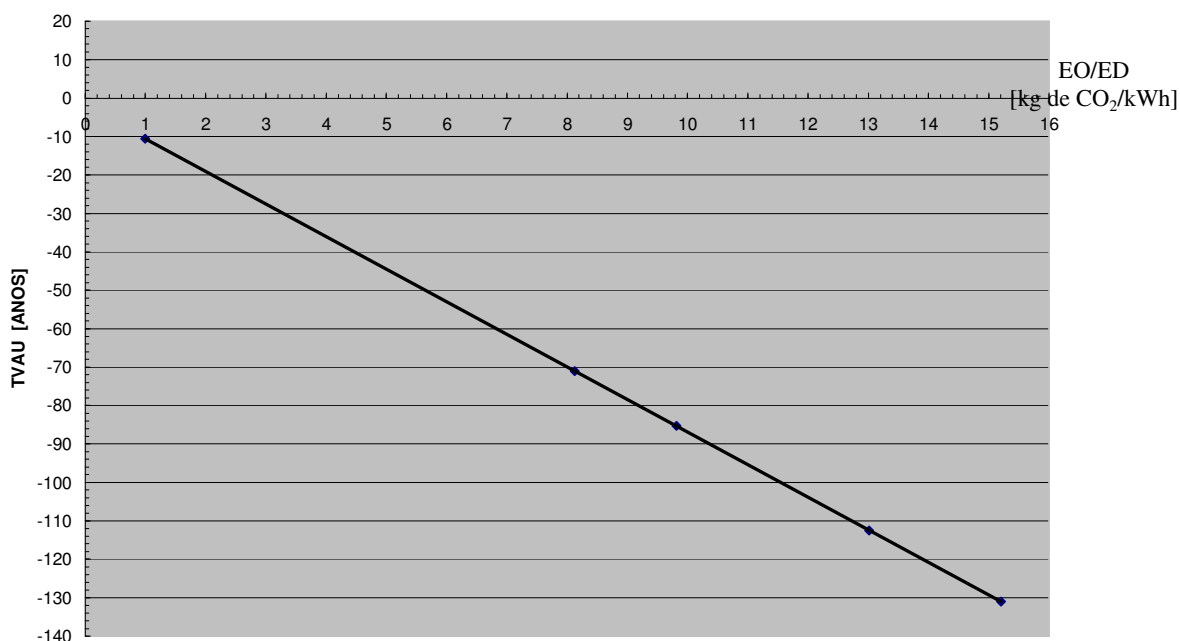


Figura 8.33 - Tempo de vida ambientalmente útil versus relação fator de emissão da origem / fator de emissão do destino (EO/ED) - país destino Brasil<sub>SINT</sub>

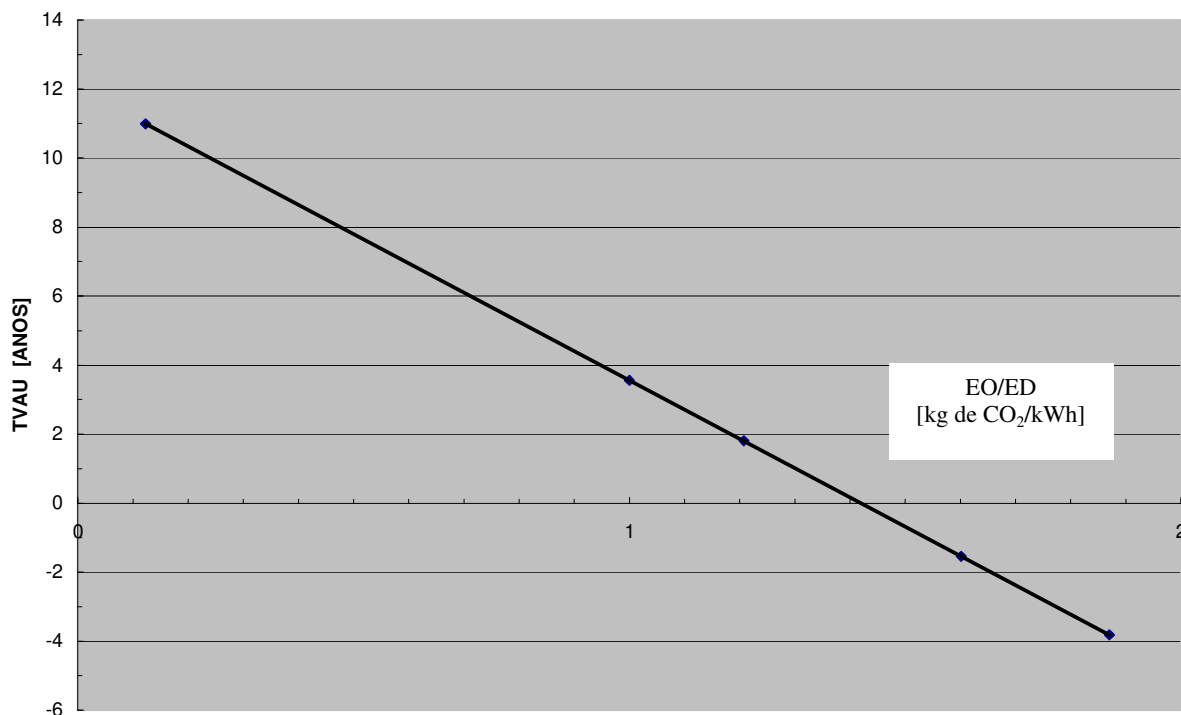


Figura 8.34 - Tempo de vida ambientalmente útil versus relação fator de emissão da origem / fator de emissão do destino (EO/ED) - país destino Japão

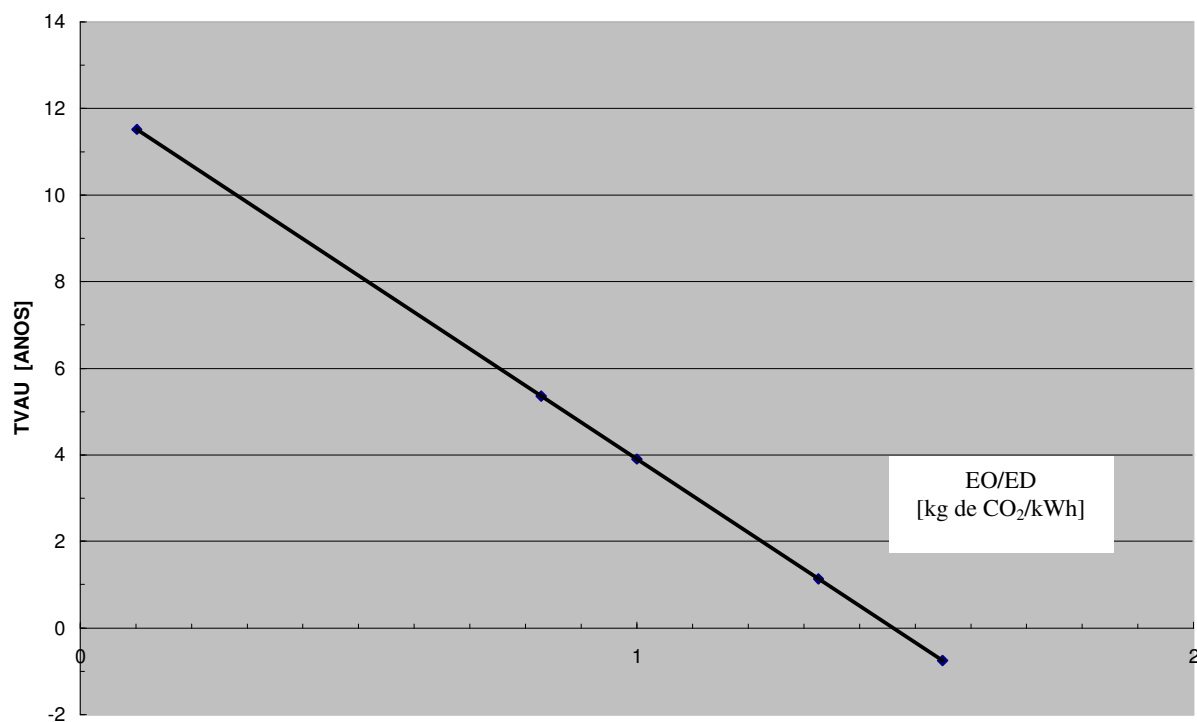


Figura 8.35 - Tempo de vida ambientalmente útil versus relação fator de emissão da origem / fator de emissão do destino (EO/ED) - país destino Alemanha

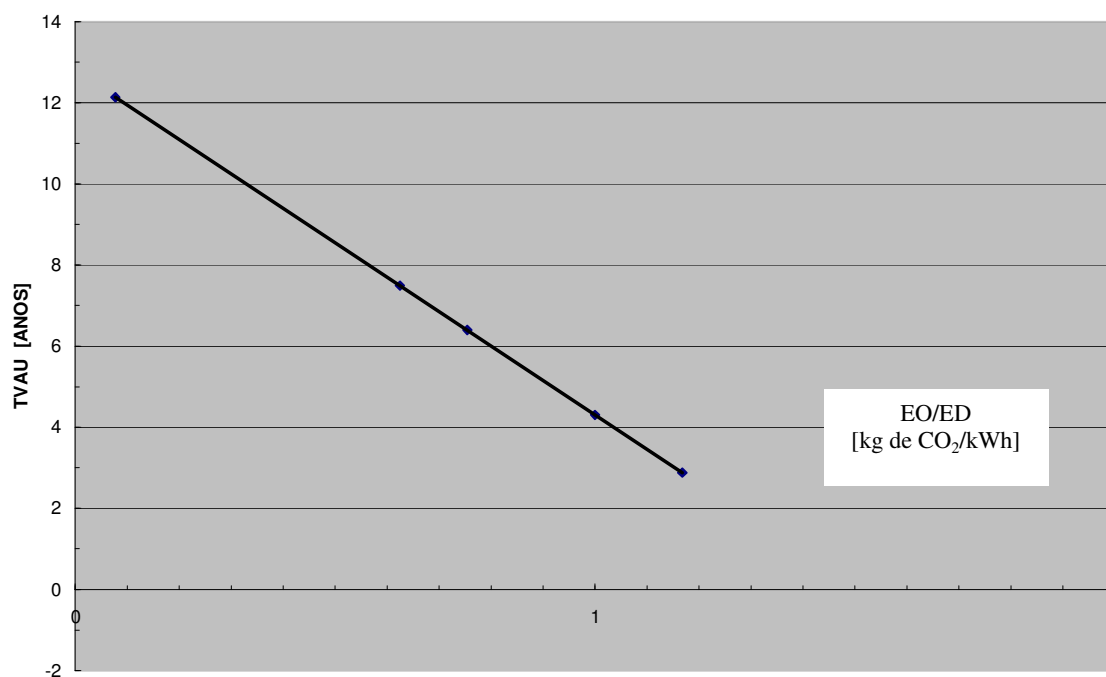


Figura 8.36 - Tempo de vida ambientalmente útil versus relação fator de emissão da origem / fator de emissão do destino (EO/ED) - país destino Estados Unidos

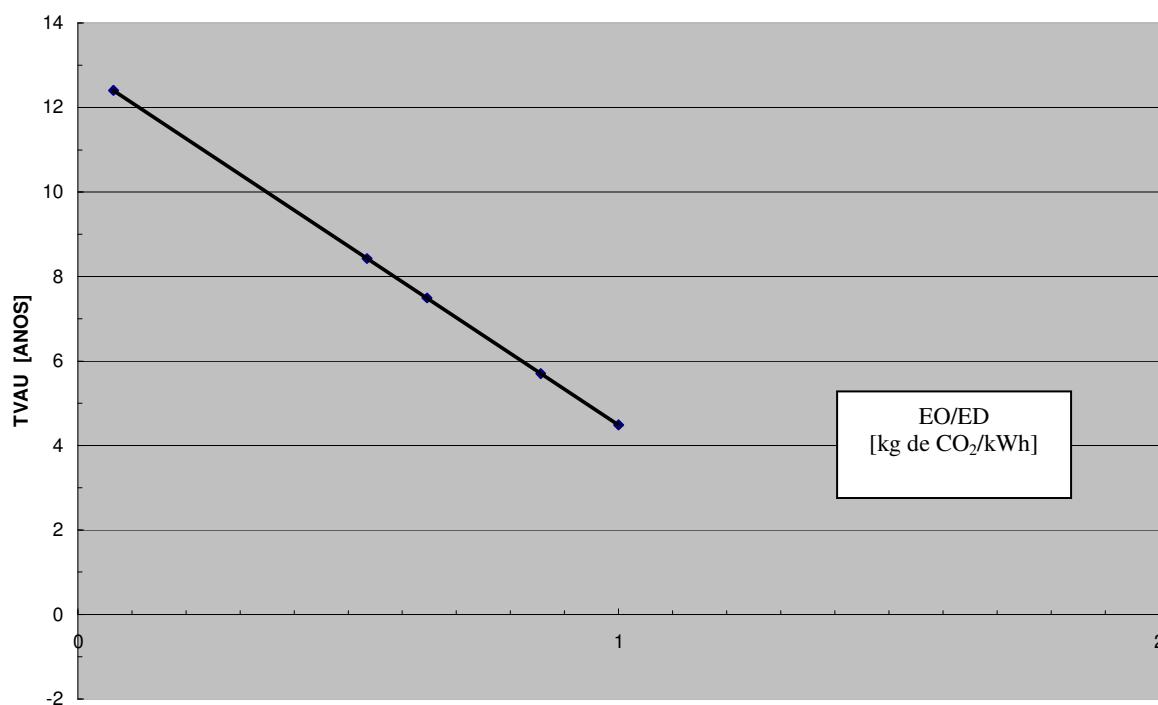


Figura 8.37 - Tempo de vida ambientalmente útil versus relação fator de emissão da origem / fator de emissão do destino (EO/ED) - país destino Brasil<sub>ISO</sub>.

No caso dos gráficos das figuras 8.3 a 8.37, para saber qual é o valor de E0/ED para o qual o valor de TVAU se iguala a zero, deve-se zerar o valor de TVAU nas equações de tendência de cada gráfico obtido e vice-versa. Assim os valores obtidos para os países analisados foram alocados na tabela 8.18 abaixo.

**Tabela 8.18 – Valores de TVAU para E0/ED tendendo a zero**

País	Equações relativas aos países de origem	$\lim_{E0/ED \rightarrow 0} TVAU$ (anos)	$\lim_{TVAU \rightarrow 0} E0/ED$ (anos)
<b>Brasil<sub>sint</sub></b>	$TVAU = -8,48(E0/ED) - 2,11$	-2,11	-0,25
<b>Japão</b>	$TVAU = -8,48(E0/ED) + 12,04$	12,04	1,42
<b>Alemanha</b>	$TVAU = -8,48(E0/ED) + 12,38$	12,38	1,46
<b>EUA</b>	$TVAU = -8,48(E0/ED) + 12,78$	12,78	1,51
<b>Brasil<sub>iso</sub></b>	$TVAU = -8,48(E0/ED) + 12,96$	12,96	1,53
Onde:  TVAU – Tempo de vida ambientalmente útil do módulo PV E0/ED – Relação entre os fatores de emissão dos países de origem e de destino do módulo PV.			

Os valores médios encontrados para TVAU e E0/ED foram 9,61 anos para TVAU e 1,13 kgCO<sub>2</sub>/kWh para E0/ED.

É importante ressaltar que como existem valores de FE bastante distantes entre si, como é o caso do Brasil<sub>SINT</sub> e os demais países, deve-se também considerar a análise do ponto de E0/ED onde após as amortizações, não reste nenhum TVAU para o módulo PV operar. Com isto, o valor de E0/ED encontrado para o Brasil<sub>SINT</sub> é igual a -0,25 kgCO<sub>2</sub>/kWh e para os demais países encontra-se o valor médio de 1,13 kgCO<sub>2</sub>/kWh, ou seja a partir destes valores de E0/ED, é alcançada amortização dos gastos energéticos, das emissões de CO<sub>2</sub> e do passivo ambiental, porém não resta nenhum tempo de vida ambientalmente útil para ser utilizado pelo módulo para a geração de energia “limpa”. Salientando que no caso do painel fabricado e utilizado no Brasil<sub>SINT</sub>, é necessário que o módulo PV opere por mais 2,11 anos, além de seu tempo de vida útil, para que este amortize completamente os gastos energéticos, de emissões de CO<sub>2</sub> e do passivo ambiental levantado

Caso os valores de E0/ED sejam maiores do que os valores citados o módulo não consegue amortizar os gastos citados acima e termina seu ciclo de vida com um prejuízo ambiental.

## 8.4 Validação dos resultados

Com os dados levantados e com o auxílio das retas das figuras 8.33 a 8.37 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.

Como exemplos, podem ser criados 2 cenários diferentes. No primeiro pode-se verificar a relação do custo/benefício da fabricação e operação de módulos PV de uma empresa localizada em um país com um FE de CO<sub>2</sub> como o da Alemanha e a possibilidade de exportar estes equipamentos para países com um FE de CO<sub>2</sub> mais baixo e/ou mais alto do que o da Alemanha.

No segundo cenário verifica-se o custo/benefício da transferência da tecnologia utilizada na fabricação do módulo PV para países com um baixo FE de CO<sub>2</sub>, similar ao do Brasil<sub>SINT</sub>, e a utilização dos módulos fabricados em países com um FE mais elevados do que o do Brasil<sub>SINT</sub>, como é o caso da Alemanha e Brasil<sub>SISO</sub>.

A base dos cálculos de ambos os cenários é dada pelos seguintes passos:

1. Seleção do país de origem e de seu fator de emissão de CO<sub>2</sub>, ou seja, EO.
2. Seleção do país de destino e de seu fator de emissão de CO<sub>2</sub>, ou seja, ED.
3. Cálculo de E0/ED
4. Verificação por tabela, (ver tabela 8.18), de acordo com o valor de E0/ED obtido, do valor de TVAU.
5. Cálculo da quantidade de CO<sub>2</sub> evitada:

$$\text{CO}_2 \text{ evitado} = \text{TVAU (ver tabela 8.17)} \times (\text{FE de CO}_2 \text{ do país de destino do módulo}) \times (\text{quantidade de energia gerada pelo módulo PV por ano (ver tabela 7.2)})$$

6. Cálculo, por tabela, da quantidade de CO<sub>2</sub> evitada:

$\text{CO}_2$  evitado = TVAU (ver tabela 8.17) x emissões de  $\text{CO}_2$  evitadas anualmente (ver tabela 7.8)

7. Cálculo de acordo com o TVAU dos gráficos de 8.33 a 8.37 da quantidade de  $\text{CO}_2$  evitada:

#### A. Cenário 1

De acordo com os passos citados, os resultados obtidos foram alocados nas tabelas de 8.19 a 8.24 a seguir.

**Tabela 8.19 – Resumo de cálculos de emissões de  $\text{CO}_2$  evitadas para módulos PV com origem e destino na Alemanha – cenário 1**

	PAÍS	FE (kg $\text{CO}_2$ /kWh)	E0/ED	TVAU (anos)
<b>ORIGEM</b>	<b>Alemanha</b>	0,530	1	3,90
<b>DESTINO</b>	<b>Alemanha</b>	0,530		
<b>CO<sub>2</sub> EVITADO</b>	3,90 x 0,530 x 162,06	334,98 (kg $\text{CO}_2$ )		
<b>POR TABELA</b>	3,90 x 85,892	334,97 (kg $\text{CO}_2$ )		
<b>GRAFICAMENTE (gráfico 8.41)</b>	3,90 x 0,530 x 162,06	334,97 (kg $\text{CO}_2$ )		
<b>Média dos valores</b>	334,97 (kg $\text{CO}_2$ )			

**Tabela 8.20 – Resumo de cálculos de emissões de  $\text{CO}_2$  evitadas para módulos PV com origem Alemanha e destino Brasil<sub>SINT</sub> – cenário 1**

	PAÍS	FE (kg $\text{CO}_2$ /kWh)	E0/ED	TVAU (anos)
<b>ORIGEM</b>	<b>Alemanha</b>	0,530	9,81	-85,30
<b>DESTINO</b>	<b>Brasil<sub>SINT</sub></b>	0,054		
<b>CO<sub>2</sub> EVITADO</b>	-85,30x 0,054 x 162,06	-746,48 (kg $\text{CO}_2$ )		
<b>POR TABELA</b>	-85,30x 8,751	-746,46 (kg $\text{CO}_2$ )		
<b>GRAFICAMENTE (gráfico 8.39)</b>	-85,00 x 0,054 x 162,06	-743,85 (kg $\text{CO}_2$ )		
<b>Média dos valores</b>	-745,60 (kg $\text{CO}_2$ )			

**Tabela 8.21 – resumo de cálculos de emissões de CO<sub>2</sub> evitadas para módulos PV com origem Alemanha e destino Brasil<sub>SISO</sub> – cenário 1**

	PAÍS	FE (kg CO <sub>2</sub> /kWh)	E0/ED	TVAU (anos)
<b>ORIGEM</b>	<b>Alemanha</b>	0,530	0,645	7,49
<b>DESTINO</b>	<b>Brasil<sub>SISO</sub></b>	0,821		
<b>CO<sub>2</sub> EVITADO</b>	7,49 x 0,821 x 162,06	996,55 (kg CO <sub>2</sub> )		
<b>POR TABELA</b>	7,49 x 133,051	996,55 (kg CO <sub>2</sub> )		
<b>GRAFICAMENTE (gráfico 8.43)</b>	7,50 x 0,821 x 162,06	997,88 (kg CO <sub>2</sub> )		
<b>Média dos valores</b>	997,00 (kg CO <sub>2</sub> )			

De acordo com os dados obtidos, o ganho com a quantidade de CO<sub>2</sub> evitada em cada caso mostra que a utilização do módulo PV fabricado na Alemanha só possui vantagem de uso quando utilizado no Brasil<sub>SISO</sub>, que possui um FE de CO<sub>2</sub> maior do que o da Alemanha. Se o módulo for exportado da Alemanha para o Brasil<sub>SINT</sub>, haverá prejuízo ambiental, já que o módulo PV, após o término de sua vida útil, ainda terá que amortizar 368,07 kg de CO<sub>2</sub> e não poderá fazê-lo por já ter chegado ao final de sua vida útil. Logo não existe vida ambientalmente útil para o módulo fabricado na Alemanha se o mesmo for utilizado dentro do sistema interligado brasileiro.

## B. Cenário 2

**Tabela 8.22 – Resumo de cálculos de emissões de CO<sub>2</sub> evitadas para módulos PV com origem e destino Brasil<sub>SINT</sub> – cenário 2**

	PAÍS	FE (kg CO <sub>2</sub> /kWh)	E0/ED	TVAU (anos)
<b>ORIGEM</b>	<b>Brasil<sub>SINT</sub></b>	0,054	1	-10,58
<b>DESTINO</b>	<b>Brasil<sub>SINT</sub></b>	0,054		
<b>CO<sub>2</sub> EVITADO</b>	-10,58 x 0,054 x 162,06	-92,59 (kg CO <sub>2</sub> )		
<b>POR TABELA</b>	-10,58 x 8,751	-92,58 (kg CO <sub>2</sub> )		
<b>GRAFICAMENTE (gráfico 8.39)</b>	-10,20 x 0,054 x 162,06	-89,26 (kg CO <sub>2</sub> )		
<b>Média dos valores</b>	-91,47 (kg CO <sub>2</sub> )			

**Tabela 8.23 – Resumo de cálculos de emissões de CO<sub>2</sub> evitadas para módulos PV com origem Brasil<sub>SINT</sub> e destino Alemanha – cenário 2**

	PAÍS	FE (kg CO <sub>2</sub> /kWh)	E0/ED	TVAU (anos)
<b>ORIGEM</b>	<b>Brasil<sub>SINT</sub></b>	0,054	0,102	11,51
<b>DESTINO</b>	<b>Alemanha</b>	0,530		
<b>CO<sub>2</sub> EVITADO</b>	11,51 x 0,530 x 162,06	962,84 (kg CO <sub>2</sub> )		
<b>POR TABELA</b>	11,51 x 85,892	988,62 (kg CO <sub>2</sub> )		
<b>GRAFICAMENTE (gráfico 8.41)</b>	11,50 x 0,530 x 162,06	987,77 (kg CO <sub>2</sub> )		
<b>Média dos valores</b>	979,74 (kg CO <sub>2</sub> )			

**Tabela 8.24 – Resumo de cálculos de emissões de CO<sub>2</sub> evitadas para módulos PV com origem Brasil<sub>SINT</sub> e destino Brasil<sub>SISO</sub> – cenário 2.**

	PAÍS	FE (kg CO <sub>2</sub> /kWh)	E0/ED	TVAU (anos)
<b>ORIGEM</b>	<b>Brasil<sub>SINT</sub></b>	0,054	0,07	12,40
<b>DESTINO</b>	<b>Brasil<sub>SISO</sub></b>	0,821		
<b>CO<sub>2</sub> EVITADO</b>	12,40 x 0,821 x 162,06	1649,84 (kg CO <sub>2</sub> )		
<b>POR TABELA</b>	12,40 x 133,051	1649,83 (kg CO <sub>2</sub> )		
<b>GRAFICAMENTE (gráfico 8.43)</b>	12,30 x 0,821 x 162,06	1636,53 (kg CO <sub>2</sub> )		
<b>Média dos valores</b>	1645,40 (kg CO <sub>2</sub> )			

Fonte: Elaboração própria

Os resultados voltam a validar o que já foi citado. Existe uma vantagem ambiental muito maior quando se fabrica o módulo PV em países com matriz energética mais limpa (baixo FE como o do Brasil<sub>SINT</sub>) e coloca-se o módulo PV para operar em países com matriz energética mais poluente (FE mais alto que o FE do país de origem). Nos dois cenários analisados a maior vantagem ambiental foi encontrada no cenário 2, fabricação do módulo PV no Brasil Sistema Interligado e utilização do módulo no Brasil sistema isolado.

## 8.5 Determinação da adicionalidade

De modo geral, a comparação entre os dois cenários mostra que no cenário 1 a vantagem maior fica por conta do painel fabricado na Alemanha e utilizado no Brasil sistema isolado, já no cenário 2 a vantagem é evidente quando se transporta a tecnologia de fabricação

do módulo PV para um país com um FE de CO<sub>2</sub> muito menor, como é o caso da transferência de tecnologia e montagem de uma fábrica de módulos PV da Alemanha para o Brasil sistema interligado, e utilização do módulo PV em países com maior FE, como Alemanha e Brasil<sub>SISO</sub>. Deste modonota-se que a transferência de tecnologia para a implantação de uma fabrica alemã no sistema interligado brasileiro é bastante vantajosa ambientalmente. Neste caso podem-se levantar os dados relativos ao cálculo da adicionalidade utilizada em projetos de credito 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.

No caso em estudo, deve-se calcular quanto de CO<sub>2</sub> se evitaria com o módulo caso ele fosse fabricado e utilizado na Alemanha e qual a quantidade evitada caso o mesmo módulo fosse utilizado em outro país. Ou ainda, caso a fábrica instalada na Alemanha fosse transferida para o Brasil sistema interligado, qual seria a adicionalidade obtida com esta transferência. Utilizando-se os valores médios encontrados nas tabelas de 8.19 a 8.24 foi elaborada a tabela 8.25 que exhibe os valores de adicionalidade para os casos abordados nos cenários 1 e 2

**Tabela 8.25 – Resumo dos cálculos de adicionalidade para módulos PV de acordo com o país de origem e destino.**

CENÁRIO	PAÍS DE ORIGEM	PAÍS DE DESTINO	QUANTIDADE DE CO <sub>2</sub> EVITADA (kg CO <sub>2</sub> )	ADICIONALIDADE (kg ECO <sub>2</sub> )
1	Alemanha	Alemanha	334,97	-745,60 (*)
	Alemanha	Brasil <sub>SINT</sub>	-745,60	
	Alemanha	Alemanha	334,97	997,88-334,97=662,91
	Alemanha	Brasil <sub>SISO</sub>	997,88	
2	Brasil <sub>SINT</sub>	Brasil <sub>SINT</sub>	-91,47	979,74-(-91,47)=1071,21
	Brasil <sub>SINT</sub>	Alemanha	979,74	
	Brasil <sub>SINT</sub>	Brasil <sub>SINT</sub>	-91,47	1645,53-(-91,47)=1737,00
	Brasil <sub>SINT</sub>	Brasil <sub>SISO</sub>	1645,53	

(\*) – neste caso, além de não conseguir amortizar a gasto energético e de emissões de CO<sub>2</sub> durante sua vida útil, o módulo PV ainda fica com um débito de CO<sub>2</sub> a ser amortizado.

Observando-se a tabela 8.25 pode-se afirmar que as adicionalidades conseguidas no cenário1 são muito menores do que as alcançadas no cenário 2, cerca de 262,03%, considerando apenas os valores positivos encontrados. Deste modo pode-se afirmar que a fabricação de painéis no Brasil<sub>SINT</sub> e sua utilização em países com uma matriz energética mais

poluente, como é o caso da Alemanha, é mais interessante do ponto de vista da adicionalidade, do que a fabricação dos módulos na Alemanha e utilização em países com uma matriz energética mais limpa como a do Brasil<sub>SINT</sub>.

Salienta-se que em termos gerais, a adicionalidade alcançada com a fabricação de módulos PV dentro do sistema interligado brasileiro e sua utilização dentro do sistema isolado foi o maior valor de adicionalidade encontrado em ambos os cenários

Outro fator chama a atenção com relação às curvas formadas nas figuras 8.33 a 8.37, 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 EO/ED indica o quanto o FE de CO<sub>2</sub> do país de origem (EO) 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. Por exemplo no caso país de destino Alemanha e país de origem Brasil<sub>SINT</sub> tem-se:

- EO – 0,054 kg de CO<sub>2</sub>/kWh
- ED – 0,530 kg de CO<sub>2</sub>/kWh
- EO/ED – 0,102 kg de CO<sub>2</sub>/kWh

$$\frac{EO}{ED} = 0,102 \rightarrow EO = 0,102 * ED \quad (8.13)$$

O fator de emissão de CO<sub>2</sub> da Alemanha é 981,48% maior do que o da Brasil<sub>SINT</sub>. Logo, apresentado nas figuras 8.33 a 8.37 a relação TVAU versus EO/ED, sabendo-se o valor de EO/ED e o número de anos em que vai-se operar 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 das figuras citados (8.33 a 8.37), 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 na figura 8.32, 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 “seqüestrado” 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 “seqüestrar” 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, “seqüestrando” esta quantidade de CO<sub>2</sub> das centrais de geração de energia elétrica.

## CAPÍTULO 9 – RECOMENDAÇÕES E CONCLUSÕES

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.

Por exemplo, no caso do alumínio, é necessária a extração de 5 toneladas de bauxita para a obtenção de 2 toneladas de alumina e posteriormente 1 tonelada de alumínio. De acordo com o setor de gerenciamento de Planejamento e Controle de Produção da Mineradora Rio do Norte - MRN, a relação estéril/minério (REM - volume de estéril necessário para se remover uma unidade de massa de minério, um dos principais parâmetros de planejamento de produção mineral) média praticada pela MRN é de 1 m<sup>3</sup>/t. Sendo assim a área necessária para se extrair 1 t de minério é, em média, 1 m<sup>2</sup>. Este valor pode variar e não representa uma regra fixa para os depósitos de bauxita ou demais depósitos de minerais em geral. Deste modo para obter uma tonelada de alumínio é necessário à mineração de 5 m<sup>2</sup> de área. Levantando-se o custo de recuperação ambiental de uma área de mineração de bauxita é possível obter o custo de recuperação da área degradada para a obtenção de 2,6 kg de alumínio utilizado na produção de um módulo fotovoltaico.

De posse destes custos basta conhecer o custo por kWh de energia praticado pela concessionária de energia elétrica no local onde o módulo vai operar e calcular quanto tempo ele deve funcionar para economizar em termos monetários e em geração de energia fotovoltaica, a quantidade de energia elétrica necessária para cobrir estes custos monetários e custear a mitigação do impacto gerado pela obtenção da bauxita.

Outro fator a ressaltar é a produção da bateria de chumbo-ácido, com relação ao passivo ambiental gerado neste caso, existe uma vantagem ambiental com relação a produção de baterias no Brasil, já que o país tem que reciclar a maioria dos rejeitos de chumbo para a fabricação de baterias por não possuir grandes reservas de chumbo primário, retirado das minas, isto faz com que o Brasil tenha que importar o chumbo utilizado na fabricação das baterias ou utilizar o chumbo secundário, obtido através do refino do material reciclado após o uso das baterias descartadas. Este estudo não incluiu a extração do minério de chumbo nas considerações sobre o passivo ambiental, porém, caso seja necessário incluir na matriz de

impactos os dados relativos à mineração do chumbo utilizado na fabricação de baterias de chumbo-ácido, O Brasil teria um passivo ambiental gerado pela fabricação destas baterias muito menor do que os demais países analisados.

Com relação à amortização dos custos energéticos, todos os casos analisados conseguem amortizar estes custos, calculado em 5,39 anos, antes do final da vida útil do módulo PV, definida em 25 anos. No entanto os custos ambientais, dependendo do local de produção/operação podem exigir um tempo para a amortização muito maior do que o tempo de vida útil do módulo PV. Com o exemplo deste prejuízo ambiental cita-se a adicionalidade encontrada no cenário 1 quando o módulo fabricado na Alemanha é posto para operar no Brasil<sub>SINT</sub>.

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, como é o caso do módulo fabricado no Brasil<sub>SINT</sub> e posto para operar na Alemanha e no Brasil<sub>SISO</sub>.

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, como exemplo tem-se o módulo fabricado na Alemanha e utilizado no Brasil<sub>SINT</sub>. Neste caso pode ocorrer a inexistência de vida ambientalmente útil o que torna a operação do módulo ambientalmente inviável. Com estas considerações, evidencia-se a vantagem ambiental da utilização do Brasil<sub>SINT</sub> na fabricação de módulos PV e sua posterior exportação para países com um FE maior do que o do Brasil<sub>SINT</sub>, como é o caso do Japão, Alemanha, Estados Unidos e Brasil<sub>SISO</sub>.

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 MDL que envolvam plantas com módulos PV. Caso se verifique a veracidade desta possibilidade deve ser considerada a utilização dos resultados obtidos para formulação de projetos de MDL

favorecendo a utilização dos módulos fabricados no Brasil<sub>SINT</sub> em outros países, desde que estes possuam uma matriz energética com FE maior do que a do Brasil<sub>SINT</sub>. 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 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 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.

Outro fator a ser mencionado é 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.

Com relação aos custos de amortização do passivo ambiental gerado durante a fabricação do módulo PV, de acordo com o que foi citado ao longo dos capítulos 7 e 8, é necessária uma abordagem mais detalhada e com a inclusão de novos dados para uma análise mais completa da matriz de impactos ambientais utilizada neste estudo. Um exemplo de atuação destes novos dados pode ser implementado a partir do custo monetário necessário para a recuperação das áreas mineradas para a obtenção de matéria-prima para a produção de alumínio. Verificando a quantidade de bauxita necessária para a produção do alumínio utilizado para na fabricação de um módulo fotovoltaico e qual é a área a ser minerada para que esta quantidade seja obtida, é possível avaliar qual o custo monetário exigido para recuperar a área minerada utilizada. O mesmo raciocínio pode ser seguido para as demais partes que compõe o módulo (vidro, célula de silício, bateria de chumbo-ácido etc).

---

Salienta-se, neste caso, a necessidade de um estudo mais detalhado dos impactos abordados na matriz de correlação utilizada, para a posterior inclusão de colunas que digam respeito aos custos econômicos e a valoração dos impactos. Tal empreendimento tornará mais preciso o processo de análise dos custos de mitigação do passivo ambiental dos processos analisados. Neste caso, como recomendação cabe afirmar que é necessário verificar a capacidade não só de equilíbrio energético e de mitigação das emissões de CO<sub>2</sub> das fontes de energia renovável. É preciso também verificar se o passivo ambiental gerado no processo de fabricação dos equipamentos utilizados por esta fonte renovável pode ser amortizado pela mesma ao longo de sua vida útil.

Também como recomendação cabe a utilização, em estudos e análises de futuros projetos que envolvam módulos PV, dos conceitos citados neste estudo, considerando tanto a relação existente entre os fatores de emissão de CO<sub>2</sub> dos países de origem e destino do módulo PV quanto o tempo de vida ambientalmente útil do mesmo.

Como comentários finais, pode-se declarar que a fabricação de módulos em países com uma matriz energética menos poluente, como a do Brasil<sub>SINT</sub>, para posterior exportação para países com uma matriz energética mais poluente, como Japão, Alemanha, EUA e Brasil<sub>SISO</sub> sistema isolado, além de possuir uma maior vantagem ambiental, gera também uma adicionalidade interessante o bastante para ser utilizada em projetos de MDL para a aquisição de Créditos de Carbono. 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.

## CAPÍTULO 10 – 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
- Alsema, Erik ; Nieuwlaar, Evert, (2000), Energy Viability of Photovoltaic Systems. Energy Policy. 28 (2000) p.999-1010.
- Alsema. E.A; Wild-Scholten, J. de. (2005). Environmental Life Cycle Inventory of Crystalline Silicon Photovoltaic Module Production, Proceedings of the Materials Research Society Fall 2005 Meeting, Symposium G, Boston, USA, 2005, / material disponível on line em: [www.mrs.org](http://www.mrs.org)
- Baratz, Fani, (2002). Avaliação de Passivos Ambientais: Roteiros Técnicos - ELETROBRÁS.- Departamento de Engenharia e Meio Ambiente- DEA. / Centrais Elétricas Brasileiras S.A., DEA. – 125p. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2000.
- Barbosa, Tânia A. de Souza, (2004) Análise de Impactos Ambientais e proposta para quantificação em PCHs. Estudo de Caso da PCH Ninho da águia, Delfim Moreira, MG. Itajubá, 2004, 99p, Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI.
- Bayardino, Renata Argenta, (2004). A PETROBRAS e o desafio da sustentabilidade ambiental. Rio de Janeiro, 2004. 65p. Monografia de Bacharelado - Universidade Federal do Rio de Janeiro Instituto de Economia
- Costa, Ricardo Cunha; Prates, Cláudia Pimentel, (2005). O perfila das fontes Renováveis de Energia no desenvolvimento do Setor Energético e Barreiras a sua Penetração no mercado.s.l.,s.ed.,n.p.
- 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.
- Ferreira, Elaine Framil. Avaliação do curso sobre agroenergia e seus impactos sociais: um estudo de caso. Itajubá: [s.n.], 2004. 101p. Dissertação (Mestrado em Engenharia da Energia)-UNIFEI.
- Freitas, Carlos Roberto de (2004), Caracterização Qualitativa dos Agentes Poluentes da Indústria de Baterias Ortox e Avaliação do seu Potencial Poluente. Curitiba. 2004. 53p. Trabalho de Conclusão de Curso para o Curso de Engenharia

- Ambiental. Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia.
- Geller, Howard Steven., (2003). Revolução energética: políticas para um futuro sustentável – Rio de Janeiro – Relume Dumará : USAid, 2003
- Instituto Serrano Neves, (2006). Ativos e Passivos Sócio-ambientais versão 1.1 (documento em código livre) - Uruaçu-GO- 2006
- Kim, Mi Ra et al (2000). Ciclo de Vida de los Paneles Solares. Revista de Tecnología y Ciencia – Universidad Tecnológica nacional n°13, p24-33, año 6, Republica Argentina, 2000.
- Kowalski, Fabio Darci (2005). Estudo realizado pela Fundação Universidade Regional de Gurupi, Universidade Regional de Blumenau, Universidade Regional de Blumenau. / material disponível on line em: <http://www.congressoeac.locaweb.com.br/artigos62006/621.pdf>
- Kraemer, Maria Elisabeth Pereira. Passivo Ambiental. Monografia. Universidade do vale do Itajaí – UNIVALE / material disponível on line em: <http://br.monografias.com/trabalhos/passivo-ambiental/passivo-ambiental.shtml>
- Krauter, Stefan; Rütther, Ricardo. (2003). Considerations for the Calculations of greenhouse Gás Reduction by Photovoltaic Solar Energy. Renewable Energy 29. p.345-355
- Maciel, Nelson Fernandes; Lopes, José Dermeval Saraiva, (1999). Energia Solar para o Meio Rural – Fornecimento de Eletricidade. Viçosa, Centro de Produções Técnicas – CPT, 1999. 88p
- 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.
- Nogueira, Luiz Augusto Horta (2001), Energia: Conceitos e Fundamentos, Cap. I in Conservação de Energia – Eficiência Energética de instalações e equipamentos. Itajubá, Eletrobrás/PROCEL – unifei – 2001. P1-29
- Ometto, Aldo Roberto, (2005). Avaliação do Ciclo de Vida e a Gestão Pós Consumo de Produtos Eletroeletrônicos. / Apresentado no 2<sup>o</sup> Mini-Curso do VI Workshop de Adequação Ambiental em Manufatura. 2005.
- Plano Nacional de Energia 2030 . Ministério de Minas e Energia ; colaboração Empresa de Pesquisa Energética . Brasília, : MME : EPE, 2007.p. 324 – Material disponível on line em: <http://www.mme.gov.br/>

- Reis, Tereza V. Mousinho, (2003). Emissão de Gases de Efeito estufa no sistema Interligado Nacional – Metodologia para Definição da Linha de Base e Avaliação do potencial de Redução das Emissões do PROINFA, Salvador, 2002, n.p. Dissertação (mestrado) – Universidade de Salvador – UNIFACS.
- Resenha Energética Brasileira, Exercício de 2007 (edição final) – outubro 2008 – Ministério de Minas e Energia – MME / Material disponível on line em: <http://www.mme.gov.br/>
- Rosa, Carlos Adriano, Solar / Carlos Adriano Rosa e Geraldo Lúcio Tiago Filho; Itajubá, MG: FAPEPE, 2007, 44p.: Il.-(Série Energias Renováveis)
- Scheer, Hermann, (2002) Economia Solar Global. Estratégia para a Modernidade Ecológica. CRESESB-CEPEL – Rio de Janeiro, 2002.
- Silva, Ademir Brandão (2001). Gestão ambiental na indústria: uma avaliação do comportamento dos setores químico e petroquímico com relação aos passivos ambientais e os problemas causados em torno da Baía de Guanabara. 2001.118 p. dissertação (Mestrado) Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública.
- Switkes, Glenn Ross (2005). Impactos Ambientais e Sociais da Cadeia produtiva do Alumínio na Amazônia – ferramentas para Trabalhadores, as Comunidades e os Ativistas. Relatório para o Programa na América latina, International Rivers Network – IRN. Santarém. 2005 53p. / material disponível on line em: [http://www.irn.org/pdf/aluminum/Foiling2005\\_po.pdf](http://www.irn.org/pdf/aluminum/Foiling2005_po.pdf)
- Tiago Filho, Geraldo Lúcio et al, (2007). Um Panorama das pequenas Centrais no Brasil. PCH Notícias & SHP news. Ano 9, revista nº33, março/abril/maio 2007. / No prelo/
- 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.
- Tolmasquim, M. T.(organizador), (2003). Fontes Renováveis de Energia no Brasil. Cap. 6 Fraindenraich, Naum, paginas 281-335. Rio de Janeiro. Interciência: CENERGIA, 2003.
- Ventura, Elvira Cruvinel Ferreira, (2006). Boletim Responsabilidade Social e Ambiental do Sistema Financeiro, Banco Central do Brasil, Diretoria de Normas e Organização do Sistema Fiannceiro, Ano 1, número 2, janeiro de 2006

**Sites consultados:**

- <http://www.carbonobrasil.com/> - Último acesso em: dezembro 2006
- <http://www.iea.org> - Último acesso em: 27/10/2006
- <http://www.mme.gov.br/> - Último acesso em: 15/11/2006
- <http://www.ambientebrasil.com.br/> - Último acesso em: 05/05/2007
- [www.suldistribuidora.com.br](http://www.suldistribuidora.com.br) - Último acesso em: 26/07/2006
- [www.elcose.it](http://www.elcose.it) - Último acesso em: 12/07/2006
- <http://www.sunlab.com.br/energiasolar.htm> - Último acesso em: 03/04/2007
- [www.fusivel.com.br](http://www.fusivel.com.br) - Último acesso em: 16/03/07
- [www.cresesb.cepel.br/visitavirtual\\_cse.htm](http://www.cresesb.cepel.br/visitavirtual_cse.htm) - Último acesso em: outubro/2006
- [www.solener.com](http://www.solener.com) - Último acesso em: agosto/2006
- [www.heliodinamica.com.br](http://www.heliodinamica.com.br) - Último acesso em: 01/12/2006
- <http://www.cvrld.com.br> - Último acesso em: 07/02/2007
- [http://www.qal.com.au/a\\_process/a\\_process.html](http://www.qal.com.au/a_process/a_process.html) - Último acesso em:
- <http://www.world-aluminum.org/production> - Último acesso em: 07/02/2007
- <http://www.albras.net> - Último acesso em: 07/02/2007
- <http://www.abividro.org.br/> - Último acesso em: 05/02/2007
- <http://www.ii.ua.pt/uimc/divulga/fabrico3b.html> - Último acesso em: 07/02/2007
- [http://mswebs.naist.jp/LABs/shiosaki/Gallery/Experiment/GalleryExpCZ\\_E.html](http://mswebs.naist.jp/LABs/shiosaki/Gallery/Experiment/GalleryExpCZ_E.html)  
Último acesso em: 07/02/2007
- <http://www.siliconfareast.com/crystal.htm> - Último acesso em: 05/02/2007
- <http://www.sehmy.com/Product/abtWafers.htm> - Último acesso em: 08/02/2007
- [www.imselectronica.com/productos/maquinas-serigrafia-silicio-m.htm](http://www.imselectronica.com/productos/maquinas-serigrafia-silicio-m.htm) - Último acesso em: dezembro/2006
- [http://www.tandar.cnea.gov.ar/grupos/solar/crecim\\_f.html](http://www.tandar.cnea.gov.ar/grupos/solar/crecim_f.html) - Último acesso em: abril/2007
- [http://nautilus.fis.uc.pt/wwwqui/figuras/fig\\_compostos08.html](http://nautilus.fis.uc.pt/wwwqui/figuras/fig_compostos08.html) - Último acesso em: 05/05/2007
- <http://www.aca.org.ar/servicios/baterias/index> - Último acesso em:
- [www.energystar.gov](http://www.energystar.gov) - Último acesso em: 09/07/2006
- <http://www.cdcc.sc.usp.br/elementos/chumbo.html> - Último acesso em: junho/2006
- [http://nautilus.fis.uc.pt/wwwqui/figuras/fig\\_compostos08.html](http://nautilus.fis.uc.pt/wwwqui/figuras/fig_compostos08.html) - Último acesso em: 28/11/2006

# ANEXO I

# 1 A fabricação do alumínio

## Etapas do processo de fabricação do alumínio:

### 1.1. Extração do minério de Bauxita

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. Após a lavra da bauxita, seu beneficiamento é feito através da lavagem da bauxita, ainda em estado bruto, para que se possam remover os minerais de argila. A massa restante, cerca de 70% a 75% desta massa é produto final. A figura 1 mostra como é feito a extração da bauxita.

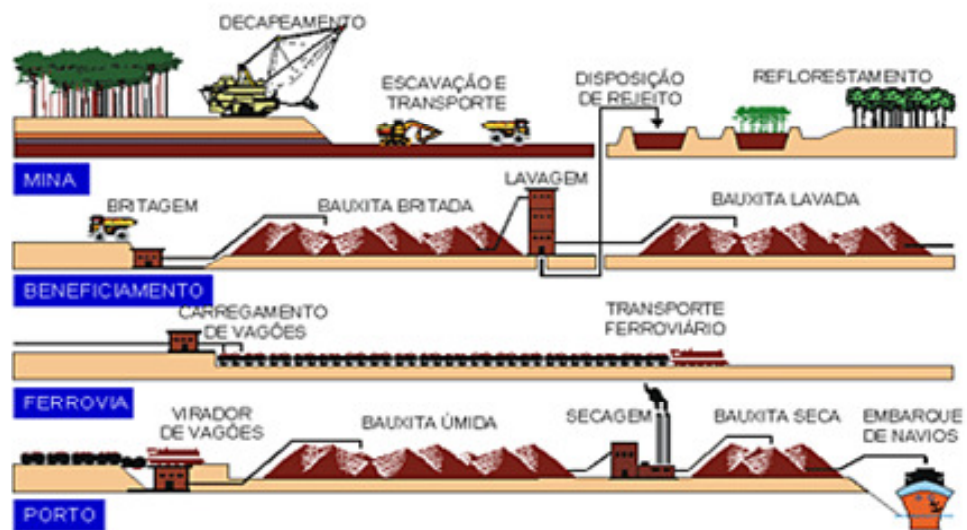


Figura 1- Seqüencia operacional para a extração da bauxita

Fonte: <http://www.cvrd.com.br>

### 1.2. Obtenção da Alumina em grau metalúrgico pelo processo Bayer

A alumina é obtida a partir da bauxita ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot x \text{H}_2\text{O}$ ) moída e tratada com uma solução de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) a 25% em uma temperatura entre 200 a 240 °C, formando o aluminato de sódio ( $\text{NaAlO}_2$ ). Em seqüência o material é esfriado e diluído em água formando um composto insolúvel chamado de alumina hidratada ( $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ). A próxima etapa é a

precipitação, posteriormente o material é lavado e filtrado. A solução final (NaOH) é concentrada e re-introduzida no processo. Ao final, a alumina hidratada sofre um processo de calcinação, onde é aquecida a uma temperatura acima de 1000 °C para eliminação da água. Ao final é obtido o óxido de alumínio ou alumina, um pó branco e fino de alta pureza com pequenas quantidades de óxidos de silício, sódio, cálcio e outras impurezas.

### 1.3. Obtenção do alumínio anodizado pelo processo Hall Heroult

Esta parte do processo é caracterizada pelo alto consumo de energia elétrica. O processo consiste da redução por corrente elétrica (eletrólise) da alumina em grau metalúrgico para o alumínio primário. O processo se desenvolve em fornos especiais, revestidos de carbono, chamados de cubas eletrolíticas, a aproximadamente 960°C. As cubas possuem dois eletrodos de carbono e um banho de criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ) como solvente do óxido de alumínio, a criolita é utilizada como meio apropriado para que a reação se realize em nível industrial. A temperatura de operação varia entre 950 a 965 °C. Como o alumínio possui ponto de fusão em 660°C, ele permanece em estado líquido. Durante a eletrólise existe a emissão de CO e CO<sub>2</sub>. Salienta-se que este banho eletrolítico não se constitui como um resíduo porque pode ser reutilizado em novas cubas ou vendido. Os anodos quando são retirados das cubas, com cerca de 25% de seu tamanho original, são moídos e misturados com o coque para fabricar um novo anodo, deste modo o carbono é reciclado.

Para este processo, o forno possui 2 componentes principais: os anodos, dispostos na parte superior, e o cátodo, ou cuba propriamente dita, onde se processa a eletrólise. A figura 2 mostra uma imagem da bauxita, da alumina e do alumínio. Já a figura 3 mostra de modo simplificado, o processo de produção do alumínio desde a extração da bauxita até a formação do lingote. A figura 4 mostra um exemplo de fornos utilizados na produção do alumínio e a figura 5 exhibe um esquema simplificado da cuba eletrolítica



Figura 2 – bauxita, alumina e alumínio (na seqüência , de cima para baixo)

Fonte: [http://www.qal.com.au/a\\_process/a\\_process.html](http://www.qal.com.au/a_process/a_process.html)

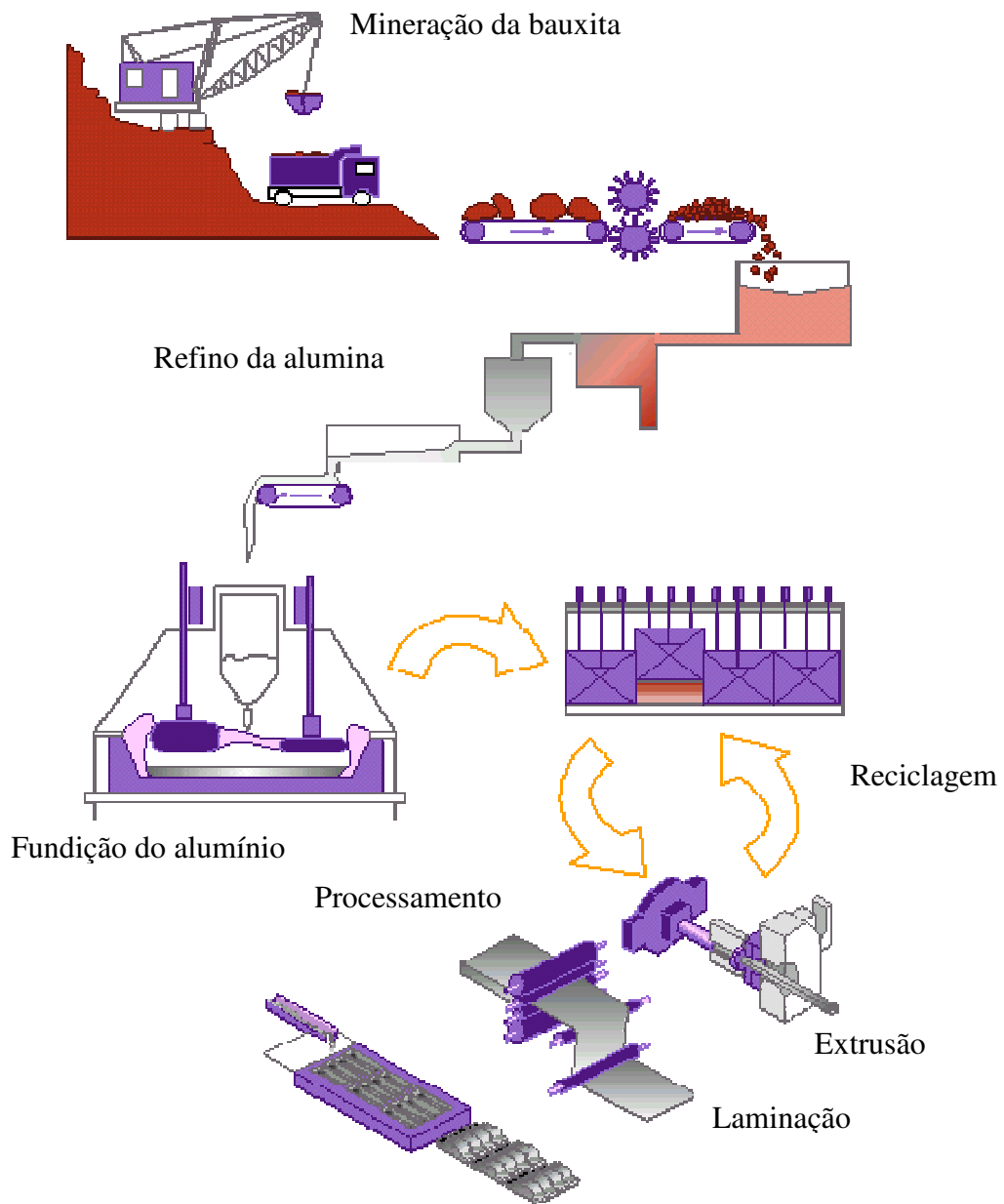


Figura 3 – Processo de Formação dos lingotes

Fonte: <http://www.world-aluminum.org/production>

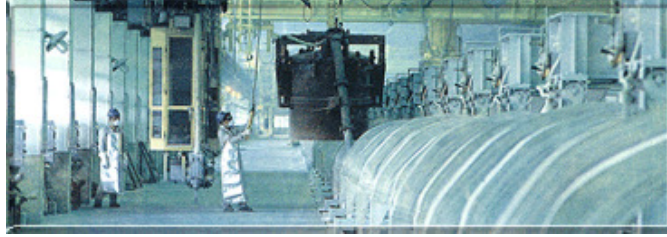


Figura 4 – Fornos de alumínio

Fonte: <http://www.albras.net>

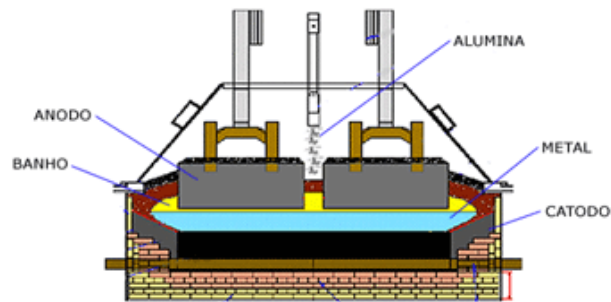


Figura 5 - Cuba eletrolítica

Fonte: <http://www.albras.net>

Em cada cuba é injetada uma corrente positiva que é transportada pela criolita por meio de um anodo para o catodo submerso, a passagem da corrente decompõe a alumina em alumínio e oxigênio. Este reage com o carbono do anodo (eletrodo positivo) e o metal se deposita no catodo (eletrodo negativo) sob a forma líquida. O alumínio líquido, é então retirado periodicamente das cubas, é transferido para cadinhos que vão até os fornos de espera. Posteriormente seguem para máquinas lingoteiras, onde é conformado e resfriado, para produção dos lingotes de alumínio. O processo seguinte é o de confecção dos perfis de alumínio para a moldura. Segundo a Associação Brasileira de Alumínio – ABAL (2007), o Brasil, além da terceira maior jazida de bauxita do planeta, é o quinto maior produtor de alumina e o sexto em alumínio primário. As reservas brasileiras caracterizam-se por serem tanto de grau metalúrgico (83,7%), para a produção de alumina, e de grau não-metalúrgico ou refratária (16,3%), utilizada na produção da indústria química (sulfato de alumínio), de abrasivos e de cimento (aluminoso) e refratários. A figura 6 mostra um fluxograma simplificado das fases de produção do Alumínio, e dos principais insumos necessários para a produção de Alumínio para a montagem do módulo fotovoltaico.

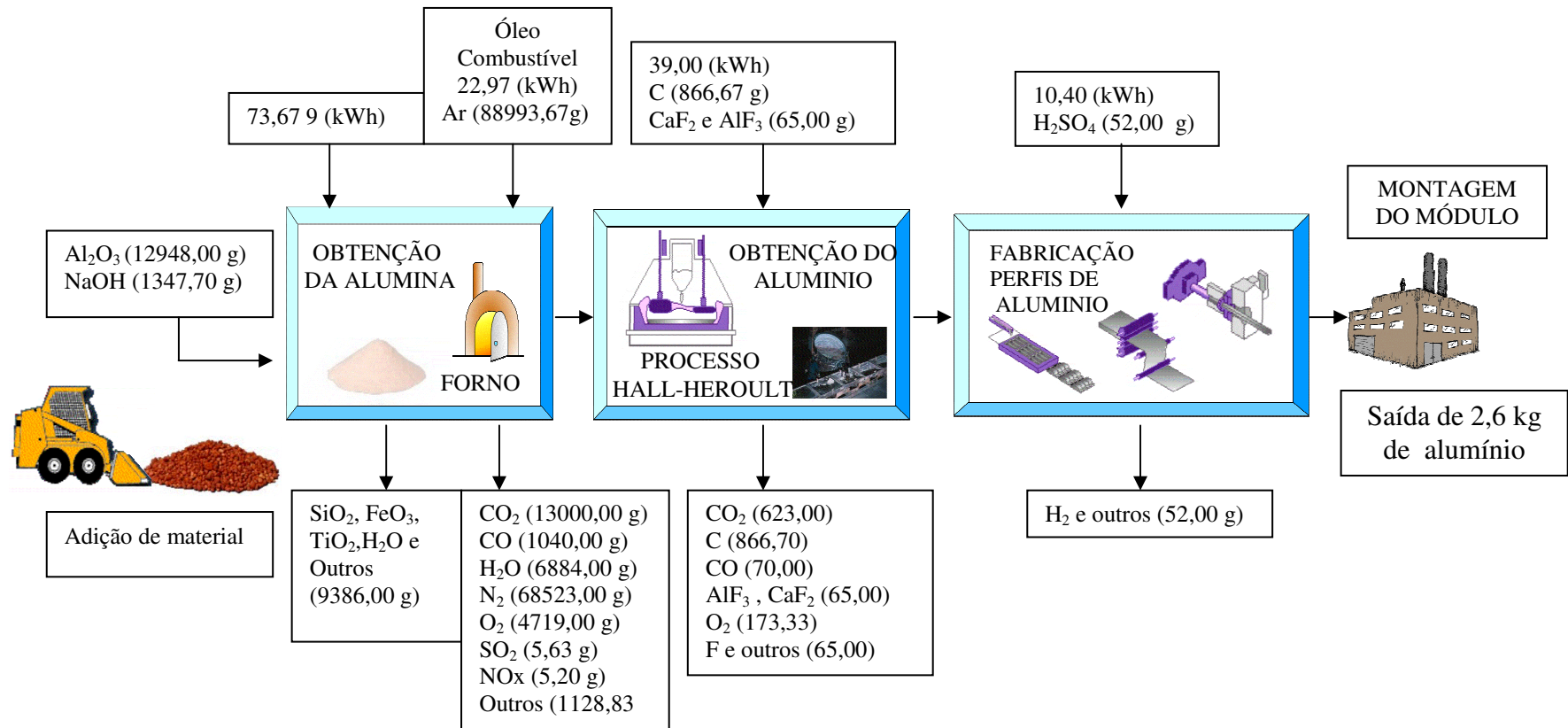


Figura 6 – fluxograma das fases de produção do perfil de alumínio anodizado.

Fonte: Elaboração própria á partir de Kim et al (2000)

# ANEXO III

## 1. A fabricação do vidro plano

### Étapas da fabricação do vidro plano:

- 1.1 Peneiramento:** As matérias primas básicas (carbonato de sódio, carbonato de cálcio, carbonato de magnésio, água e dióxido de silício) são pesadas, dosadas e purificadas.
- 1.2 Secagem:** Os elementos são secos com a utilização de uma corrente de ar seco.
- 1.3 Mistura:** Nesta etapa os materiais são misturados e homogeneizados em uma misturadora fechada.
- 1.4 Fusão:** O local onde a composição é aquecida e transformada em vidro fundido é chamado de forno de fusão ou simplesmente forno. Os fornos utilizados são todos contínuos, constituídos de uma grande piscina de vidro fundido. Os componentes sólidos são levados aos fornos e aquecidos a uma temperatura que varia entre 1600 a 1800 °C, até atingir um estado vítreo e estarem prontos para a moldagem. Para alcançar o estado vítreo, ou seja, uma consistência muito semelhante a do melado, o material sofre um resfriamento gradual até alcançar a temperatura de 800 °C. À medida que o vidro fundido vai esfriando, vai ficando cada vez mais viscoso. Existe um intervalo de tempo certo para se conseguir dar a forma ao produto. No início, a massa deve estar mole o suficiente para poder ser conformada, mas não mole em excesso, pois é impossível conformar um líquido, Nesta etapa é usual a utilização do gás natural para o aquecimento dos fornos.
- 1.5 Têmpera e estiramento:** O vidro obtido é esfriado por igual sob condições controladas até atingir uma temperatura de 100 °C. O processo de resfriamento é realizado com a utilização de água e ventilação. A têmpera e

o estiramento são realizados em conjunto com a utilização de uma máquina de estiragem composta por cilindros por onde passa a massa vítrea.

**1.6 Recozimento:** As lâminas obtidas na etapa anterior são introduzidas em um forno de recozimento onde são rapidamente aquecidas e em seguida sofrem um brusco resfriamento para que sejam extraídas as tensões superficiais do material.

**1.7 Acabamento:** As lâminas são polidas com areia para se obter um polimento mais grosseiro, logo depois as lâminas sofrem um polimento com materiais mais finos, como o óxido de selênio, alcançar um polimento mais fino.

**1.8 Corte:** Com a utilização de mesas com ferramentas adiamantadas, a superfície da lâmina é marcada com o desenho do corte e em seguida é feito um esforço de tração sobre a lâmina para que a fissura obtida pela ferramenta se propague por toda a espessura do material e o corte seja finalizado.

A maior parte dos custos da produção do vidro plano está concentrada na construção das instalações necessária para a sua produção.

A figura 1 mostra o fluxograma simplificado das fases de produção do vidro e do fluxo de entrada e saída de materiais utilizados na fabricação do vidro temperado e com baixo teor de ferro utilizado na fabricação dos painéis fotovoltaicos

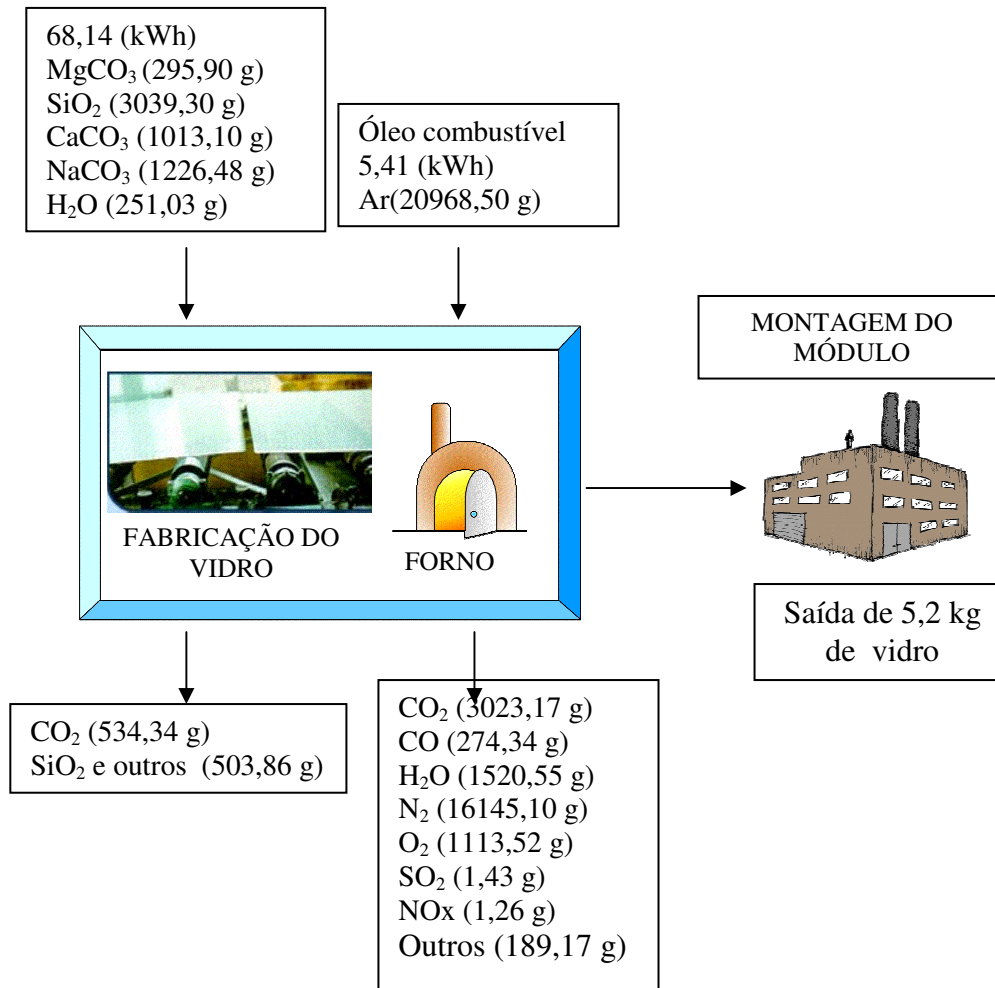


Figura 1 - Fluxograma das fases de produção do vidro para o módulo fotovoltaico.

Fonte: Elaboração própria á partir de Kim et al (2000)

# ANEXO III

## 1. A fabricação da célula de silício e montagem do módulo fotovoltaico

### Étapas da fabricação das células de silício:

**1.1 Mineração e refino de sílica:** : O quartzo e a areia são o material base para a produção de sílica ( $\text{SiO}_2$ ). Considerando que a areia é um material abundante, não é esperado o esgotamento da matéria prima para a produção do silício. Durante o processo de classificação e preparação da areia, para utilização da sílica, as emissões do processo são desprezíveis, com exceção da liberação do pó respirável. Este pó contém cerca de 17% de partículas de sílica.

**1.2 Redução da sílica para silício:** A sílica pode ser reduzida a silício de acordo com a reação abaixo:



O silício resultante é utilizado principalmente em usinas metalúrgicas, por isso recebe o nome de silício de grau metalúrgico (mg-Si). Durante este processo são liberados CO, SiO, metano ( $\text{CH}_4$ ),  $\text{CO}_2$  e etano ( $\text{C}_2\text{H}_6$ ). Ao reagirem com o oxigênio do ar estes componentes resultam em  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{NO}_x$ .

Durante o processo, os rejeitos são armazenados e vendidos como um subproduto, os particulados de sílica são coletados por um filtro. O resíduo do filtro contém cerca de 96,5% de  $\text{SiO}_2$  e é considerado como um rejeito sólido.

No próximo estágio, o silício é levado para a fundição para redução das impurezas de cálcio e do alumínio, resultando no chamado Silício de grau metalúrgico (mg-Si) com 99,6% de pureza.

**1.3 Produção de Silício de alto grau de pureza:** Como o silício de grau metalúrgico possui muitas impurezas, inviabilizando sua utilização em aplicações com semicondutores e para geração de energia solar, é necessário produzir o silício com um grau de pureza ainda maior, o chamado silício de grau eletrônico (eg-Si).

Normalmente estes semicondutores possuem grau de pureza maior que 99,9999%, porém o método utilizado para sua obtenção (Método Siemens) é caro e de baixo rendimento. No entanto, para utilização em geração de energia solar não é necessária uma pureza tão elevada, por isso podem ser utilizados materiais que não satisfaçam por completo as exigências da indústria dos semicondutores. Para evitar a dependência do mercado de produção de eg-Si, foi desenvolvido um processo para produção do silício de grau solar (sog-Si). Neste processo ocorre a liberação de pequenas quantias de gases ambientalmente inofensivas ( $\text{CaCl}_2$  e  $\text{SiO}_2$ ). Utilizando um processo de redução carbotérmica, da sílica de alta pureza com carbono de alta pureza temos uma queda na exigência de energia para o processo.

**1.4 Produção da célula de silício:** Através do método Czochralski: o silício extremamente puro de grau solar (sog-Si) se funde em um forno, a uma temperatura de  $1400\text{ }^\circ\text{C}$ , junto com uma pequena proporção de boro. Quando todo o material estiver em um estado líquido é introduzida, no centro desta massa, uma haste que possui em seu extremo uma gema de cristal de silício. Sobre este cristal, vão se depositando os átomos provenientes da massa líquida de silício. Esta deposição é lenta, porém os átomos se depositam de modo perfeitamente ordenado seguindo a estrutura do cristal que foi adicionado a massa. Deste modo se obtém um cilindro formado por um monocristal de silício. As figuras 1 e 2 mostram o crescimento de um lingote de silício mono-cristalino pelo processo Czochralski.

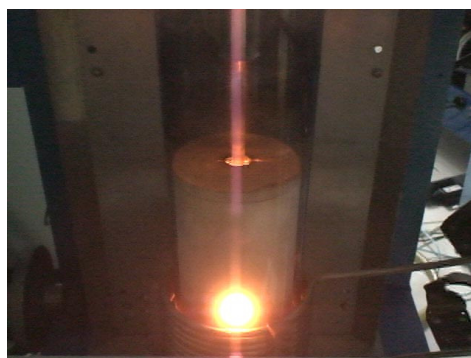


Figura 1 - Crescimento de um lingote de silício mono-cristalino através de método Czochralski

Fonte:[http://mswebs.naist.jp/LABs/shiosaki/Gallery/Experiment/GalleryExpCZ\\_E.html](http://mswebs.naist.jp/LABs/shiosaki/Gallery/Experiment/GalleryExpCZ_E.html)

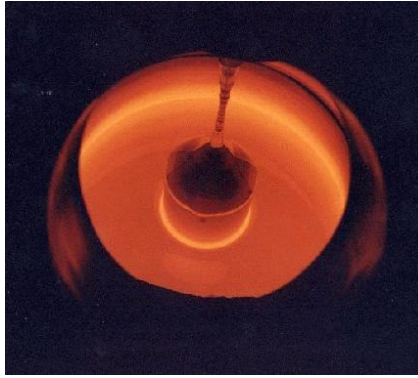


Figura 2 - Crescimento de um lingote de silício mono-cristalino – vista superior

Fonte: [http://www.tandar.cnea.gov.ar/grupos/solar/crecim\\_f.html](http://www.tandar.cnea.gov.ar/grupos/solar/crecim_f.html)

A figura 3 mostra o equipamento utilizado para realização do crescimento do lingote.



Figura 3 – Forno para crescimento de um cristal de silício.

Fonte: <http://www.siliconfareast.com/crystal.htm>

Para a formação de silício poli-cristalino, o processo utilizado é o derretimento do silício de alta pureza em uma atmosfera inerte (gás argônio), posteriormente o material é vertido em um forno de grafite, para ser solidificado em condições térmicas controladas, convertendo-se em grandes blocos de silício poli-cristalino (p-Si).

Neste processo ocorre o surgimento de imperfeições na parte externa do bloco de Silício. Por isso esta parte externa é recortada do bloco, gerando uma perda de cerca de 20% de material. Após o recorte, o bloco é cortado em blocos menores, com uma área seccional de  $12,5 \times 12,5 \text{ cm}^2$ .

**1.5 Montagem dos “Wafers” (bolachas) de Silício:** Após a obtenção do bloco de silício, ele é cortado em fatias finas (bolachas) de 300  $\mu\text{m}$  de espessura. O corte é feito com a utilização de um fio metálico e com um líquido que possui algumas partículas abrasivas utilizado para o resfriamento do corte. Depois de cortadas as bolachas são limpas, enxaguadas e secas. O silício perdido é descartado juntamente com o líquido utilizado durante o corte. A figura 4 mostra o equipamento utilizado para cortar o lingote. A figura 5 exhibe dois tipos de lingote e algumas peças já cortadas.



Figura 4 – equipamento utilizado para cortar o lingote

Fonte: <http://www.siliconfareast.com/crystal.htm>



Figura 5 – lingotes de silício e peças já cortadas a partir dos lingotes

Fonte: <http://www.sehmy.com/Product/abtWafers.htm>

**1.6 Gravação e texturização dos “wafers”:** Na fase anterior, danos são causados à superfície das bolachas de silício. Para sanar este problema, os danos são removidos com a cauterização química da superfície das bolachas. Depois, elas são enxaguadas com água e ácido sulfúrico concentrado. Este processo ocasiona

emissões de  $H_2$ ,  $H_2O$ ,  $NaSO_4$ ,  $NaSiO_4$ . O processo de texturização fornece as bolachas uma superfície áspera e que produz um caminho óptico mais longo para a passagem da luz que entra na célula. A partir deste ponto as células podem ser comercializadas para indústrias de diversos países, para que estes completem o processo de elaboração da célula. A figura 6 mostra a máquina utilizada para a serigrafia dos “wafers” de silício.



Figura 6 - Máquina de serigrafia para os bolachas de silício

Fonte: [www.imselectronica.com/productos/maquinas-serigrafia-silicio-m.htm](http://www.imselectronica.com/productos/maquinas-serigrafia-silicio-m.htm)

**1.7 Formação do emissor P-N:** A base deste processo é a criação de uma união tipo P-N na bolacha de silício dopado com boro. Esta fase é realizada com a introdução das bolachas em fornos especiais, dentro dos quais são difundidos átomos de fósforo que acabam por se depositar na superfície da bolacha. Esta difusão ocorre em fornos com uma temperatura de 800 – 900 °C, figura 7. Gás nitrogênio, saturado com  $POCl_3$  líquido é passado em cima das bolachas, formando uma camada de vidro e fósforo ( $SiO_2 P$ ), onde os átomos de fósforo irão se difundir na parte superior da bolacha. Após a difusão o material é cauterizado com ácido sulfúrico. Para evitar o curto-circuito com os átomos das laterais das bolachas, estas também são cauterizadas.

Durante o processo de difusão tem-se a emissão de  $P_2O_5$  e  $Cl_2$ , Estas emissões são tratadas para que possam formar  $NaH_2PO_4$  e  $NaOCl$ . Já no processo de cauterização e preparação da extremidade têm-se emissões de  $HF$ ,  $H_2SiF_6$ ,  $SiF_4$  e  $F_2$  que após tratadas adequadamente resultam em emissões de  $SiO_2$ ,  $NaF$ ,  $CaF_2$  e  $CO_2$ .

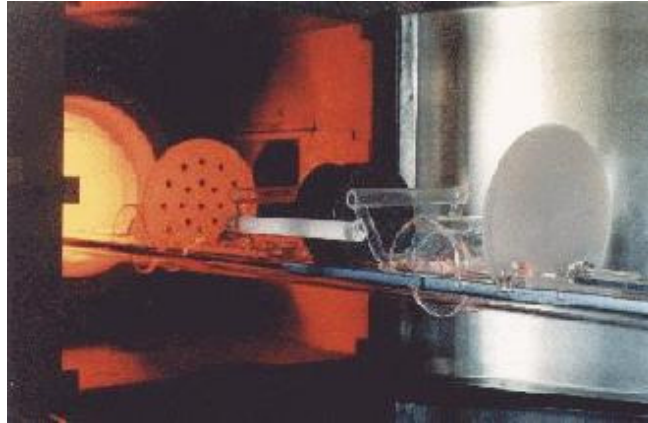


Figura 7 - Vista de uma das bocas de um forno de fusão.

Fonte: [http://www.tandar.cnea.gov.ar/grupos/solar/crecim\\_f.html](http://www.tandar.cnea.gov.ar/grupos/solar/crecim_f.html)

**1.8 Metalização:** Neste ponto são adicionados os contatos as células. Este procedimento é realizado através do processo de impressão de tela sobre às células, conhecido por “screenprinting”, que consiste na aplicação de uma camada uniforme de uma pasta de alumínio e prata na parte posterior da célula pra prevenir a recombinação de elétrons com as lacunas. Os contatos dianteiros são adicionados com a aplicação de uma pasta de prata, já que a pasta de alumínio e prata formaria uma liga de alumínio e silício que destruiria a camada de emissor. Após a impressão a célula passa por etapas de aquecimento em forno. A primeira etapa é o aquecimento a uma temperatura de 120 –150 °C, para evaporar os solventes, a segunda é a passagem por um faixa de calor de 300 – 400 °C para queima das resinas.

**1.9 Camada anti-reflexiva:** Nesta fase é formada sobre a célula uma camada anti-reflexiva, que pode consistir na formação de minúsculas formações piramidais sobre a superfície que vai receber a luz solar. Este processo faz com que o raio refletido tenha uma possibilidade maior de voltar a incidir sobre a célula, antes de se dissipar por completo.

**1.10 Teste das células:** depois de montadas as células passam por uma serie de teste.

Nesta fase, cerca de 5% das células são descartadas por apresentar algum tipo de problema. As células restantes são encapsuladas.

**1.11 Encapsulamento:** as células aprovadas no teste são colocadas em uma matriz de células, interligadas por condutores metálicos. Este processo de ligação prove as células de caminho mais adequados para que os elétrons encontrem um caminho mais fácil para entra e sair das células. Este é realizado com uma deposição eletroquímica, de evaporação á vácuo, ou serigrafia de uma rede ou grelha boa condutora, com uma geometria que possa ter uma ótima recolocação dos elétrons, sem cobrir em demasia a área útil das células. Posteriormente elas são embutidas em uma chapa de EVA (Etil Vinil Acetato). A seqüência de encapsulamento consiste na colocação em camadas de 3 mm de folha de vidro quimicamente endurecido, 0,5 mm de EVA, a matriz de células, 0,5 mm de EVA e 125 µm de Tedlar/Al/Tedlar. Depois desta laminação o material é levado ao forno em uma temperatura de 120 – 150 °C. Após este processo as extremidades do modulo são lacradas com um elastômero, os módulos são lavados, secos e colocados em uma caixa de junção de poliéster e reforçados com uma armação de alumínio. Para finalizar o processo, os módulos são testados eletricamente. Os módulos recusados nesta fase podem ser cortados em pedaços, as células são separadas para utilização em aplicações eletrônicas mais simples. É considerado nesta fase um rejeito de cerca de 1% dos módulos.

As tabelas 1 e 2, mostram um resumo dos dados relativos à fabricação de uma célula fotovoltaica e da montagem final do módulo fotovoltaico. A figura 8 mostra um fluxograma do processo de produção das células e do módulo fotovoltaicos acrescidos da entrada do vidro plano e do perfil de alumínio.

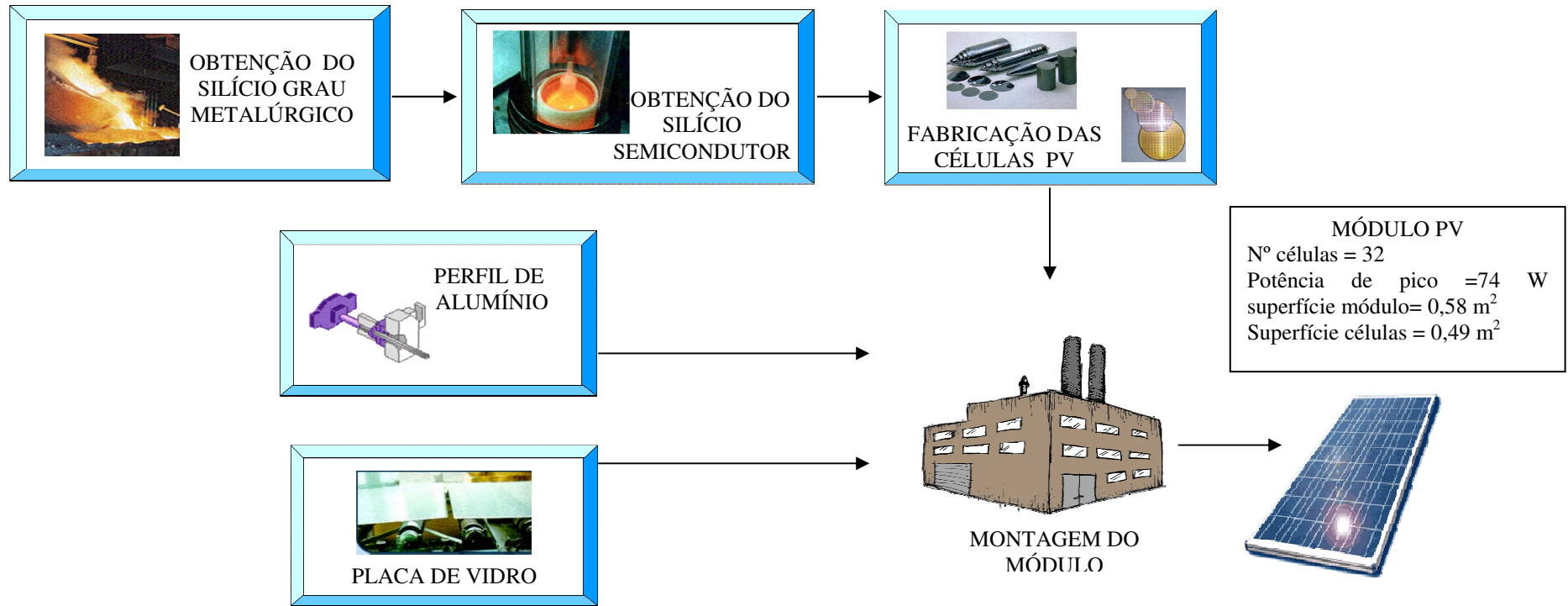


Figura 8 - Fluxograma das fases de produção das células de silício e do módulo PV.

Fonte: Elaboração própria á partir de Kim et al (2000)

**Tabela 1 - Entrada de materiais para fabricação das células de painéis fotovoltaicos de acordo com Alsema (2006)**

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Comentário</b>
Célula de silício multi ou mono cristalino (156 cm <sup>2</sup> )	1,00	peça	Área de célula 156 cm <sup>2</sup> , densidades típicas 270-300 µm. Média de representatividade de 5 processos específicos e companhias (4 multi + 1 mono)
<b>Recursos</b>			————
Água e substância para refrigeração	1,56 x 10 <sup>-2</sup>	m <sup>3</sup>	Água utilizada para amenizar a geração de calor em cortes de "wafers"
<b>Materiais / combustíveis</b>			————
<b>SÓLIDOS</b>			————
Wafers (bolacha) de multi / mono-Si (156 cm <sup>2</sup> )	1,06	peça	————
Pasta de fósforo	2,27 x 10 <sup>-5</sup>	kg	Para formação do emissor
Pasta de metalização	1,17 x 10 <sup>-3</sup>	kg	Material agregado para utilização em contatos dianteiros e traseiros das células, conteúdo de prata 1.6E-4 kg.
Poliestireno expansível	6,36 x 10 <sup>-6</sup>	kg	Para empacotamento

**Tabela 1 - Entrada de materiais para fabricação das células de painéis fotovoltaicos de acordo com Alsema (2006)**

<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Comentário</b>
<b>GASES</b>			——
Nitrogênio (N <sub>2</sub> )	$2,89 \times 10^{-2}$	kg	——
Oxigênio (O <sub>2</sub> )	$1,59 \times 10^{-3}$	kg	——
Argônio (Ar)	$4,01 \times 10^{-4}$	kg	——
Mistura de fluoretos (CF <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> , SF <sub>6</sub> , NF <sub>3</sub> ).	$4,93 \times 10^{-5}$	kg	Agregação de gases de diferentes fontes de fluoretos
Amônia (NH <sub>3</sub> )	$1,05 \times 10^{-4}$	kg	Para deposição de nitrito de silício
Hidreto de silício (SiH <sub>4</sub> )	$1,89 \times 10^{-5}$	kg	Para deposição de nitrito de silício
<b>LÍQUIDOS</b>			——
Hidróxido de sódio, 50% em água (NaOH).	$2,45 \times 10^{-3}$	kg	——
Ácido acético, 98% em água (CH <sub>3</sub> COOH).	$4,42 \times 10^{-5}$	kg	——
Ácido clorídrico, 30% em água (HCl).	$7,12 \times 10^{-4}$	kg	——
Fluoreto de hidrogênio (HF) 100%	$5,89 \times 10^{-4}$	kg	——
Ácido nítrico, 50% em água (HNO <sub>3</sub> ).	$4,17 \times 10^{-4}$	kg	——

<b>Tabela 1 - Entrada de materiais para fabricação das células de painéis fotovoltaicos de acordo com Alsema (2006)</b>			
<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Comentário</b>
POCl <sub>3</sub>	3,39 x 10 <sup>-6</sup>	kg	Para formação de emissor
Ácido fosfórico de grau industrial, 85% em água (H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> ).	1,19 x 10 <sup>-4</sup>	kg	Para formação de emissor
Silicato de sódio	1,17 x 10 <sup>-3</sup>	kg	————
Cloreto de cálcio (CaCl <sub>2</sub> )	3,37 x 10 <sup>-4</sup>	kg	————
Tetra-isopropiltitanato (TPT, um precursor de titânio).	2,22 x 10 <sup>-8</sup>	Litro	Para deposição na camada anti-reflexiva
Isopropanol	1,23 x 10 <sup>-3</sup>	kg	————
Etanol	9,98 x 10 <sup>-6</sup>	kg	————
Solventes orgânicos não especificados	2,24 x 10 <sup>-5</sup>	kg	————
Água deionizada	2,15	kg	————
<b>Eletricidade</b>			————
Eletricidade em média voltagem	5,90 x 10 <sup>-1</sup>	kWh	————
Gás natural-(7,42E-02 MJ)	0,0206	kWh	————

<b>Tabela 1 - Entrada de materiais para fabricação das células de painéis fotovoltaicos de acordo com Alsema (2006)</b>			
<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Comentário</b>
Óleo combustível	$5,06 \times 10^{-4}$	Litro	—
<b>Emissões para o ar</b>			—
alumínio	$1,21 \times 10^{-5}$	kg	—
Cloreto de hidrogênio	$4,16 \times 10^{-6}$	kg	—
Fluoreto de hidrogênio	$7,56 \times 10^{-8}$	kg	—
Particulados não especificados	$4,16 \times 10^{-5}$	kg	—
Dióxido de silício	$1,13 \times 10^{-6}$	kg	—
Prata	$1,21 \times 10^{-5}$	kg	—
Hidróxido de sódio	$7,56 \times 10^{-7}$	kg	—
Estanho	$1,21 \times 10^{-5}$	kg	—
COV, compostos orgânicos voláteis.	$3,02 \times 10^{-3}$	kg	—
Gases - FC (CF <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> F <sub>6</sub> , SF <sub>6</sub> , NF <sub>3</sub> )	$4,41 \times 10^{-2}$	kg CO <sub>2</sub> -eq	Emissão em kg de CO <sub>2</sub> equivalente, calculo baseado em 70% otimização de gás da fonte.

<b>Tabela 1 - Entrada de materiais para fabricação das células de painéis fotovoltaicos de acordo com Alsema (2006)</b>			
<b>Material</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Unidade</b>	<b>Comentário</b>
<b>Fluxo final de rejeito</b>			—
<b>Rejeitos de células fotovoltaicas</b>	$4,31 \times 10^{-3}$	kg	—
<b>Rejeitos de tratamento</b>			—
<b>Células multicristalinas para reciclagem</b>	$1,76 \times 10^{-2}$	peça	—
<b>Solução neutra</b>	$7,31 \times 10^{-1}$	m <sup>3</sup>	—
<b>Solução alcalina</b>	$2,17 \times 10^{-4}$	m <sup>3</sup>	—
<b>Solução ácida</b>	$7,87 \times 10^{-4}$	m <sup>3</sup>	—
<b>Rejeitos orgânicos</b>	$1,22 \times 10^{-4}$	Litros	—

Fonte: ALSEMA(2006)

**Tabela 2 - Dados relativos ao módulo fotovoltaico de acordo com Alsema (2006)**

<b>Nome</b>	Produção do módulo de painel fotovoltaico de silício cristalino	
<b>Representatividade</b>	Média de 2 companhias mais dados de literatura.	
<b>Data</b>	2/1/2006	
<b>Método de coleção</b>	Coleta de dados através de representantes de fábrica e dados de literatura.	
<b>Observação</b>	Considerados apenas os materiais e uso de energia para laminação do módulo e montagem adicional. Área total típica (excluindo armação) e eficiências 14.0% para módulos de mono-Si, 13.2% para módulos de multi-Si.	
<b>Células</b>		
<b>Quantidade</b>		<b>Unidade</b>
<b>Número de células (largura)</b>	4	—
<b>Número de células (comprimento)</b>	8	—
<b>Tamanho da célula (comprimento):</b>	12,5	cm
<b>Eficiência da célula (encapsulada)</b>	14,7	%

Tabela 2- Dados relativos ao módulo fotovoltaico de acordo com Alsema (2006)

<b>Parâmetros calculados</b>			
<b>Largura do módulo ( armação)</b>	54,6		cm
<b>Comprimento do módulo (armação)</b>	105		cm
<b>Área do módulo (armação)</b>	0,58		m <sup>2</sup>
<b>Perímetro de módulo (comprimento da armação)</b>	3,20		m
<b>Número de células:</b>	32		—
<b>Potência do módulo</b>	74		Wp
<b>Eficiência do módulo (área de vidro, excluindo a armação).</b>	12,8		%
<b>OBS.: As quantidades de material abaixo foram calculadas de acordo com os parâmetros acima</b>			
<b>Produto</b>	<b>Unidade</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Comentários</b>
Módulo, c-Si.	peça	1,00	—
<b>Materiais</b>			

**Tabela 2- Dados relativos ao módulo fotovoltaico de acordo com Alsema (2006)**

<b>Células solares</b>	peça	32,6	+2% perda de célula
<b>Perfil de alumínio</b>	kg	2,6	Para armação podendo variar de acordo com o fabricante
<b>Oxido polifenil</b>	kg	0,2	Caixa de junção podendo variar de acordo com o fabricante
<b>Folha de vidro temperado plano com baixo teor de ferro.</b>	kg	5,2	3.6 mm, variando de 3.2 a 4.0, dependendo de aplicação, tamanho e fabricante, +1% perda,
<b>Etil Vinil Acetato</b>	kg	0,6	Consumo de 0.96 kg/m <sup>2</sup> de EVA, 6% maior que a área do vidro.
<b>Chapa traseira para o módulo de células solares</b>	kg	0,15	50% Fluoreto de poli vinil, 50% tereftalato de polietileno, 0.243 g/m <sup>2</sup> (0.17 densidades de mm) 7% perda de corte.
<b>Cobre</b>	kg	0,06	Tiras de cobre para interconexão das células
<b>Estanho</b>	kg	0,003	Sn <sub>60</sub> Pb <sub>40</sub> que prende os fios, Sn que cobre as tiras de interconexão dos materiais.
<b>Fios</b>	kg	0,004	Sn <sub>60</sub> Pb <sub>40</sub> que prende os fios, alguns fabricantes usam dianteira livre.
<b>Níquel</b>	kg	0,00009	Ni para chapear as tiras de interconexão dos materiais
<b>Fluxo de solda</b>	kg	0,0100	95% de propanol e sem nenhum halógeno,

**Tabela 2- Dados relativos ao módulo fotovoltaico de acordo com Alsema (2006)**

<b>Metanol</b>	kg	0,0075	Fluido de limpeza, 13 ml /m <sup>2</sup> .
<b>Silicone</b>	kg	0,0014	Para lâmina do diafragma
<b>Kit de silicone</b>	kg	0,150	Equipamento para prender armação e caixa de junção
<b>Papelão</b>	kg	0,63	Embalagem; estimativa de: 2 módulos por caixa de papelão, placa de 1 kg/m <sup>2</sup> , 2.2 m <sup>2</sup> de placas por módulo.
<b>Água de torneira</b>	kg	27	Para lavar o vidro e para uso geral
<b>Eletricidade</b>			
Eletricidade, média voltagem.	kWh	1,38	Alça / amarração: 1.91E-2 kWh/célula de 125 mm x 125 mm.
Eletricidade, média voltagem.	kWh	6,95	Laminação: 6.95 kWh por 1.25 área de módulo de m <sup>2</sup> .
Eletricidade, média voltagem.	kWh	0,01	Teste de módulo: 0.01 kWh/módulo de 1.25 m <sup>2</sup>
<b>Total Eletricidade (média voltagem)</b>	kWh	8,33	Energia total do processo

**Tabela 2- Dados relativos ao módulo fotovoltaico de acordo com Alsema (2006)**

<b>Fluxo final de desperdício</b>			
<b>Desperdício de células solares</b>	kg	0,007	2% perda, 10 g por célula, pode ser reciclada.
<b>Tratamento do desperdício</b>			
<b>Vidro para reciclagem</b>	kg	0,05	1% perda por quebra do material
<b>Chapa de EVA (Etil Vinil Acetato) para queima do desperdício</b>	kg	0,02	4% perda por corte
<b>Chapa traseira para queima do desperdício</b>	kg	0,01	7% perda por corte

Fonte: ALSEMA (2006)

# ANEXO IV

## 1 A fabricação da bateria de chumbo-ácido

### Etapas do processo de fabricação da bateria de chumbo-ácido:

**1.1 Refino do chumbo:** Após a extração o minério de chumbo, (figura 6.31), precisa ser separado dos demais materiais obtidos com a extração. Para o refino um dos processos utilizados é o processo de ustulação, que é o processo de produção de um metal a partir de um minério sulfetado. Isto é realizado com a passagem de uma corrente de ar em um ambiente bastante aquecido. O sulfeto de chumbo original ao passar por esta câmara aquecida acaba por promover a separação do enxofre. Com a volatilização do dióxido de enxofre surge o mineral original (dióxido de chumbo).



Figura 6.31 - Amostra de galena (principal minério de chumbo), PbS, com calcita, de uma mina da região de Westfália, Alemanha.

Fonte: <http://www.cdcc.sc.usp.br/elementos/chumbo.html>

**1.2 Produção do óxido de chumbo (empastação):** Para se produzir o óxido de chumbo, a partir dos lingotes de chumbo metálico e oxigênio, utiliza-se o chamado processo Barton. Neste processo o chumbo fundido é agitado na presença de ar com o auxílio de moinhos de atrito. Nestes moinhos os pedaços de chumbo são atritados em um tambor, na presença de ar. Como neste processo existe a necessidade da fusão do chumbo, uma quantidade adicional de energia é necessária para sua realização, além de emitir vapores de chumbo o que implica na necessidade de conter estes gases em coifas. Para este processo é utilizado um

isolamento térmico no cadinho de fundição do chumbo para garantir uma eficiência energética apropriada para o processo.

Ao final é obtido um processo resulta em um pó, (figura 6.32), que necessita de um correto armazenamento, principalmente porque este material ainda possui uma parcela razoável de chumbo não oxidado e que esta sujeita a uma posterior oxidação no ambiente.

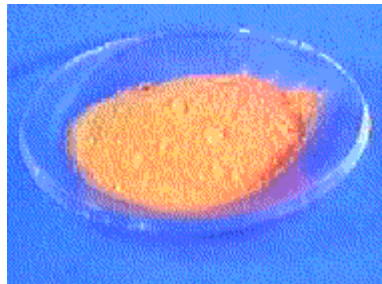


Figura 6.32 - Oxido de chumbo

Fonte:[http://nautilus.fis.uc.pt/wwwqui/figuras/fig\\_compostos08.html](http://nautilus.fis.uc.pt/wwwqui/figuras/fig_compostos08.html)

**1.3 Processamento do óxido de chumbo:** O processamento do óxido de chumbo é feito na chamada masseira, onde o óxido de chumbo é transformado em uma massa para ser aplicada nas grades de chumbo. O processo se inicia com a pesagem e transferência automática do óxido armazenado nos silos para a masseira. Este procedimento impede o contato dos operários com o óxido, o que diminui a possibilidade de contaminação no local de produção e aumenta a confiabilidade do processo. A pasta produzida será aplicada nas grades.

**1.4 Produção das placas:** A massa resultante da etapa anterior é trabalhada pelos operadores da empastadeira, neste ponto os operários são obrigados a utilizar a máscara e as luvas de proteção para evitar qualquer tipo de contaminação através do material manipulado pelos mesmos. As placas obtidas nesta etapa são acondicionadas em cavaletes e transportadas, por empilhadeiras, até as estufas de cura e secagem, onde são mantidas por 24 horas a uma temperatura de 30 a 35 °C, ficando prontas para o processo de montagem. Nos locais de operação desta etapa existem coifas exaustoras para aspiração do pó que posteriormente é filtrado deixando o ar emitido sem chumbo, o que minimiza a possibilidade de contaminação dos operários.

**1.5 Produção das grades de chumbo:** A produção das grades de chumbo é feita por fundição e gravidade. Nesta etapa o chumbo é fundido e por gravidade escorre para os moldes das grades que posteriormente são resfriados, (figuras 6.33 e 6.34). Como existe a emissão de vapores contaminantes nesta etapa, o trabalho de resfriamento do ambiente é utilizado como meio para minimizar a contaminação por estes vapores tóxicos.

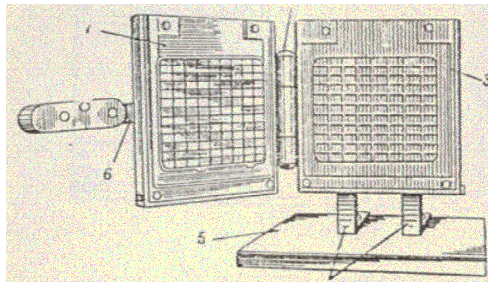


Figura 6.33 – Moldes para a produção das grades.

Fonte: Freitas (2004)



Figura 6.34 – Empacotação das grades

Fonte: Freitas (2004)

**1.6 Processamento das placas:** As placas (positiva e negativa) são as grades produzidas com uma liga onde é aplicada a massa de óxido de chumbo e acrescidas de outras substâncias. Estas placas são responsáveis pelo acúmulo e pela condução da corrente elétrica. Nesta etapa as placas passam por um processo de exaustão durante a soldagem das placas. A figura 6.35 mostra o suporte onde as placas são colocadas para a solda.

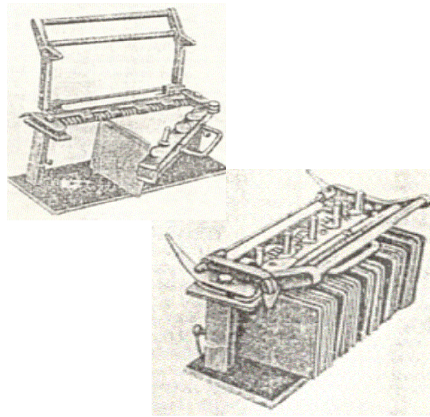


Figura 6.35 – Pentes para a solda das placas na bateria.

Fonte: Freitas (2004)

**1.7 Fabricação das conexões:** Os conectores servem para a interligação dos elementos da bateria para a formação do circuito. A figura 6.36 mostra o preparo destas conexões.



Figura 6.36 – preparação dos conectores para a bateria.

Fonte: Freitas (2004)

**1.8 Fabricação da tampa e da caixa de polipropileno:** Estas são, respectivamente, as peças utilizadas para a fixação dos elementos e armazenagem da solução eletrolítica da bateria. Esta solução (35% de ácido sulfúrico e 65% de água destilada) é indispensável para as reações químicas que ocorrem dentro da bateria.

**1.9 Fabricação dos separadores de polietileno:** Estes separadores são envelopes que evitam o contato direto entre as placas positivas e negativas da bateria, não permitindo a ocorrência de curto-circuito no interior da bateria,(Figura 6.37).

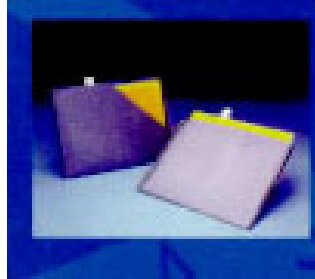


Figura 6.37 - Separadores de polietileno

Fonte: <http://www.aca.org.ar/servicios/baterias/index>

**1.10 Montagem da bateria:** Nesta etapa todos os elementos são montados e acrescidos dos conectores (pólos positivo e negativo) para interligação dos elementos da bateria e formação do circuito. As placas são agrupadas e soldadas umas as outras e depois colocadas em células individuais nas caixas plásticas da bateria. Depois a bateria segue para a extrusora que solda estas células umas as outras. O próximo, passo é a selagem da bateria para fechar as unidades com uma tampa plástica usando altas temperaturas. Terminado este processo a bateria passa por testes de curto-circuito e posteriormente recebe a solução de ácido sulfúrico e água destilada. Logo após é feita a limpeza e embalagem da bateria, sua carga e densidade são testadas, seus vasos fechados e depois de limpas recebem o adesivo do fabricante e estão prontas para entrega. As figuras de 6.38 a 6.40 mostram o processo de união das placas, extrusão e carga das baterias.



Figura 6.38 – União das placas

Fonte: <http://www.aca.org.ar/servicios/baterias/index>



Figura 6.39 – Detalhe da extrusora

Fonte: <http://www.aca.org.ar/servicios/baterias/index>



Figura 6.40 – Carga das baterias

Fonte: <http://www.aca.org.ar/servicios/baterias/index>