

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Análise comparativa dos aspectos ambientais e econômicos entre sistemas fotovoltaicos e termelétricas a carvão

**Bárbara Bressan Rocha
Victor Hugo Iocca**

Brasília, 24 de novembro de 2009

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia

TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Análise comparativa dos aspectos ambientais e econômicos entre sistemas fotovoltaicos e termelétricas a carvão

**Bárbara Bressan Rocha
Victor Hugo Iocca**

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Elétrico

Banca Examinadora

Prof. Ivan Marques de Toledo Camargo, UnB/ Dep.
de Engenharia Elétrica – UnB. (Orientador)

Prof. Rafael Amaral Shayani, UnB/ Dep. de
Engenharia Elétrica – UnB.

Prof. Mauro Moura Severino, UnB/ Dep. de
Engenharia Elétrica – UnB.

Dedicatória(s)

Aos meus pais, irmãos, e a todos os meus amigos dedico este trabalho, que simboliza o ponto final de anos de dedicação, dos quais sempre tive o apoio e motivação de todos. Dedico também a todos que almejam e trabalham para um mundo cada vez mais renovável.

Victor Hugo Iocca

Aos meus pais, irmãs e amigos, gostaria de dedicar este trabalho, elaborado com a intenção de sensibilizar e buscar um mundo cada vez melhor. Desculpem-me pela ausência durante esses anos, sabendo que foi graças ao amor de vocês que obtive tamanho êxito neste resultado.

Bárbara Bressan Rocha

Agradecimentos

Meus sinceros agradecimentos vão primeiramente para meu colega, amigo e irmão Victor Hugo Iocca, que me acompanhou nessa caminhada, sorriu, chorou e lutou comigo em todos os momentos vividos desde que o conheci. Agradeço também a todos os professores que me forneceram a maravilha do conhecimento indispensável para realizar meus trabalhos passados, atuais e futuros. Ao professor Ivan Camargo, principalmente, agradeço pela força e orientação dadas.

Bárbara Bressan Rocha

Sempre serei grato aos meus pais que confiaram em mim e me deram todo o suporte necessário para chegar até este ponto. Sou grato também aos meus irmãos, Emerson e Diego, e o meu primo Thomas, estes sempre presentes na minha vida acadêmica. Ao professor Ivan Camargo agradeço pela motivação e orientação que nos foi dada. E especialmente agradeço à pessoa que tornou tudo isso possível, uma grande amiga que sempre esteve ao meu lado em todos os momentos, Bárbara, muito obrigado.

Victor Hugo Iocca

RESUMO

O presente estudo, baseado em revisão bibliográfica e análise comparativa, mostra as vantagens e desvantagens dos sistemas de geração térmica a carvão e fotovoltaica. A primeira abordagem, feita para fundamentar tal análise, permeia a questão ambiental e seus agravantes. Os impactos causados pelas atividades humanas, que se dão desde a Primeira Revolução Industrial e já desencadeiam processos irreversíveis no meio ambiente, são apontados e seus custos para a sociedade estimados de acordo com o Relatório Stern. Também são abordadas políticas públicas adotadas em vários países no mundo, com o intuito de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, mostrando a viabilidade e eficácia de tais projetos. A análise entre a tecnologia fotovoltaica e a termelétrica a carvão tem como objetivo, quantificar os custos de se gerar eletricidade por meio de cada um desses sistemas, incluindo na etapa seguinte os custos das externalidades de ambas as formas de geração. Essa comparação tem o intuito de mostrar que, apesar de os custos de se utilizar fontes novas e renováveis de energia serem altos, o preço que a sociedade pagará por continuar usando combustíveis fósseis em sua matriz energética pode ser ainda maior. Finalmente, uma proposta para implementar e disseminar os sistemas fotovoltaicos no Brasil é feita e algumas sugestões para futuros estudos complementares são mencionados.

ABSTRACT

Based on bibliographic review and comparative analysis, this study seeks to demonstrate the advantages and disadvantages of coal and photovoltaic energy generation systems. The first approach – to underpin the analysis – focuses on environmental aspects and their consequences. Impacts caused by human activity since the First Industrial Revolution have already led to irreversible damage to the environment. Some of those are outlined here and their costs are estimated based on the assumptions of the Stern Review. We also scrutinise international public policies aimed at reducing greenhouse gas emissions, as well as the feasibility and effectiveness of their projects. The analysis of photovoltaic technology and coal plants aims at quantifying their costs for generating electricity, including the externality costs. This comparison seeks to demonstrate that, although the costs of employing new and renewable energy sources are high, the price that society will have to pay for keeping using fossil fuels in their energy matrices can be even higher. Finally, we suggest a proposal for implementing and disseminating photovoltaic systems in Brazil, as well as further research lines.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS	15
2.1 RELATÓRIO STERN	15
2.2 O EFEITO ESTUFA E O AQUECIMENTO GLOBAL	22
2.3 POLÍTICAS PARA A REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO ₂	23
2.4 MITIGAÇÕES OBTIDAS POR MEIO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	25
3 O SISTEMA FOTOVOLTAICO	31
3.1 DEFINIÇÃO	32
3.2 APLICAÇÕES FOTOVOLTAICAS	32
3.4 TECNOLOGIAS E O MERCADO	35
3.5 O SISTEMA FOTOVOLTAICO E A INDÚSTRIA	38
3.6 PROMOÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS DE INCENTIVO AOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS	42
3.7 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL	50
4 TERMELÉTRICAS A CARVÃO MINERAL	52
4.1 RECURSOS E RESERVA DE CARVÃO MINERAL	52
4.2 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO	54
4.3 CARACTERIZAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DO PARQUE TÉRMICO BRASILEIRO	56
4.4 IMPACTOS AMBIENTAIS	62
5 PROPOSTA, PRECIFICAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	71
6 CONCLUSÃO	83
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85

LISTA DE FIGURAS

2.1	Relação entre a concentração de CO ₂ e na atmosfera e aumento da temperatura média e suas conseqüências	1
2.2	Curva de aprendizado	2
3.1	Diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica	3
3.2	Potência acumulada instalada de sistemas PV conectados à rede e isolados nos países membros do IEA PVPS	4
3.3	Divisão da produção mundial de células fotovoltaicas por país em 2007	5
3.4	Preço dos módulos e sistemas FV na Alemanha, Espanha e Estados Unidos	6
4.1	Taxa anual de crescimento das emissões de dióxido de carbono relacionadas à energia	7
4.2	Curva de aprendizado	8

LISTA DE GRÁFICOS

2.1	Quantidade de GEE emitido por cada nação em kg/MWh.....	1
5.1	Comparação entre a tarifa FV e a tarifa normal de energia ao longo do tempo.....	2
5.2	Comparação entre valores de custos de FV em relação às fontes de carvão.....	3
5.3	Comparação entre custos da energia de Candiota III mais externalidades em relação aos custos do FV	4
5.4	Comparação entre custos da energia de Figueira mais externalidades em relação aos custos do FV	5
5.5	Comparação entre custos da energia do Internacional mais externalidades em relação aos custos do FV	6

LISTA DE TABELAS

2.1	Previsão do valor em reais das RCEs até 2012	1
2.2	Potência instalada acumulada de sistemas fotovoltaicos em MW	2
2.3	Energia gasta para produzir um sistema PV	3
2.4	Quantidade de GEE emitido conforme a fonte energética	4
2.5	Divisão das fontes energéticas e estimativa da emissão de GEE por cada kWh gerado	5
3.1	Fundos públicos para P&D em 2007 em alguns países do IEA PVPS	6
3.2	Preço dos módulos PV (dólar e reais por watt)	7
3.3	Parâmetros do programa buydown para tecnologias emergentes na Califórnia	8
3.4	Visão global do Feed-in Tariffs Alemão em 2004, 2007 e 2009 em R\$/kWh	9
3.5	Feed-in tariffs Espanhol em 2006	10
3.6	Feed-in tariffs Espanhol em 2007 de acordo com DR 661/2007	11
3.7	Feed-in tariffs Espanhol em 2009 de acordo com DR 1575/2008. Valores em R\$/kWh	12
4.1	Tecnologias de geração termelétrica a carvão mineral	13
4.2	Usinas termelétricas a carvão em operação no Brasil e suas características	14
4.3	Usinas termelétricas a carvão com previsão para entrar em operação em 2010 no Brasil	15
4.4	Termelétricas outorgadas no Brasil	16
4.5	Custo de tecnologias utilizadas em termelétricas	17
4.6	Características do carvão brasileiro	18
4.7	Origem do carvão usado nas usinas em operação no Brasil	19
4.8	Média dos custos fixos e variáveis de operação e manutenção	20
4.9	Limites de concentração de poluentes no ar	21
4.10	Impactos relacionados à construção e pós-operação das UTE's a carvão	22
4.11	Impactos socioambientais relacionados à cadeia de produção energética a partir do carvão	23
4.12	Custos das externalidades	24
5.1	Projeção do valor do investimento inicial (U\$/kWp) e custo de retorno da energia (U\$/kWh) em relação ao tempo futuro	25
5.2	Parâmetros para o cálculo do custo de retorno da energia (U\$/kWh)	26
5.3	Plano do programa brasileiro de sistemas FV e o impacto econômico	27
5.4	Demonstrativo do rateio do fundo FIT utilizando dois métodos diferentes	28
5.5	Valores para a correção da tarifa normal de energia	29
5.6	Parâmetros para o cálculo do custo do quilowatt-hora referente a origem de cada combustível	30
5.7	Poder calorífico do carvão de acordo com a fonte	31
5.8	Custo do quilowatt-hora ao longo do tempo para Candiota III	32
5.9	Custo do quilowatt-hora ao longo do tempo para Figueira	33
5.10	Custo do quilowatt-hora ao longo do tempo para Internacional	34
5.11	Valores das externalidades aplicados às usinas termelétricas a carvão	35
5.12	Média de (CO ₂ /MWh) e quantidades em toneladas de emissão de CO ₂ evitados ...	36
5.13	Valores em reais das toneladas de CO ₂ evitadas no ano de 2030	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Siglas

ANEEL	Agencia Nacional de Energia Elétrica
BEN	Balanço Energético Nacional
CCS	<i>Carbon Capture and Storage</i>
COMASE	Comitê Coordenador de Atividades de Meio Ambiente do Setor Elétrico
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EPIA	<i>European Photovoltaic Industry Association</i>
FV	Fotovoltaico
GEE	Gases de Efeito Estufa
GT-GDSF	Grupo de Trabalho de Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MME	Ministério de Minas e Energia
OCDE	Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OMS	Organização Mundial da Saúde
PIB	Produto Interno Bruto
SFCR	Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede
SIN	Sistema Interligado Nacional
UNCED	Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento
UTE	Usinas Termelétricas
WCI	<i>World Coal Institute</i>

1 INTRODUÇÃO

Com a Revolução Industrial no século XVIII, as milhares de indústrias que estavam surgindo necessitavam de algo que as diferenciasse para garantir sua prosperidade. Com isso, a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias para atender o consumo crescente do mundo foram impulsionados. Em todas as áreas de conhecimento (saúde, humanas, social, engenharias, etc.) as novas tecnologias foram sendo implementadas com o intuito de melhorar e facilitar a vida do homem na Terra. Mas o que se observa hoje, depois de mais de dois séculos, é que, de fato, muito das condições de vida humana evoluíram para melhor em detrimento da principal fonte capaz de abastecer as necessidades de sobrevivência do homem, a natureza.

Toda matéria-prima usada para confecção dos bens que o mundo produz, todo alimento cultivado, toda forma primária de energia, estão sofrendo as conseqüências do estilo de vida insustentável que o homem levou até hoje. Logo, a tomada de ações para mudar esse cenário é não só recomendável como necessária.

Daí, nas últimas décadas, observou-se uma forte tendência mundial visando a preservação do meio ambiente. A preocupação com os altos índices de emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o aquecimento do planeta, tornou-se real a partir dos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC - *Intergovernmental Panel on Climate Change*), elaborado por respeitada comunidade científica mundial. Isto por que tais relatórios apontam essas emissões como principal inimigo do meio ambiente, provocando graves alterações climáticas, tendo como fundamental causa as atividades humanas.

É por este motivo que, no presente trabalho, serão apresentadas as vantagens e desvantagens, bem como os custos de implementação, no Brasil, de duas tecnologias de geração de energia elétrica: termelétricas a carvão mineral e fotovoltaica. O primeiro cenário utilizado irá comparar ambas tecnologias de acordo com suas tarifas normais de geração à partir de 2008 até um momento futuro com algumas considerações feitas nos capítulos subsequentes. Aos custos de geração, serão adicionados no segundo cenário, os custos das externalidades de cada tecnologia, quando existir.

Assim, o segundo capítulo apresenta alguns resultados e conclusões do Relatório Stern, que trata dos aspectos econômicos dos impactos que são consequência das alterações do clima. Medidas de controle e mitigação já estão sendo tomadas e possuem forte penetração na agenda de desenvolvimento de vários países no mundo. Tais medidas serão capazes de evitar um cenário extremo e possivelmente irreversível apontado pelos relatórios do IPCC. Caso as metas estabelecidas pela comunidade internacional não sejam cumpridas, o dispêndio, não só econômico, com os impactos ambientais e sociais será cada vez maior (Relatório STERN). As medidas de adaptação decorrentes desses impactos já são uma realidade e se agravarão conforme o tempo passa. CO

O capítulo 3, então, fornece um panorama dos sistemas fotovoltaicos de geração de energia no mundo e no Brasil. Também neste capítulo, as diferentes legislações utilizadas em vários países, no sentido de promover e incentivar o uso de tal tecnologia, são mostradas.

O agravamento ambiental também tem, como principais agentes, as fontes de energia baseadas em combustíveis fósseis. Dentre elas, a mais poluente é aquela que utiliza o carvão mineral como combustível. Assim, o capítulo 4 apresenta uma descrição das tecnologias de geração termelétrica (tanto aquelas já comercializadas quanto as que ainda estão em fase de P&D) e aspectos técnico-econômicos do parque termelétrico a carvão brasileiro, além de identificar os impactos ambientais (externalidades) decorrentes do uso dessa forma de geração de energia.

Finalmente, a análise comparativa entre essas duas formas de geração de eletricidade é feita no capítulo 5. Neste capítulo também é apresentada uma proposta que fornece algumas direções para a criação de uma legislação que vise à inserção dos sistemas fotovoltaicos na matriz de geração elétrica brasileira. No último capítulo, as conclusões e recomendações do trabalho são abordadas.

2 ALTERAÇÕES CLIMÁTICAS

Muito se fala e muito já se ouviu sobre a relevância do impacto das mudanças climáticas no mundo. Uma breve busca na internet fornece mais de 850 mil páginas que tratam deste assunto. Diversos governos, órgãos, instituições, organizações, empresas públicas e privadas, além de parte da sociedade, estão se mobilizando cada vez mais e propondo soluções das mais diversas em termos de medidas mitigadoras, mostrando que o homem pode se tornar, sim, o maior aliado do Planeta.

As provas científicas não trabalham mais com suposições. Os riscos já estão postulados, assim os modelos desenvolvidos que tratam dos impactos da mudança do clima são classificados de acordo com sua probabilidade de ocorrência. As alterações climáticas modificarão sensivelmente todas as atividades humanas, desde a agricultura até a produção de *chips* de computadores, além de possivelmente provocarem mudanças culturais nos mais variados povos e comunidades espalhadas pelo mundo.

Talvez o levantamento dos aspectos econômicos ligados aos impactos futuros devido às mudanças climáticas globais consiga impulsionar e agilizar ainda mais ações no sentido de se promover uma sociedade totalmente sustentável social, econômica e ambientalmente.

Dessa forma é feita, a seguir, uma abordagem com os pontos mais importantes apresentados no estudo Stern, relatório que trata dos aspectos econômicos das alterações climáticas.

2.1 RELATÓRIO STERN

As alterações climáticas têm como consequência, paralela a todos os possíveis desastres que irão ocorrer, seus efeitos na economia. Tais alterações são na verdade a maior falha de mercado e a mais abrangente jamais vista. Assim os benefícios de ações rápidas ultrapassam de longe os futuros custos associados aos desastres (Stern).

Os efeitos de nossas ações de hoje levam muito tempo a desenvolver-se, quando se trata dos ciclos de vida dos ecossistemas na Terra. Daqui a 40 ou 50 anos a humanidade sofrerá os efeitos da sociedade que está se desenvolvendo neste começo do século XXI. Observando o que acontece no presente e o que aconteceu no recente passado - da Revolução Industrial em diante - conseguimos compreender os riscos que permeiam o futuro do homem e suas atividades. Os maiores investimentos, apesar de não estarem muito claros hoje ainda, são aqueles com foco na tomada de medidas rigorosas para a redução das emissões de GEE. Isso significa que ignorar as alterações climáticas tem como consequência prejudicar o crescimento econômico (Stern).

Os gases com efeito de estufa na atmosfera podem ser designados como concentração equivalente de CO₂ atmosférico (CO₂e). O nível atual desses gases na atmosfera é de aproximadamente 430 partes por milhão (ppm), em comparação com os 280 ppm antes da Revolução Industrial. Com isso,

observou-se um aquecimento global superior a meio grau Celsius no decorrer desse período e devido a inércia do sistema climático, representa no mínimo mais meio grau nas próximas décadas. A inércia é uma propriedade inerente ao sistema climático – os efeitos de uma perturbação nesse sistema levam muito tempo a se estabilizarem. Devido a essa lentidão, mesmo que as concentrações das emissões de GEE sejam reduzidas e mantidas a um certo nível, a temperatura continuará a subir lentamente por mais de um século até o sistema entrar em equilíbrio (IPCC).

Mesmo mantidas as atuais taxas de emissões (2,7 ppm/ano), em 2050 a concentração dos GEE atingiria, segundo o Quarto Relatório de Balanço do IPCC, 550 ppm de CO₂e. O dobro dos níveis pré-industriais. Mas, como o investimento das economias de crescimento rápido abrangem basicamente o setor de infra-estrutura, caracterizado por altas taxas de emissão de carbono, o resultado é a contínua aceleração dessas emissões. Estima-se, portanto, que já em 2035 sejam observados os níveis de 550 ppm de CO₂e na atmosfera. Logo, existe no mínimo 77% e no máximo 99% de probabilidade de a temperatura média na Terra sofrer um aumento superior a 2°C até 2050.

Como comparação pode ser salientado que a temperatura média global hoje é 5 °C mais alta aproximadamente do que na última era glacial. Se a temperatura na Terra aumentar em média mais 5 °C, o cenário das décadas seguintes seria de um território totalmente desconhecido pelos seres humanos. A geografia física do mundo mudaria sensivelmente implicando em fortes mudanças na geografia humana.

Um resumo das provas científicas dos elos existentes entre as concentrações de GEE, o aumento da temperatura e as prováveis conseqüências disso são mostrados na figura 2.1.

Podemos ver na parte superior que o aumento da temperatura, de 0 °C a 5 °C, está relacionado com a concentração de GEE na atmosfera que vai de 400 ppm até 750 ppm de CO₂e em equilíbrio. As linhas horizontais contínuas indicam os 5 a 95% do leque de probabilidade de cada uma das conseqüências apontadas na parte inferior ocorrerem de acordo com a temperatura indicada. Esse quadro teve como base estimativas provenientes do IPCC 2001. Já as linhas horizontais pontilhadas apresentam o leque com base em estudos mais recentes, ou seja, a probabilidade da temperatura sofrer alterações, e portanto, de impactos mais graves ocorrerem, para uma mesma concentração de CO₂e torna-se maior. Assim, baseado em folhetos científicos, a parte inferior apresenta os riscos associados aos diversos níveis de aquecimento que a Terra está sujeita a sofrer no decorrer do próximo século.

As temperaturas médias globais aumentarão de 2 a 3 °C até aproximadamente o começo da metade do século XXI. Os graves impactos associados a isso serão muitas vezes mediados pelas águas, como visto na figura 2.1. Dentre eles pode-se citar: aumento do risco de inundações; forte redução do abastecimento de água, centenas de milhões de pessoas sem capacidade de produzir, ou de comprar, alimentos suficientes, doenças transmitidas por vetor (como malária e a febre de dengue) cada vez mais comuns, 200 milhões de pessoas poderão ficar permanentemente desalojadas, 15 a 40% de

espécies podem entrar em extinção e intensificação da acidificação oceânica (dado o aumento da concentração de CO₂ na atmosfera ocorre a diminuição do pH dos oceanos). Evidências apontam que esse efeito trará graves consequências para a vida marinha. Dentre essas vale ressaltar: a ameaça à formação de organismos como plânctons, moluscos e corais e a redução da fertilidade de inúmeras espécies como lagostas, caranguejos, mexilhões e peixes principalmente.

Aos países em desenvolvimento, o aquecimento global trará mais cedo esses e muitos outros desastres e desafios. Primeiro pela sua posição geográfica - eles já são normalmente mais quentes do que os países desenvolvidos. Segundo, pois os países em desenvolvimento, principalmente os mais pobres, são enormemente dependentes da agricultura - o setor econômico mais susceptível às intempéries e aos desastres naturais. E por último, por que suas condições de baixo rendimento e vulnerabilidades particulares tornam a adaptação às alterações climáticas consideravelmente mais difíceis. Redução no PIB e no IDH e aumento da necessidade com gastos de recuperação dos futuros desastres, tornarão ainda pior a receita pública nesses países.

Alguns países desenvolvidos que possuem clima muito frio poderão num primeiro momento beneficiar-se com o aumento da temperatura global. Mas com o contínuo aumento das condições meteorológicas extremas e, portanto, também os seus custos, esses benefícios iniciais das alterações climáticas serão neutralizados. Os custos do clima extremo, por si só, estão estimados em torno de 0,5% a 1% do PIB mundial até cerca de 2050. Nos EUA, os custos dos danos anuais, com o aumento previsto de 5% a 10% da velocidade dos furacões, irão duplicar. Com temperaturas médias globais de 3 a 4°C maior, os prejuízos com inundações irão aumentar de 0,1% do PIB global anual para 0,2% a 0,4%, o que significa de 5,36 a 10,72 bilhões de dólares. Além disso, a morte de 35.000 pessoas e as perdas agrícolas estimadas em torno de 15 bilhões de dólares, devido às ondas de calor, como as observados na Europa em 2003, serão pequenas àquelas que por ventura ocorrerão até a metade do século (Stern).

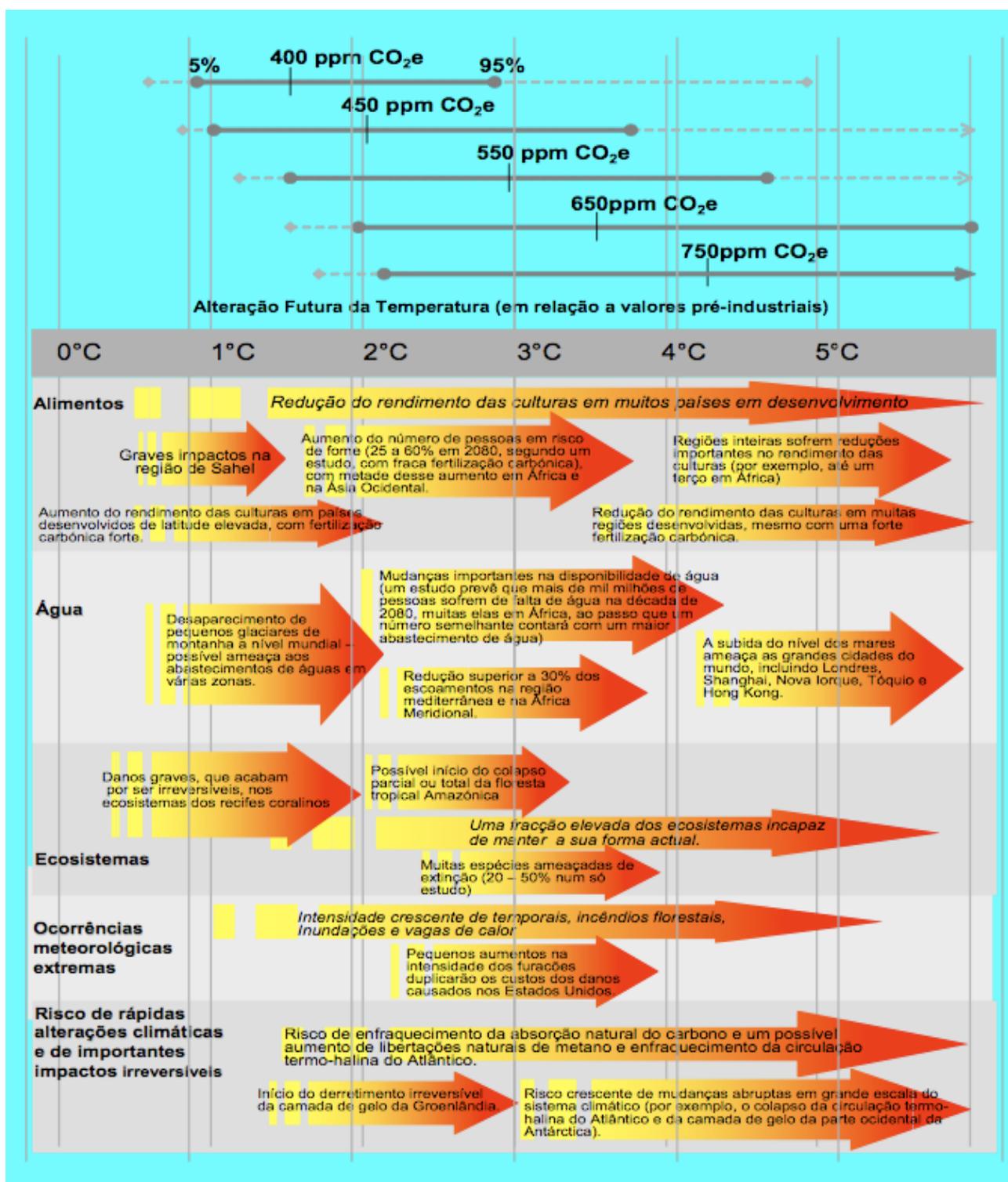


Figura 2.1 - Relação entre a concentração de CO₂e na atmosfera e aumento da temperatura média e suas consequências (Fonte: Stern).

Os modelos atuais que indicam, infelizmente, maior frequência e maiores consequências dos impactos, relatam que com um aquecimento de 5 a 6°C - possibilidades apontada para o século XXII - a perda média global seria de 5% a 10% do PIB mundial, com os países pobres podendo sofrer além dos 10%

do PIB. Este é o resultado de um modelo específico, PAGE2002, utilizado pelo relatório STERN que considera um cenário de trajetórias de inação (BAU - business-as-usual) com relação às emissões .

Esta estimativa de custo já é impressionante, mas mesmo assim ainda exclui muito de todo o leque de graves conseqüências levantado pelas pesquisas e modelos desenvolvidos. Se os impactos no ambiente e na saúde humana fossem considerados, as perdas poderiam chegar a 11% do PIB global. Além disso, incluindo os impactos não-comerciais devido à existência de cadeias amplificadoras, tais como a liberação de metano e o enfraquecimento da capacidade natural do planeta em absorver carbono, essa faixa da perda média global ficaria entre 7 a 14% do PIB.

Somente sólidas políticas de mitigação serão capazes de diminuir a probabilidade dos riscos já citados. E isso deve ser estipulado o quanto antes, pois quanto mais cedo agirmos menos gastos com desastres serão alcançados. Os mecanismos de mitigação são fundamentais para atacar os males da sociedade carbonizada. Tanto as economias desenvolvidas quanto aquelas em desenvolvimento devem se comprometer. A cooperação internacional deve ser instaurada para que a estabilização climática aconteça, mantendo ao mesmo tempo o crescimento econômico em ambas as partes.

O estudo STERN considera que as emissões globais anuais deverão ser reduzidas a 5 GtCO₂e, nível ao qual a Terra pode absorver a concentração dos GEE sem, por inércia, acrescentar-lhe mais. Este nível é inferior a mais de 80% do nível absoluto das emissões anuais atuais e isso demonstra o urgente esforço que deve ser feito para minimizar o mais rápido possível nossas emissões.

“Para estabilizar a concentração de CO₂e em 450ppm, sem ultrapassar este nível, as emissões globais deveriam atingir seu ponto máximo nos próximos 10 anos e em seguida baixar em mais de 5% por ano, ficando até 2050 70% abaixo do níveis atuais. O estudo calcula que os custos anuais de estabilização da concentração de CO₂e entre 500 e 550 ppm serão da ordem de 1% do PIB até 2050 - um nível que é significativo mas viável” (Estudo Stern).

O relatório STERN aponta três medidas que podem ser tomadas para redução das emissões dos GEE:

- Redução da procura de mercadorias e serviços intensivos em emissões;
- Aumento da eficácia, que pode poupar não só dinheiro como emissões;
- Ação no tocante a emissões não energéticas, como por exemplo, a prevenção da descarbonização;

Os custos da implementação das medidas acima citadas e a utilização de métodos macroeconômicos que exploram os efeitos em todo sistema de transição para uma economia energética de baixo carbono, são as duas maneiras de se efetuar o cálculo dos custos das mudanças, ou dessas ações mitigadoras. Com base nisso, para a estabilização de 500 a 550 ppm de CO₂e na atmosfera, os custos até 2050 são apontados em cerca de 1% do PIB anual global (Stern).

Para se alcançar soluções para a redução radical de emissões a médio e longo prazo, é fundamental que a adoção das medidas sugeridas seja dada em grande escala. Assim, a contribuição do setor energético a nível mundial para alcançar a estabilização dos níveis acima citados, traduz-se na descarbonização (mudança para tecnologias de baixa emissão carbono) de toda sua cadeia em 60% e talvez em 75% até 2050 (Stern).

Quanto mais rápido e com maior eficácia as ações são tomadas, menores serão os custos. A opção de “não se fazer nada” (cenário BAU), significa concordar com a destruição do nosso planeta e arcar com custos cerca de dez vezes maiores. Por outro lado, as economias mais flexíveis e dinâmicas terão maior sucesso. Além de ajudar a contornar o problema das alterações climáticas, a promoção de políticas que ataquem as ineficiências existentes também irá contribuir para a redução dos problemas de saúde e mortalidade, a preservação de florestas, a diminuição da pobreza, o crescimento da segurança e o aumento da eficiência energética. “A transição para uma economia de baixo carbono trará desafios para a competitividade, mas oferecerá também oportunidades de crescimento” (Estudo Stern).

“A política para reduzir emissões deve ser baseada em três elementos essenciais: a fixação do preço do carbono, a política tecnológica e a eliminação de barreiras à alteração comportamental” (Estudo Stern). Isso mostra claramente que todos são responsáveis pelo futuro da humanidade. Não somente governos, organizações e empresas devem agir, mas também a sociedade deve se mobilizar.

A fixação do preço do carbono conduzirá os particulares e as empresas a investirem cada vez mais em modelos de bens e serviços que produzam baixa emissão de CO₂e. A ferramenta política tecnológica deve estimular e acelerar o processo de transição da matriz energética mundial e toda sua cadeia de suprimento para o uso disseminado de tecnologias “limpas”. O terceiro elemento será vencido com a disponibilidade de informação, execução de normas mínimas, fiscalização para processos produtivos eficientes e tornar cada vez mais rentável o potencial de mudança para eficiência energética muito próxima da ideal.

Muitas dessas tecnologias de baixo carbono ainda são mais caras do que as atuais, baseadas em combustíveis fósseis. No entanto, toda descoberta e novidade passa por uma fase de difusão, experiência e economia em escala, conduzindo seu preço para os mesmos patamares observados de tecnologias já “maduras”. Esse aprendizado é ilustrado na figura 2.2 abaixo. Assim, podemos dizer que uma nova tecnologia de geração de eletricidade é inicialmente muito mais dispendiosa do que uma tecnologia bem estabelecida, mas à medida que seu uso é difundido e sua escala aumenta, seus custos diminuem e, a partir do ponto A, essa tecnologia já se mostra competitiva economicamente. Tecnologias que utilizam combustíveis fósseis para a geração de eletricidade também passaram por esse processo, como observado historicamente. Além disso, segundo o trabalho da Agência

Internacional de Energia e outros organismos, estas relações são válidas para uma gama de tecnologias energéticas diferentes, inclusive as novas fontes renováveis de energia.

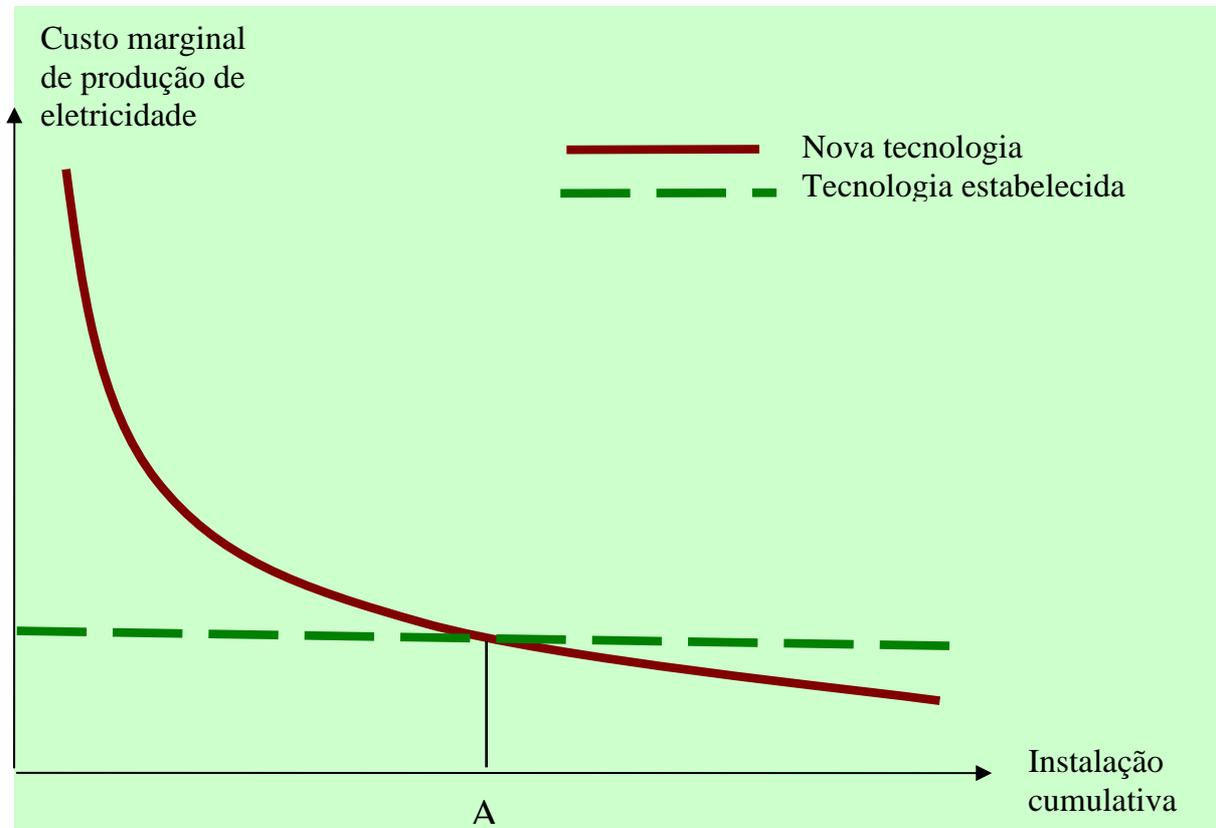


Figura 2.2 - Curva de aprendizado

Os três anos mais quentes dos últimos 1.000 anos foram observados nesta última década. Está claro que a mudança global do clima é fato real e corrente. Ao longo deste século serão vistas as consequências dessa alteração cada vez com maior intensidade e frequência, pois o aquecimento global já não é mais passível de ser revertido totalmente. Logo, a adaptação às intempéries servirá como única resposta para os impactos que ocorrerão até que as medidas de mitigação produzam efeito. Diferente dessas medidas, porém, a adaptação traz benefícios locais e de curto prazo. Temperaturas cada vez mais elevadas aumentam os custos da adaptação.

O estudo aponta custos suplementares de 15 a 150 bilhões de dólares anuais para tornar as novas infraestruturas e edifícios resistentes às alterações climáticas nos países que fazem parte da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE). Novamente, tais custos podem ser mais agudos para os países em desenvolvimento, cuja maior vulnerabilidade e pobreza fortalecem os desafios da adaptação.

2.2 O EFEITO ESTUFA E O AQUECIMENTO GLOBAL

O Sol é a principal fonte de energia da Terra e este aquece tanto a superfície quanto a atmosfera. A Terra recebe a radiação solar na forma de ondas curtas. De toda a radiação que incide no planeta, aproximadamente 30% são refletidas de volta ao espaço por meio das nuvens, gelo, neve, areia e outros. Cerca de 50% chegam a superfície terrestre e são absorvidos, os 20% restantes são absorvidos pelos gases e pelas gotículas de água.

Devido ao fato que a superfície da Terra é aquecida, como consequência ocorre uma irradiação desta para a atmosfera. Em valores, cerca de 390 W/m^2 são irradiados para a atmosfera. Sendo que 240 W/m^2 conseguem atravessar a atmosfera chegando até o espaço. A parcela restante, 150 W/m^2 , é absorvida e refletida de volta a superfície por meio dos gases causadores do efeito estufa (IPCC, 1995). Esse é um processo espontâneo, conhecido como efeito estufa natural, que é responsável por manter a temperatura média da Terra em 14°C (IPCC, 1996).

Os responsáveis por esse fenômeno são as concentrações de vapor d'água, dióxido de carbono e uma parcela pequena de outros gases na atmosfera terrestre, conhecidos como gases de efeito estufa. Esses gases atuam da seguinte forma, a radiação luminosa e as outras formas de radiação do espectro eletromagnético são capazes de atravessar os gases chegando a superfície. Mas quando a superfície terrestre reflete a energia na forma de radiação infravermelha os gases de efeito estufa absorvem essa energia e a reenviam a Terra na forma de energia térmica (IPCC, 1996).

No último século as atividades antropogênicas influenciaram fortemente o nível da concentração dos GEE na atmosfera como o CO_2 , CH_4 , N_2O e outros. As mudanças das concentrações desses gases podem ter alterado o balanço energético das trocas de energia entre atmosfera, terra, oceanos e o espaço. A medida das mudanças da energia presente no sistema Terra-Atmosfera é conhecido como forçamento radiativo (IPCC, 1996). Assumindo-se que todas as variáveis desse sistema se mantenham constantes, excluindo-se a variável das concentrações dos GEE, que no caso estão aumentando, ocorre o forçamento radiativo positivo, ou seja, o aumento da absorção de energia no sistema Terra-Atmosfera.

A partir da intensificação das atividades antropogênicas - um marco é a Revolução Industrial - os índices de concentração dos GEE entraram numa escala ascendente ocasionando impactos globais referentes ao clima, como o aumento da temperatura já detectado. Esse aumento, dentre outras coisas, possivelmente alterou o regime de precipitações ao redor do mundo. Um acréscimo de 1% nas precipitações foi observado nos continentes, geralmente nas zonas de latitudes superiores enquanto que nas zonas tropicais o efeito foi reverso (IPCC, 1995).

As principais fontes de emissão dos GEE são as atividades industriais, a produção e utilização de energia que utilizam combustíveis fósseis além dos desmatamentos e queimadas.

O maior responsável por esses efeitos é o gás CO₂, responsável por 60% do aumento radiativo positivo, sendo emitido principalmente por atividades que envolvem produção de energia, representando 70 a 90% do total das emissões deste gás.

Medidas como a mudança de uma parcela da produção de energia substituindo combustíveis fósseis por fontes renováveis de energia, dentre outras, devem ser tomadas para a redução das emissões de GEE. Outra importante atitude é a conscientização da indústria e investidores privados para a utilização de fontes alternativas e métodos e processos cada vez mais eficientes. O forte apoio à disseminação do mercado de carbono e à criação de políticas públicas que possibilitem a transição para o não uso de combustíveis fósseis também se faz urgente.

2.3 POLÍTICAS PARA REDUÇÃO DA EMISSÃO DE CO₂

Em 1992 foi realizada a Conferência das Nações Unidas para o Meio Ambiente e Desenvolvimento (CNDUMAD) na cidade do Rio de Janeiro. Tendo como resultado o tratado internacional conhecido como Conferência Quadro das Nações Unidas para as Alterações Climáticas (CQNUAC), que foi assinado por quase todos os países do mundo. Este tratado tem como objetivo a estabilização da concentração dos níveis de GEE na atmosfera para evitar que cheguem a níveis perigosos nos quais interfiram no sistema climático. Apesar disso o tratado não fixou metas obrigatórias de emissões de GEE para os países. Ao invés disso, foram criadas disposições para que no futuro o tratado fosse atualizado por meio dos “protocolos”.

Após algumas conferências e importantes relatórios que foram publicados, dos quais tratavam sobre meio ambiente, em 1997 no Japão, foi discutido e negociado o Protocolo de Quioto. Este foi ratificado em março de 1999, mas entrou em vigor apenas no ano de 2005, quando atingiu o número referente a quantidade de nações responsáveis pela emissão de 55% do CO₂, tornando-se o mais importante e conhecido tratado internacional sobre o meio ambiente.

O Protocolo de Quioto firma metas severas para a redução das emissões de GEE, que segundo uma grande parcela das pesquisas científicas, é causada por atividades antropogênicas que ocasionam um grave problema, o aquecimento global.

A meta de redução das emissões de GEE para os países-membros, principalmente os desenvolvidos, é de 5,2% em relação aos níveis de 1990 no período entre 2008 e 2012. Isso implicaria para alguns países, como os da União Européia, uma redução de aproximadamente 15% das emissões em relação aos níveis atuais. Essa meta não se aplica a países em franco desenvolvimento como Brasil, Índia e China. Para esses, por enquanto, existem outros tipos de programa que podem ser aplicados. Após 2012 um novo protocolo deve ser discutido, pois países como China e Índia já estão se tornando um dos maiores responsáveis pelas emissões de GEE.

No intuito de que os países membros do Anexo I do Protocolo de Quioto alcancem as metas impostas, o protocolo criou mecanismos de flexibilização. Estes são arranjos regulamentados pelo próprio protocolo. Os mecanismos são os seguintes: Comercio Internacional de Emissões (CIE), Implementação Conjunta (IC) e Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL).

O CIE é realizado entre os países membros do Anexo I e funciona da seguinte forma. Aquele país que diminuiu suas emissões além da meta poderia negociar essa sobra entre os outros países nos quais ainda não tivessem alcançado o objetivo. A IC também é realizada entre países membros do Anexo I, mas seu objetivo é que projetos de redução da emissão de GEE sejam implementados nos países que estão em transição de desenvolvimento.

O mecanismo mais interessante é o MDL, pois engloba tanto os membros do Anexo I quanto os não membros. Os países em desenvolvimento (Não Partes do Anexo I) são incentivados a implementar projetos de desenvolvimento sustentável que tenham como objetivo a redução das emissões ou captura de GEE, assim podem emitir Reduções Certificadas de Emissões (RCE). Os RCEs são emitidas pelo Conselho Executivo do MDL e podem ser negociadas no mercado global. Logo, países do Anexo I podem comprar esses créditos para conseguirem atingir as suas respectivas metas de redução.

O MDL engloba projetos que trabalhem com fontes renováveis de energia e alternativas de energia, eficiência e conservação de energia ou reflorestamento. A aprovação de projetos que contemplem o MDL não é trivial, pois existem regras claras e rígidas para a aprovação. Estes devem ser verificados e validados por Entidades Operacionais Designadas (EODs), e devem ser aprovados e registrados pelo Conselho Executivo do MDL. Além de que a aprovação pelo governo do país anfitrião do projeto por meio da Autoridade Nacional Designada (AND) se faz necessária. No Brasil, a Comissão Interministerial de Mudanças Climáticas atua como AND.

Os RCEs depois de emitidos são comercializados no Mercado do Carbono. Atualmente existem no mundo alguns mercados de carbono como, por exemplo, o da União Européia e o Mercado Voluntário. O Mercado da União Européia tem como função comercializar os créditos de carbono (um crédito de carbono é igual a uma tonelada de dióxido de carbono equivalente) entre as indústrias dos países pertencentes.

Os grupos, setores e empresas que não precisam diminuir suas emissões de GEE por meio do Protocolo de Quioto em países não signatários têm como alternativa a comercialização das reduções de GEE nos mercados voluntários. A Bolsa do Clima de Chicago é um ótimo exemplo de mercado voluntário no qual comercializa também os RCEs.

Devido à crise internacional que abalou a economia mundial no último ano o mercado para a negociação dos créditos de carbono também sofreu algum impacto. As indústrias produziram menos assim emitiram uma menor quantidade de GEE, logo a demanda por créditos de carbono foi inferior.

A tabela 2.1 trás uma pesquisa encomendada pela Reuters aos analistas de mercado para preverem o preço médio de RCEs até 2012.

Tabela 2.1 – Previsão do valor em reais das RCEs até 2012.

	2009	2010	2011	2012
Barclays Capital	26,8	30,6	40,8	40,8
COER2	28,0	33,2	37	40,8
Point Carbon	25,5	33,2	35,7	40,8
Société Générale	28,6	36	45,9	45,9

Fonte: Reuters, 2009.

2.4 MITIGAÇÕES OBITIDAS POR MEIO DE SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

Os sistemas fotovoltaicos (FV) são geradores de energia elétrica livres de poluição, ou seja, não emissores de GEE. O sistema como um todo é responsável pela emissão de poluentes apenas na fabricação de seus componentes, como painéis e inversores. Assim, torna-se possível mensurar quanto os países que possuem sistemas fotovoltaicos instalados conseguiram reduzir nas suas emissões de GEE.

Por meio de alguns dados de cada país, como potência fotovoltaica instalada, irradiação solar, quantidade de energia produzida por Wp instalado e da média de emissão de CO₂ equivalente referente a matriz energética, podemos obter a quantidade de GEE que cada nação deixou de enviar a atmosfera.

A potência instalada em cada país é um dado que varia um pouco de acordo com a fonte utilizada, principalmente porque existem alguns sistemas fotovoltaicos que não são registrados. A tabela 2.2 mostra essa informação. Ela foi elaborada a partir de dados que cada governo enviou a IEA e por meio de perspectivas.

Essa tabela mostra como países como Alemanha, Espanha, Japão e Estados Unidos já estão desenvolvidos na aplicação de sistemas FV. E outros países - Coreia do Sul, França, Itália e Portugal - que estão em ascensão devido aos incentivos criados.

Outra variável que deve ser mencionada para o cálculo de GEE não lançado na atmosfera é a quantidade de energia gasta para produzir 1 kWp de geração FV. São consideradas as energias que foram utilizadas para laminar o silício, fazer a estrutura e o balanço do sistema. Assim o gasto total de energia é igual a 2525 kWh para cada kWp. A tabela 2.3 apresenta todas essas informações detalhadas.

Tabela 2.2 – Potência instalada acumulada de sistemas fotovoltaicos em MW.

País	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008
AUSTRÁLIA	29,2	33,6	39,1	45,6	52,3	60,6	70,3	82,5	104,5
AUSTRIA	4,9	6,1	10,3	16,8	21,1	24,0	25,6	27,7	32,4
ALEMANHA	113,7	194,6	278,0	431,0	1034,0	1926,0	2759,0	3835,5	5340,0
CANADÁ	7,2	8,8	10,0	11,8	13,9	16,7	20,5	25,8	32,7
COREIA DO SUL	4,0	4,8	5,4	6,0	8,5	13,5	35,8	81,2	357,5
DINAMARCA	1,5	1,5	1,6	1,9	2,3	2,7	2,9	3,1	3,3
ESPANHA	2,0	4,0	7,0	12,0	23,0	48,0	145,0	693,0	3354,0
ESTADOS UNIDOS	138,8	167,8	212,8	275,2	376,0	47,9	624,0	830,0	1168,5
FRANÇA	11,3	13,9	17,2	21,1	26,0	33,0	43,9	75,2	179,7
ITÁLIA	19,0	22,0	22,0	26,0	30,7	37,5	50,0	120,2	458,3
JAPÃO	330,2	452,8	636,8	859,6	1132,0	1421,9	1708,5	1918,9	2144,2
PORTUGAL	1,1	1,3	1,7	2,1	2,7	3,0	3,4	17,9	68,0
PAÍSES BAIXOS	12,8	20,5	26,3	45,7	49,2	50,7	52,2	52,8	57,2
REINO UNIDO	1,9	2,7	4,1	5,9	8,2	10,9	14,3	18,1	22,5
SUÉCIA	2,8	3,0	3,3	3,6	3,9	4,2	4,8	6,2	7,9
Total	680,4	937,4	1275,6	1764,3	2783,8	4131,7	5560,2	7788,1	13330,7

Fonte: IEA, 2009.

Tabela 2.3 – Energia gasta para produzir um sistema FV.

	Energia Elétrica [kWh/kWp]
Laminação	2205
Estrutura	91
Balanço do Sistema	229
Total do sistema	2525

Fonte: IEA, 2009.

A matriz energética de cada país influencia diretamente na quantidade de GEE que cada um emite ou deixará de emitir utilizando fonte renovável de energia. Para chegar a tal resultado, deve-se primeiro saber como se compõe determinada matriz energética. Assim, tendo conhecimento de quanto cada tipo de sistema de geração emite de CO₂, chega-se a um valor total de emissões de GEE em cada nação. Segundo a IEA, esses valores são apresentados nas tabelas 2.4 e 2.5 abaixo.

Tabela 2.4 – Quantidade de GEE emitido conforme a fonte energética.

Fonte	[tCO ₂ /MWh]
Nuclear	0
Hidráulica	0
Carvão	0,999
Óleo	0,942
Gás	0,439
Geotérmica, Solar, Eólica e outras	0

Fonte: Fonte: IEA, 2009.

Tabela 2.5 – Divisão das fontes energéticas e estimativa da emissão de GEE por cada kWh gerado

País	Nuclear	Hidráulica	Carvão	Óleo	Gás	Geotérmica, Eólica e outras	Solar	GEE estimado [kgCO ₂ /kWh]
AUSTRÁLIA	0%	7%	77%	1%	14%	1%		0,841
AUSTRIA	0%	61%	15%	3%	18%	4%		0,221
ALEMANHA	28%	4%	52%	1%	10%	5%		0,574
BRASIL	3%	76%	2,5%	6,5%	11%	1%		0,102
CANADÁ	13%	58%	19%	3%	6%	2%		0,243
COREIA DO SUL	37%	2%	39%	9%	12%	1%		0,498
DINAMARCA	0%	0%	55%	5%	21%	19%		0,536
ESPAÑA	24%	17%	29%	9%	15%	6%		0,444
ESTADOS UNIDOS	19%	7%	51%	3%	16%	2%		0,609
FRANÇA	78%	11%	5%	2%	3%	1%		0,080
ITÁLIA	0%	15%	15%	26%	40%	4%		0,569
JAPÃO	23%	10%	28%	13%	24%	2%		0,508
PORTUGAL	0%	34%	31%	13%	16%	5%		0,491
PAÍSES BAIXOS	4%	0%	28%	3%	59%	6%		0,512
REINO UNIDO	22%	2%	35%	2%	37%	2%		0,532
SUÉCIA	50%	39%	3%	3%	0%	5%		0,042

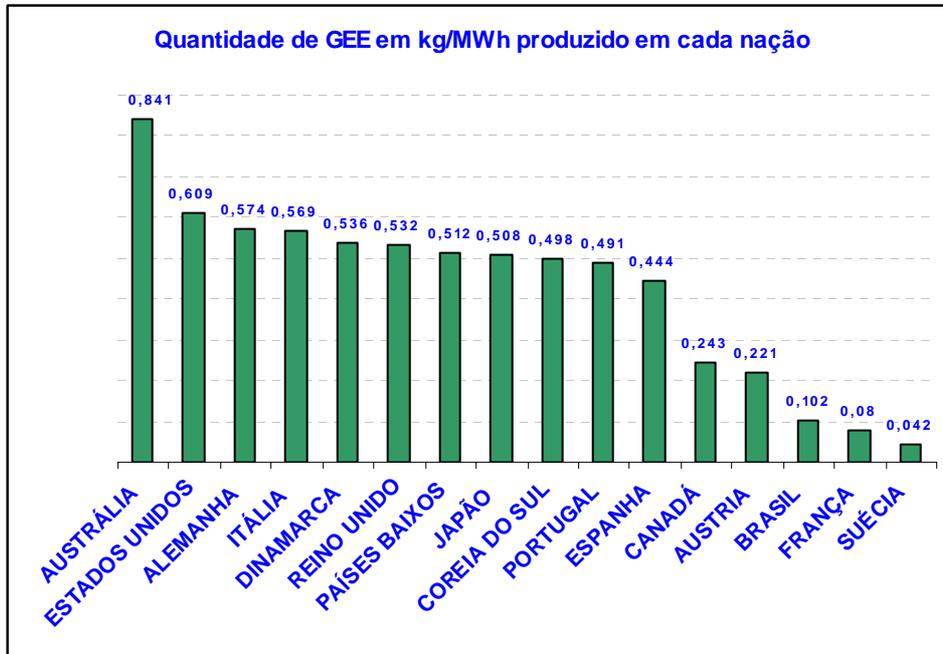
Fonte: IEA, 2009. Modificada.

Através da tabela 2.5 e do gráfico 2.1 observa-se como a matriz energética de cada país no mundo pode ser variada. Comprova-se também que países como Austrália, Alemanha, Coreia do Sul, Dinamarca, Estados Unidos, Japão, Países Baixos e Reino Unido tem uma concentração de CO₂ por kWh gerado alta. Isso, provavelmente, deve-se ao fato de que a maioria de suas fontes energéticas são provenientes de usinas térmicas baseadas em combustíveis fósseis.

No Brasil, as emissões de GEE devido ao uso e consumo de energia elétrica não é tão alto como observado nos países citados logo acima. Isso se deve ao alto índice de hidrelétricas que compõem seu parque de geração. Porém, o potencial de geração hídrico do país está sendo protegido por leis ambientais cada vez mais restritas e a construção de UHEs torna-se cada vez mais lenta e complicada. Dessa forma, o governo brasileiro estuda a possibilidade de agregar cada vez mais termelétricas à sua matriz de geração, tendo como discurso a facilidade de se implantar tais usinas. Veremos, no entanto,

no capítulo 4, as graves conseqüências sociais e ambientais de implantação de termelétricas, mais especificamente daquelas cujo combustível é carvão mineral.

Gráfico 2.1 – Quantidade de GEE emitida por cada nação em kg/MWh.



Outro dado importante é a quantidade de energia estimada que cada sistema FV é capaz de produzir. Como a irradiação solar é diferente dependendo da região em que é medida, foi preciso escolher apenas um lugar, assim foi escolhida uma cidade em cada país de acordo com a melhor irradiação.

O relatório da IEA-PVPS-Task 10 de 2009 fornece o valor da energia gerada por cada kWp instalado em cada cidade escolhida. Foi levado em consideração sistemas FV instalados em telhados e em fachadas separadamente. Um fator de 75% também foi utilizado como rendimento global do sistema. A equação (1) foi aplicada para o cálculo citado.

$$E = (H/P).PR \quad (1)$$

E: Energia anual de produzida em kWh/kWp.ano

H: Irradiação global no plano horizontal em kWh/m².ano

P: Potência nominal do sistema FV em kWp/m²

PR: Rendimento Global do sistema

Com todos esses resultados, a tabela 2.6 mostra o quanto cada país produziu de energia limpa, e a quantidade de GEE que foi mitigada.

O uso da geração fotovoltaica se mostra uma poderosa ferramenta também para a mitigação da emissão de GEE. Países que tem uma alta concentração de CO₂ por unidade de kWh gerado ao mesmo

tempo têm um bom potencial para reduzir essa estatística. O Brasil, por exemplo, pode aproveitar essa tecnologia para tornar seu parque de geração ainda mais limpo, evitando emitir algumas toneladas de CO₂ por ano.

Somente esses 15 países da tabela 2.6 são responsáveis por deixarem de emitir, no melhor caso, 8,14 milhões de toneladas CO₂. Em relação ao cenário mundial, essa parcela representa menos que 1 milésimo dos atuais 29 bilhões que são emitidos (IEA, Key World Energy Statistic 2009), mas a parcela de energia elétrica que é gerada com esses sistemas também é reduzida, cerca de 15,7 TWh por ano. Enquanto que mundialmente são produzidos 18.187 TWh. Ou seja, tão somente uma fração de 0,86 milésimos.

Mas isso mostra que é possível promover a mitigação de GEE e a utilização de sistemas FV é uma considerável opção tanto para reduzir as emissões quanto para tornar as matrizes energéticas de cada país mais diversificadas, menos dependentes dos combustíveis fósseis.

Tabela 2.6 – Resultado da Mitigação de GEE em cada país.

País	Cidade	Energia Gerada por um sistema FV no telhado [kWh/kWp.ano] Caso 1	Energia Gerada por um sistema FV na fachada [kWh/kWp.ano] Caso 2	Potência Instalada [MWp]	Média de GEE emitido pela matriz energética [kgCO ₂ /kWh]	Estimação de GEE emitido anualmente [tCO ₂] Caso 1	Estimação de GEE não emitido anualmente [tCO ₂] Caso 2
AUSTRÁLIA	Perth	1587	932	104,5	0,841	139.473	81.908
AUSTRIA	Viena	906	598	32,4	0,221	6.487	4.282
ALEMANHA	Munique	960	660	5340,0	0,574	2.942.553	2.023.005
CANADÁ	Ottawa	1188	826	32,7	0,243	9.440	6.563
COREIA DO SUL	Seoul	1002	674	357,5	0,498	178.391	119.996
DINAMARCA	Copenhague	850	613	3,3	0,536	1.503	1.084
ESPAÑA	Sevilha	1460	895	3354,0	0,444	2.174.196	1.332.812
ESTADOS UNIDOS	Los Angeles	1512	913	1168,5	0,609	1.075.964	649.706
FRANÇA	Marselha	1317	878	179,7	0,080	18.933	12.622
ITÁLIA	Roma	1315	861	458,3	0,569	342.916	224.525
JAPÃO	Hiroshima	1073	668	2144,2	0,508	1.168.769	727.621
PORTUGAL	Lisboa	1388	858	68,0	0,491	46.343	28.647
PAÍSES BAIXOS	Amsterdã	886	611	57,2	0,512	25.948	17.894
REINO UNIDO	Londres	788	544	22,5	0,532	9.432	6.512
SUÉCIA	Estocolmo	860	639	7,9	0,042	285	212

Fonte: IEA, 2009.

3 O SISTEMA FOTOVOLTAICO

Para que a Revolução Industrial acontecesse, foi primordial a ascensão da geração de todas as formas de energia. Para tal, a principal fonte primária foi e continua sendo a de combustíveis fósseis, como petróleo e carvão.

Como visto no capítulo 2, a utilização abundante de combustíveis fósseis provoca vários problemas de caráter ambiental. Um dos principais é o agravamento do efeito estufa, o qual está causando vários problemas, como o aumento da temperatura média da terra, mudanças nos regimes de chuvas e um incremento no nível dos oceanos.

Uma das formas de minimizar a causa desses problemas ambientais seria a substituição dos combustíveis fósseis como fonte primária de energia por fontes menos poluentes ou com grau de poluição próximas a zero. Essas são conhecidas como fontes renováveis de energia. Algumas opções são a geração hidráulica, a eólica, a célula combustível à hidrogênio ou a geração fotovoltaica.

A geração fotovoltaica já se encontra em pleno grau de aplicação comercial, além de ser uma alternativa ambientalmente favorável. Enquanto gerando energia elétrica, essa fonte não polui o meio ambiente de nenhuma forma. O sistema fotovoltaico apresenta pequeno grau de poluição, apenas na fase de produção de seus componentes. Esses componentes, quando entram em desuso, podem ser quase que completamente reciclados e reaproveitados.

Um sistema fotovoltaico pode ser implementado como geração distribuída - pequenas centrais produtoras da ordem de poucos quilowatts - ou geração centralizada - grandes centrais produtoras da ordem de megawatts de potência de pico instalada. Os sistemas fotovoltaicos podem ser isolados, ou seja, aqueles que não estão conectados a rede elétrica ou não isolados, conhecidos como sistemas fotovoltaicos conectados à rede elétrica (SFCR).

Os principais componentes do sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) são os módulos fotovoltaicos formados pelas interconexões das células fotovoltaicas, o inversor, os medidores, toda a estrutura de sustentação dos módulos, além dos cabos elétricos e dos sistemas de proteção do sistema.

A disseminação e o aprimoramento das tecnologias solar fotovoltaicas se deram, fundamentalmente, em razão da configuração do SFCR. Este dispensa o uso de um banco de baterias, tornando-se assim mais barato e como consequência apresentando maior facilidade de aceitação no mercado energia.

O mercado de fontes alternativas de energia não para de crescer e com certeza não irá estagnar, pois os principais combustíveis de geração empregados até hoje estão com seus dias contados. Haja vista, a geração fotovoltaica é uma opção possível e altamente considerável de ser inserida na matriz energética de qualquer nação.

3.1 DEFINIÇÃO

O sistema FV é definido como um sistema composto por um arranjo solar fotovoltaico, responsável por transformar uma parte da energia (ou radiação) solar recebida em energia elétrica por meio dos painéis fotovoltaicos. Um sistema FV pode ser planejado para operar gerando energia elétrica de duas formas. A primeira é caracterizada por um sistema centralizado, capaz de produzir uma elevada quantidade de energia em um espaço físico requerido relativamente grande, semelhante as usinas de geração convencionais. Nesta configuração, o uso de um sistema de transmissão e distribuição (T&D) faz-se necessário para que a energia gerada chegue até o consumidor final. A segunda configuração desse sistema consiste no arranjo de geração distribuída, pequenos sistemas geradores de energia elétrica, da ordem de poucos quilowatts, instalados próximos aos pontos de consumos, em edificações (casas e prédios), funcionando como um produtor independente de eletricidade. Portanto, não há necessidade de despacho de energia pela rede de T&D.

3.2 APLICAÇÕES FOTOVOLTAICAS

Segundo o relatório que aponta as tendências de implementação de sistemas FV (IEA, 2008), existem quatro aplicações básicas para esses sistemas.

3.2.1 Doméstico isolado

Os sistemas fotovoltaicos domésticos isolados são aqueles usados na maioria das vezes em comunidades, vilas ou áreas rurais mais afastadas dos centros de geração e/ou das redes de distribuição. Para o sistema fotovoltaico, isolado significa ausência de conexão com a rede elétrica. Normalmente da ordem de 1 a 3 kW de potência, esse sistema é uma alternativa econômica viável para atender comunidades que estão localizadas a mais de 1 ou 2 km de uma linha de transmissão já existente. Sua utilização se dá principalmente para fornecer eletricidade a cargas pequenas, porém essenciais, como luz e refrigeração. Esse tipo de aplicação tem uma grande importância, pois é capaz de levar aprimorar o desenvolvimento e elevar a qualidade de vida a população atendida.

3.2.2 Não-doméstico isolado

A configuração não-doméstica isolada (em lugares inóspitos) foi a primeira a ser usada comercialmente na Terra, pois sabe-se que as primeiras formas de utilização de sistema FV surgiram para alimentar satélites em órbita no espaço. Telecomunicações, sistemas de sinalização para navegação ou orientação, bombas d'água, aparelhos de pequeno porte são as principais aplicações desse tipo de sistema FV. São economicamente competitivos pela necessidade de fornecer energia em

pequenas quantidades - um sistema de sinalização, por exemplo, é composto de poucos LED's e necessita de uma bateria pequena para funcionar em períodos de ausência solar.

3.2.3 Conectado à rede distribuído

A conexão de um sistema fotovoltaico de uma casa ou de um edifício comercial à rede elétrica da distribuidora caracteriza o que é chamado na literatura de sistemas fotovoltaicos conectados à rede (SFCR). Por estar próximo do consumidor final, eles são também denominados sistemas distribuídos. Além de fornecer energia elétrica à edificação na qual ele foi inserido, integrado à ela ou não, este tipo de sistema também pode revender ou repassar diretamente o excedente energético para a concessionária, quando existir.

Com a evolução da tecnologia de produção dos módulos fotovoltaicos, o mercado hoje disponibiliza módulos de vários tipos, tamanhos, cores, potência e com certo grau de flexibilidade (parecidos com adesivos até). Assim, dependendo da característica do sistema FV, ele serve não somente para gerar eletricidade, mas também para ser integrado à estrutura das edificações e agregar maior valor estético ao projeto.

Os sistemas fotovoltaicos integrados à edificações (FVIE) são uma realidade no mundo atual. Engenheiros e arquitetos que trabalham com projetos de edificações ecologicamente corretas e o uso desses sistemas tem o intuito de evitar maiores gastos com material de construção e torná-las sustentáveis.

Aqueles edifícios que utilizam o sistema FV integrado à sua estrutura têm a grande vantagem da economia no acabamento. As placas e os filmes finos de FV podem ser aplicados para revestir todo o edifício, desde a fachada até a parte superior. Com isso tem-se uma economia de investimento em revestimentos tradicionais (vidro, metais, granito, mármore e etc.). Esse custo evitado torna o investimento inicial no sistema FV menor e observa-se também um custo de instalação desse sistema reduzido, pois ele será aplicado no ato da construção do edifício.

A figura 3.1 apresenta um esquema simplificado da configuração de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica. Nesse sistema é fundamental a utilização de um inversor, que faz a conversão da energia elétrica gerado em CC para CA, localizado entre o gerador fotovoltaico e a rede.

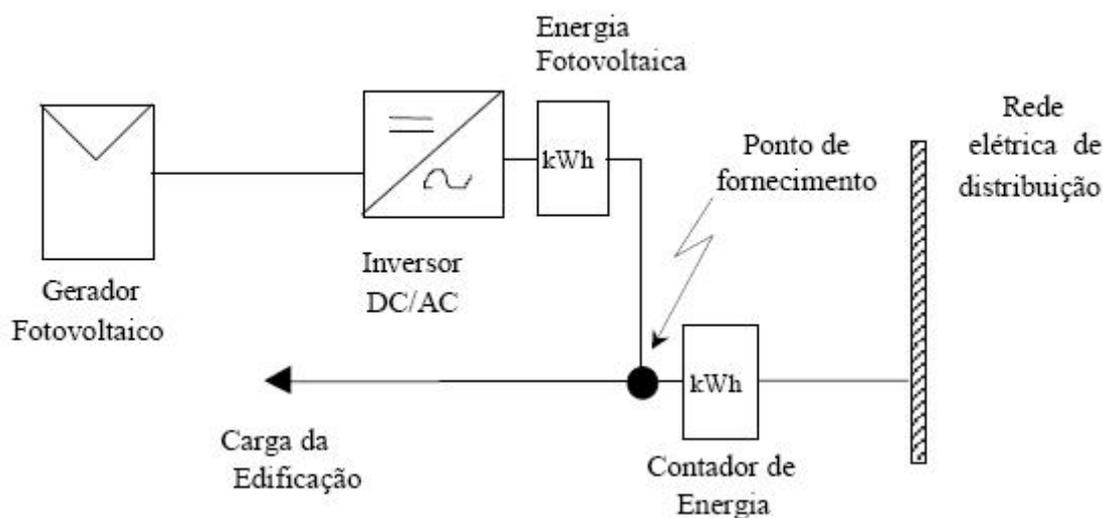


Figura 3.1 – Diagrama esquemático de um sistema fotovoltaico conectado à rede elétrica (Fonte: Zilles, 2008)

Para aumentar a eficiência do sistema como um todo, esta topologia pode ser feita baseada na cogeração. Sabemos que as células FV possuem baixa eficiência de conversão da radiação solar em energia elétrica e que quase toda energia que chega até os painéis são transformados em calor. Dessa forma podemos, com um melhor planejamento, aproveitar o que chamamos de subprodutos ou produtos indiretos ou produtos adjacentes desse sistema. O calor acumulado nos módulos pode ser usado para aquecer o ar (num sistema de aquecimento em locais frios), para criar correntes de ar e conseqüentemente implementar um sistema de ventilação natural (em locais quentes principalmente, como é o caso de grande parte do território brasileiro), para aquecer caldeiras de água (pode ser necessário um sistema de aquecimento auxiliar dependendo da temperatura que se queira alcançar). A retirada do calor excessivo dos módulos fotovoltaicos lhes assegura maior eficiência, já que esta pode ser afetada pelo aumento da temperatura.

3.2.4 Conectado à rede centralizado

Os sistemas centralizados têm como objetivo a produção de energia em grandes quantidades para atender não só uma residência ou um edifício comercial, mas um município inteiro. Linhas de transmissão e, portanto, perdas são inerentes ao projeto. A grande vantagem da geração de energia elétrica por meio de centrais fotovoltaicas é de fato o quase desprezível impacto ambiental provocado. O processo de fabricação dos módulos exige um dispêndio muito alto de energia, porém não geram resíduos, além disso, hoje o tempo de payback dessa energia (tempo que o painel gasta para produzir a mesma quantidade de energia que foi gasta para produzi-lo) foi drasticamente reduzido para valores entre 1 a 3,5 anos (EPIA, 2008), dependendo da tecnologia utilizada e do local de instalação dos painéis.

3.4 TECNOLOGIAS E MERCADO

Atualmente, no mercado de células solares, encontramos várias tecnologias disponíveis. As mais difundidas são: silício cristalino (c-Si), silício amorfo (a-Si), telureto de cádmio (CdTe) e o disseleneto de cobre (gálio) e índio (CIS e CIGS).

Dominando o mercado de módulos FV (~80% em 2002 [Maycock, 2003]), o c-Si é uma tecnologia que está dividida em duas categorias: monocristalino (m-Si) - mais caro e com um rendimento de conversão elétrica-solar em torno de 15% - e o policristalino (p-Si), também chamado de multicristalino - mais barato, mas com rendimento de conversão um pouco inferior ao m-Si. A tecnologia de silício (mono e multicristalino) foi responsável por quase 90% da produção somente em 2007 (IEI, 2009).

O silício amorfo hidrogenado (a-Si) é uma tecnologia também muito promissora para aplicações em edifícios fotovoltaicos por se tratar de filmes finos (tecnologia que utiliza menos materiais para construção do módulo, reduzindo custos de fabricação), a sua flexibilidade facilita a disposição em superfícies de formas variadas, logo tem uma aplicação arquitetônica privilegiada. Seu custo é inferior ao c-Si e sua desvantagem é seu baixo rendimento, de aproximadamente 7%.

Encontram-se disponíveis no mercado outras três tecnologias de filmes finos, CdTe, CIS e CIGS. Todos têm um custo de produção inferior ao a-Si e apresentam uma taxa de rendimento de conversão relativamente superior, além de apresentarem uma excelente estética para acabamentos em edifícios fotovoltaicos. O fator limitante está nos componentes químicos utilizados para sua fabricação, os quais não são abundantes e têm alto potencial toxicológico para o meio ambiente caso sejam inadequadamente descartados.

A figura 3.2, a seguir, mostra o crescimento acumulado de 1992 até 2008 dos dois tipos de configurações primárias dos sistemas FV (conectado à rede e isolado) nos países membros do Programa de Sistemas de Potência Fotovoltaicos da Agência Internacional de Energia IEA PVPS(1). Esses dados representam a significativa e crescente proporção da capacidade FV mundial, sendo que a pesquisa não abrange mercados de países que não tem dados oficiais sobre a situação dessa capacidade instalada ou não representam nem 1% do mercado.

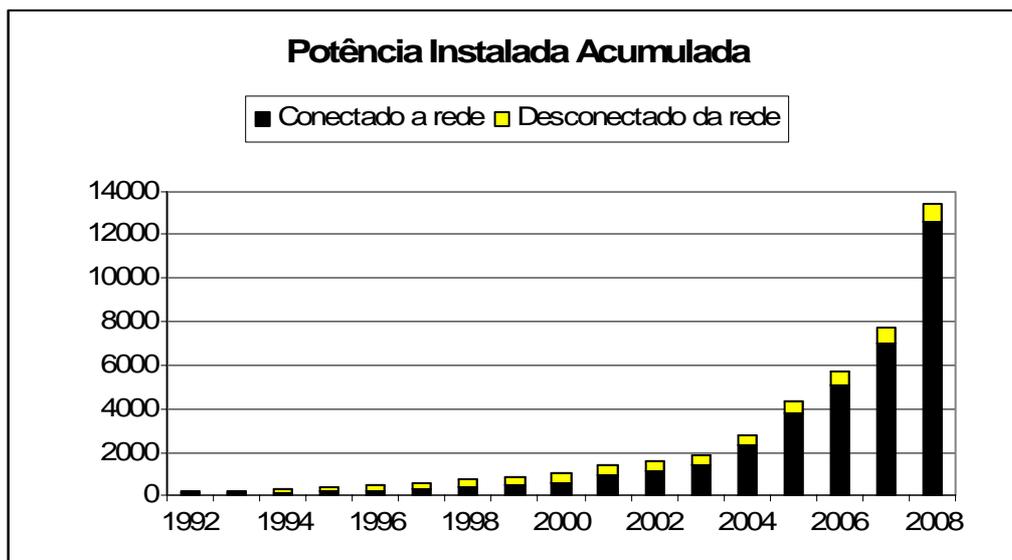


Figura 3.2 - Potência acumulada instalada de sistemas PV conectados à rede e isolados nos países membros do IEA PVPS (Fonte IEA, 2009).

A IEA, foi fundada em 1974, conta com a colaboração de 26 países e compreende um programa de cooperação energética entre seus membros. O Programa de Sistemas de Potência Fotovoltaicos da IEA (IEA PVPS, ou IEA Photovoltaic Power Systems Programm) é um tratado de colaboração para fomentar o desenvolvimento e a pesquisa na área e foi estabelecido em 1993. Sua missão é “aprimorar os esforços para a colaboração internacional, que acelera o desenvolvimento e a implementação da energia solar fotovoltaica como uma significativa e sustentável opção de energia renovável”.

A taxa de crescimento da potência acumulada instalada nos países do IEA PVPS subiu 6% de 2006 para 2007. Houve, portanto, um crescimento relevante de 40% em relação ao último ano. Alemanha, Espanha, Japão e USA representam sozinhos mais de 90% das instalações fotovoltaicas existentes. Através da curva exponencial representada na figura 3.2, podemos verificar a alta disseminação dos sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Da capacidade total instalada em 2007 nos países do IEA PVPS, apenas 5,5% (738 MW) correspondem aos sistemas isolados domésticos e não-doméstico.

Tabela 3.1 - Fundos públicos para P&D em 2007 em alguns países do IEA PVPS

País	Milhões de Dólares
AUSTRÁLIA	6,2
CANADÁ	5,1
REP. CHECA	11,3
ALEMANHA	61
DINAMARCA	4,6
FRANÇA	12,3
REINO UNIDO	15,2
ISRAEL	0,1
ITÁLIA	6,8
JAPÃO	38,9
COREA DO SUL	18,4
MÉXICO	0,27
NORUEGA	6,3
SUÉCIA	3,5
ESTADOS UNIDOS	138,3

Fonte: IEA, 2008.

Os mercados que mais cresceram foram aqueles que tiveram o maior incentivo de programas governamentais, reforçando a importância do papel que cada governo tem de fomentar o desenvolvimento de tecnologias e também o seu uso para geração de energia por meio de fontes alternativas, como é o caso da fotovoltaica. A tabela 3.1 mostra os fundos públicos destinados à pesquisa e desenvolvimento (P&D) em 2007 em países selecionados do IEA PVPS.

O uso desses fundos pode ser feito de várias formas nas diversas fases de implementação desses sistemas. Os fundos podem ser usados para subsidiar preços de produtos ligados ao sistema fotovoltaico (módulo, inversor, etc.), adicionar bônus às tarifas dos consumidores que utilizam tal sistema, estimular pesquisas nas universidades, conscientizar, educar e treinar a população, fornecer assistência técnica em projetos de médio e grande porte.

3.5 O SISTEMA FOTOVOLTAICO E A INDÚSTRIA

A indústria fotovoltaica envolve a produção de materiais que envolvem muitas etapas (fornecimento, lingotes, blocos e bolachas ou *wafers*), células FV, módulos e os componentes que fazem parte do chamado balanço do sistema ou BOS (controladores de carga, inversores, baterias, estruturas para instalação, etc.). Três processos da cadeia de suprimento representam quase que todo o custo do módulo FV pronto para ser comercializado - preparação e produção dos materiais FV, produção da célula FV e produção do módulo.

3.5.1 Materiais FV - fornecimento, lingotes e *wafers*

- Fornecimento

A matéria pura mais importante para a indústria fotovoltaica é o silício. A maioria das células FV fabricadas hoje no mundo são feitas desse material. A produção da grade solar fotovoltaica de silício é cara, pois o silício encontrado na natureza tem de ser purificado e esse processo tem um gasto energético elevado e dispendioso financeiramente. Processos de purificação mais simples e baratos estão sendo desenvolvidos e ainda estão em fase de teste no mercado. O processo de fabricação dessas grades é muito parecido com o processo de fabricação de semicondutores (ou chips). Em 2007 o mercado de abastecimento de materiais para fabricação das grades de silicone foi dominado por quatro grandes fornecedores: Wacker na Alemanha, REC Solar Grade Silicon e Hemlock Semiconductor Corporation nos USA e Tokuyama no Japão.

Devido à baixa competitividade e à atual demanda do setor, o preço das grades solar fotovoltaicas de silício aumentou em torno de 20 a 25% nos últimos anos. Mas em 2008 esse quadro começa a se reverter, pois várias novas companhias (10 delas somente na China) estão entrando no mercado de fornecimento de silício. Ainda assim é difícil dizer que o preço do silício puro irá cair drasticamente. Dessa forma, o preço total dos sistemas FV apresenta uma tendência de queda não tão acentuada, fortemente dependente dos avanços tecnológicos que por ventura acontecerão e da economia em escala que começa a se estabelecer.

- Lingotes e *Wafers*

Existem dois tipos de lingotes de silício: o mono cristalino e o poli ou multicristalino. O primeiro tipo também é produzido para aplicações na microeletrônica, respeitando-se algumas especificações quanto aos dopantes e a pureza.

O segundo tipo só é usado na indústria FV. Os lingotes são cortados em blocos e são posteriormente laminados para formar o que denominamos de *wafers* ou bolacha. Muitas fábricas produzem lingotes e *wafers*, outras já verticalmente integradas (com processo de fabricação mais avançado e integrado) são

produtoras do *wafers*, das células e dos módulos. Existe uma tendência forte de redução da espessura do *wafers* de silício (sem comprometer a eficiência de conversão), motivado pela alta do preço desse material e pelo próprio aprimoramento do processo de manufatura dos materiais. Com isso, uma parcela do custo de produção cai, levando a redução do preço final dos sistemas FV.

3.5.2 Módulos Fotovoltaicos

O módulo solar fotovoltaico é o componente básico do sistema gerador, composto pelas células solares. Dependendo da carga que será alimentada temos configurações diferentes de conexões desses painéis. Para obter o nível de tensão CC, que o inversor especifica, conectamos os painéis em série, conectados dessa forma temos as *strings*. Já para atender a especificação de corrente, conectamos essas *strings* em paralelo até fornecermos o nível de corrente desejado e a especificação correta de potência é alcançada.

Assim como os outros ramos da indústria FV, a produção de células e módulos fotovoltaicos cresceu muito e poderia ter crescido mais se não fosse pela escassez do abastecimento de silício no mundo. A China aparece como o maior produtor de células FV em 2007, no entanto a maior taxa de crescimento dessa produção aconteceu na Alemanha, terceiro colocado na classificação de maior produtor de células FV. Taiwan tomou o quarto lugar dos USA nesse mesmo período, como pode ser visto na figura 3.3.

Além de todo esse crescimento, observa-se um desenvolvimento e aprimoramento na tecnologia dos módulos fotovoltaicos a cada ano. A projeção é que painéis de silício cristalino terão uma eficiência de 17,5% para 2010 e entre 20% e 22% para o ano de 2020 (EPIA, 2008).

Dentre as principais companhias fabricanteiras de células e módulos estão Sharp, Kyocera, Sanyo Electric, Mitsubishi Electric (MELCO), Hitachi e Honda Motor. Além do forte crescimento da produção de células e módulos, a expansão da capacidade produtiva já é objetivo dessas e de outras grandes companhias. A tecnologia baseada em *wafers* de silício cristalino obteve 87% da parcela do mercado FV. É importante ressaltar o expressivo aumento da produção de filmes finos, tecnologia que não depende exclusivamente do fornecimento de silício.

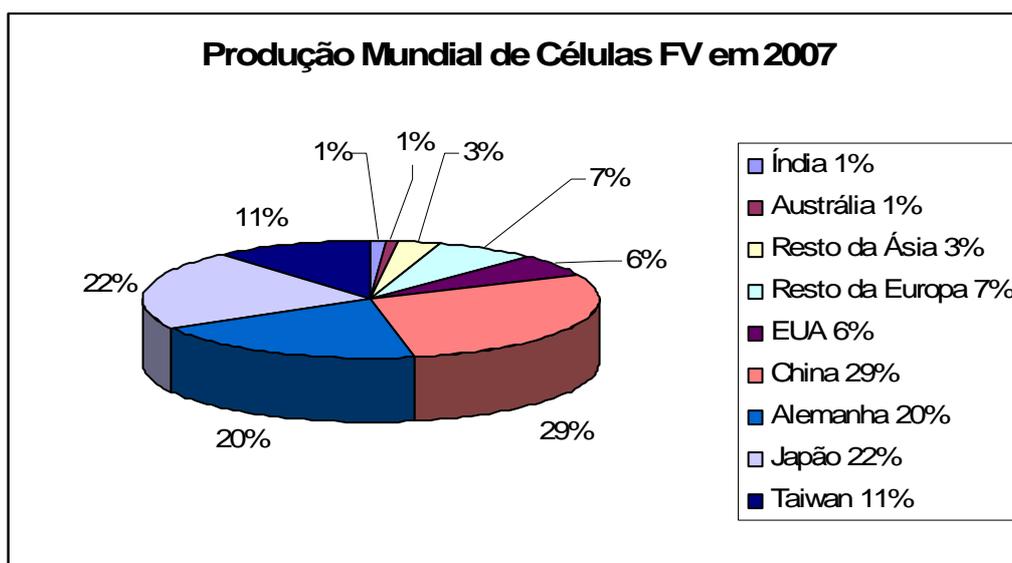


Figura 3.3 – Divisão da produção mundial de células fotovoltaicas por país em 2007 (Fonte: EPIA, 2008).

3.5.3 Balanço do Sistema – BOS (*Balance of System*)

O balanço do sistema, ou BOS, são todos os componentes necessários à instalação de um sistema FV que não os módulos fotovoltaicos. Estes componentes correspondem a 20% do custo total do sistema conectado à rede e aumenta para 70% quando tratamos de um sistema FV isolado. Essa diferença é esperada, pois sabemos que os sistemas FV isolados necessitam não só do inversor mas também de um banco de baterias e de um controlador de carga, que fará a comunicação entre os módulos, as baterias e à carga, orientando o recarregamento das baterias e se a energia elétrica será fornecida diretamente das células FV (quando há sol) ou através das baterias.

Assim como os grandes produtores de células e módulos fotovoltaicos, as fábricas de eletrônicos também estão localizadas em sua maioria na Europa, nos USA e no Japão. Com a explosão da indústria fotovoltaica e as promissoras oportunidades de negócio no mundo FV, as maiores companhias que fabricam inversores começaram a investir mais nessa área e desenvolver produtos cada vez mais eficientes e de alta qualidade. Produtores de equipamentos elétricos também estão investindo nesse mercado e aprimorando continuamente produtos básicos do BOS como disjuntores DC, conectores e sistemas de monitoramento.

O maior mercado de inversores é para aplicações domésticas. A potência típica desses inversores, que são conectados a uma ou duas fases da rede, varia de 1 kW a 5 kW. Para configurações maiores a instalação é trifásica e a potência normalmente encontrada é de 10 kW, 30 kW ou 100 kW. Inversores de 1 MW já estão disponíveis no mercado e seu desenvolvimento foi fomentado pelo crescimento das grandes centrais de geração fotovoltaicas que existem no mundo hoje.

Os componentes que monitoram o sistema também estão entrando com força no mercado. Estudos relatam um aumento de 40% na eficiência total do sistema FV quando um correto e preciso monitoramento é inserido neste.

Já a área de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D) está sendo direcionada para o estudo de possíveis flutuações ou distúrbios na rede elétrica a fim de evitar a redução da qualidade de energia, devido ao grande número de sistemas FV conectados à rede.

3.5.4 Preços dos sistemas FV

Nos últimos anos observou-se uma queda bastante significativa no preço dos sistemas fotovoltaicos. Mas recentemente os preços parecem ter estagnado, como podemos observar na figura 3.4. A tabela (3.2) mostra a faixa de preço típico dos módulos fotovoltaicos encontrados em alguns países do IEA PVPS. Uma nova queda significativa de preços só será observada com a efetiva disseminação do uso dos sistemas FV, fazendo com a produção em grande escala na indústria impulsionem para baixo esses números.

Tabela 3.2 - Preço dos módulos PV (dólar e reais por watt)

País	Dólar (US\$)	Reais (R\$)
AUSTRÁLIA	4,2 - 6,7	7,1 - 11,4
CANADÁ	3,5 - 7,5	5,9 - 12,7
REP. CHECA	4,3 - 4,4	7,3 - 7,5
ALEMANHA	2,9 - 6,3	4,9 - 10,7
DINAMARCA	5,9 - 9,8	10 - 16,7
FRANÇA	4,7	8
REINO UNIDO	4,7 - 5,8	8 - 9,9
ISRAEL	3,3 - 4,3	5,6 - 7,3
ITÁLIA	3,2 - 4,9	5,4 - 8,3
JAPÃO	4,3	7,3
COREA DO SUL	2,7 - 3,0	4,6 - 5,1
MÉXICO	4,7 - 7,0	8 - 11,9
PORTUGAL	3,7 - 4,4	6,3 - 7,5
SUÉCIA	3,9 - 9,2	6,6 - 15,6
ESTADOS UNIDOS	3,7	6,3

Fonte: IEA, 2008

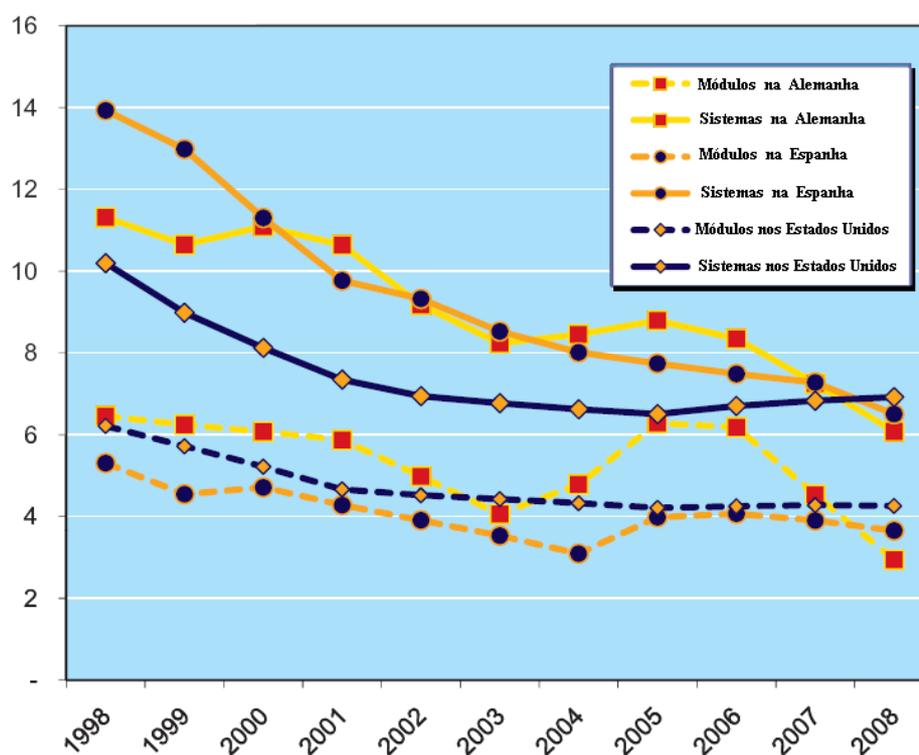


Figura 3.4 – Preço em US\$ dos sistemas FV na Alemanha, Espanha e Estados Unidos (Fonte IEA, 2008).

Da figura 3.4, pode-se observar que entre os anos de 2004 a 2006, ao contrário do que se previa, o preço dos sistemas fotovoltaicos sofreu leve aumento. Isso se deve a escassez do fornecimento de matéria-prima (silício principalmente) para a produção de células. Com a escassez do material os preços praticados no mercado, devido à alta demanda – o mercado fotovoltaico observou enormes taxas de crescimento nos últimos anos – subiram consideravelmente. Mas, com a entrada de outras empresas fornecedoras de matéria-prima, os preços de mercado para os sistemas FV voltaram a cair.

3.6 PROMOÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS DE INCENTIVO AOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

As fontes renováveis de energia são uma das saídas que se vislumbram como mais promissoras para substituir ou ser agregada a matriz energética e, conseqüentemente, ajudar na redução dos poluentes nocivos ao meio ambiente. Apesar disso, as fontes renováveis de energia, em geral, necessitam de um investimento financeiro muito alto. Existe uma necessidade de políticas públicas de incentivo a disseminação dessas fontes alternativas para que os investidores do setor privado sintam-se seguros.

Atualmente, essa é uma preocupação mundial que gerou várias ações e promoções nesse sentido de motivar a disseminação desta. Essas fontes renováveis são atraentes principalmente pelo seu apelo

ambiental, por ser uma fonte limpa. A redução da emissão de poluentes, um deles é o CO₂, é algo que o mundo almeja e muitos países têm metas a serem cumpridas.

No que diz respeito a estimular o mercado fotovoltaico a comunidade mundial obteve grandes avanços. Vários países, principalmente Estados Unidos, Japão e alguns pertencentes à Comunidade Européia, criaram políticas que incentivam a geração utilizando sistemas fotovoltaicos. Esses programas podem ser tanto em forma de subsídio na compra do sistema como uma tarifação diferenciada na compra da energia fotogerada.

3.6.1 O Dual Metering

Esse sistema de medição e tarifação da energia fotogerada nasceu nos EUA em 1978. Por meio do ato conhecido como PURPA (Public Utilities Regulatory Policy Act) e pelas regras dadas pelo FERC (Federal Energy Regulatory Commission) as companhias de eletricidade eram obrigadas a comprar a energia excedente que fosse produzida pelo SFCR se os custos destas fossem menores que os custos evitados pela companhia.

Esse sistema necessitava de dois medidores unidirecionais, um contabilizava a energia fotogerada e o outro a energia que vinha da concessionária. O *Dual Metering* teve um reflexo de custos adicionais as companhias, pois as mesma tinham custos extras de instalação de outro medidor, tarifação do mesmo além de ter que calcular a diferença e nos casos que o consumidor gerou mais do que produziu, remunerá-lo.

3.6.2 O Net Metering

Outro sistema muito popular nos EUA é o *Net Metering* devido a sua simplicidade de aplicação e contrato. Ele consiste de apenas um medidor bidirecional. Assim sendo, caso o sistema fotovoltaico conectado à rede (SFCR) esteja produzindo mais energia do que o usuário consome, o excedente será “armazenado” na rede elétrica da concessionária.

Geralmente o portador de um SFCR faz um contrato anual com a companhia elétrica. Este contrato é regido da seguinte forma: o sistema funciona durante o período de um ano sem nenhum tipo de tarifação; ao final do contrato verifica-se o medidor bidirecional, caso este esteja marcando um saldo positivo para a companhia elétrica, esta irá tarifar o consumidor utilizando a tarifação normal vigente. Mas se o consumidor obtiver ao final do contrato um saldo energético à seu favor, este em muitos estados será remunerado por meio do valor que a concessionária gastaria pra produzir aquela quantidade de energia. Em outros casos a concessionária faz com que aquele consumidor tenha créditos de energia para o próximo mês.

Esse sistema demonstrou ser de grande valia para os dois lados, consumidor e companhia. O consumidor recebe o direito de “armazenar” a sua produção caso não utilize. A companhia se

beneficia em alguns aspectos como o adiamento de investimentos em novas centrais de geração elétrica, em novos investimentos em T&D e obtêm uma melhora nos momentos de picos energéticos. Mas infelizmente existem algumas discussões sobre esse sistema, alguns autores acreditam que o fato de o usuário utilizar a rede elétrica da companhia para “armazenar” sua energia excedente para utilizá-la depois sem nenhum tipo de compensação financeira é uma política incorreta.

Os impactos do programa nos EUA não foram tão visíveis. Apesar de vários estados americanos terem adotado esse sistema muito cedo e não se disseminou como esperado. Alguns motivos podem ser porque a viabilidade econômica é muito pequena. A instalação de um SFCR é muito cara e se não existe nenhuma tipo de ajuda financeira por parte do Estado poucos consumidores são capazes de arcar com tais custos. Uma outra possibilidade da não popularização do sistema é a falta de interesse da concessionária em divulgar e fornecer informações pelo receio de redução na sua arrecadação. Além disso, a preocupação com a proteção da rede em casos de manutenção, pois por mais que a concessionária desligue seu sistema o gerador independente poderá estar energizando o local da manutenção.

Observa-se que o programa de Net Metering é uma alternativa viável para difundir a tecnologia fotovoltaica. O consumidor agrega a capacidade de ser menos dependente da concessionária e poder reduzir suas contas de energia e a concessionária se beneficia do fato de picos de energia menores e prorrogação de investimentos em T&D. Mas para o consumidor o grande problema é o investimento inicial alto, no qual pode ser contornado se o governo criar uma política de subsídios. O agravante para essa política seria uma grande disseminação desse tipo de sistema, acarretando uma diminuição da receita da concessionária. Assim esta repassaria as perdas para os outros consumidores, aumentando a tarifa e isso pode criar um efeito circular contínuo, o que é perigoso. Logo o governo precisa estudar muito bem as particularidades de cada estado para instituir regras e limites para a capacidade instalada que utilizariam esse tipo de sistema.

3.6.3 Programa *Buydown*

O programa *Buydown* basicamente é uma ferramenta de subsídio advinda do governo. Este cria um fundo monetário com a finalidade de subsidiar os custos, geralmente de uma parte do total, dos equipamentos do SFCR.

Algumas características desse programa são as seguintes (SCHWENT & STARRS, 1998):

- Período em que o programa estará disponível, podendo ser de um ano ou mais;
- A quantia monetária que será paga, podendo ser fixada uma parcela percentual do montante total a ser investido ou outras formas (e.g. pagamento por W instalado ou kWh a ser gerado);

- O subsídio será constante ou irá diminuir ao longo do tempo;
- A quem será efetuado o pagamento, aos varejistas e consumidores ou diretamente ao fabricante, essa decisão pode influenciar diretamente no mercado e seus preços;
- O critério para determinação quanto aos níveis de incentivos. Se o critério for o custo de aquisição inicial este pode variar conforme os custos considerados ou excluídos (e.g. componentes, instalação, impostos, etc.). Outro critério seria quanto ao tamanho do sistema e qual seria sua aplicação, assim o tamanho do incentivo poderia variar também de acordo com cada caso.

Um bom exemplo da aplicação desses programas é o estado da Califórnia que por meio do decreto AB 1890 de setembro de 1996 tinha como objetivo reestruturar o sistema elétrico daquele estado. Uma das partes desse decreto criava um fundo no valor de US\$ 540,00 milhões de dólares a serem aplicados no desenvolvimento de energias renováveis, sendo que 10% desse valor, US\$ 54,00 milhões de dólares seriam destinados diretamente ao consumidor em programas que utilizassem módulos fotovoltaicos, turbinas eólicas ou células a combustível, sendo que o combustível tem que ser renovável. Esse montante, US\$ 54 milhões de dólares, foi dividido em 5 blocos com o intuito de reduzir o subsídio aos poucos, com o intuito de criar um mercado forte e maduro. Na tabela (3.3) abaixo podemos observar essa divisão.

Tabela 3.3 – Parâmetros do programa *buydown* para tecnologias emergentes na Califórnia.

Bloco do Programa	1	2	3	4	5	Total
Fundo por bloco (milhões)	US\$ 10,5	US\$ 10,5	US\$ 10,5	US\$ 10,5	US\$ 12,0	US\$ 54,0
Máximo desconto por watt	US\$ 3,0	US\$ 2,5	US\$ 2,0	US\$ 1,5	US\$ 1,0	
Máximo desconto (% do custo do sistema)	50%	40%	30%	25%	20%	

Fonte: California Energy Commission (2001a)

O programa de *buydown* é uma ótima política de promoção da utilização de SFCR e para o incentivo do desenvolvimento da indústria e do mercado como um todo, além de que pelas características desse programa ele tem a capacidade de fazer com que esse crescimento seja muito rápido. Mas para que no futuro não ocorram problemas devido a essa explosão do mercado se faz necessário a adoção de regras para garantir a boa qualidade dos equipamentos e um ótimo desempenho do SFCR.

3.6.4 Tarifa Prêmio - *Feed-in Tariffs*

É o programa de incentivo às fontes renováveis de energia conectadas a rede mais popular na Europa. As *Feed-in tariffs* (FIT) são definidas pelos governos como o preço que as concessionárias de distribuição devem pagar por cada kWh produzido por tecnologias baseadas em fontes renováveis de energia que forem entregues a rede elétrica (ACKERMANN et al., 2001).

Em cada país existe uma tarifação diferente para o preço pago por cada kWh injetado na rede (*buy-back rate*). Essa taxa também pode mudar conforme o lugar que a fonte produtora é conectada, devido à sazonalidade e principalmente devido ao tipo da tecnologia da fonte geradora (e.g. fotovoltaica, eólica, célula combustível, etc.).

Geralmente, o valor estipulado para a compra da energia injetada à rede de origem renovável é superior ao que a concessionária encontraria no mercado atacadista de energia para comprar (IEA – PVPS, 2001). Assim por meio dessa condição o mercado de fontes renováveis de energia torna-se favorável ao investimento, logo a cadeia como um todo, desde a produção dos equipamentos que compõem o sistema FV até sua instalação e geração sofreram um crescimento apreciável.

Os melhores exemplos da que a utilização desse programa fornece resultados bem sucedidos são os programas Alemão e Espanhol de *feed-in tariff*. A seguir é apresentado um pouco de cada programa no intuito de formular uma base teórica para propor um programa brasileiro no capítulo 5.

3.6.4.1 O programa *feed-in tariff* Alemão

A base de toda a revolução alemã na área de energias renováveis é o Ato de Energia Renováveis Alemão. O presente Ato entrou em vigor em abril de 2000 e foi alterado em 2004. Este foi construído baseando-se na lei anterior de custeio a eletricidade (IEA PVPS Task 10). O programa de *feed-in tariff* alemão sofreu algumas adaptações ao longo do tempo, mas devido ao fato de todo programa estar garantido na lei os investidores sentiram segurança e cada vez mais novos projetos foram garantidos todo ano.

Uma nova lei foi aprovada no ano de 2008. A nova lei garantia um ajuste ao montante FIT que era destinado as tarifas, mas isso iria depender da resposta do mercado. Foram fixadas metas anuais de crescimento da instalação de novos sistemas FV e, caso o mercado não atingisse a meta, a taxa de desconto para a tarifa do *feed-in tariff* seria 1% menor. Mas se naquele ano a meta de crescimento fosse ultrapassada, a taxa de desconto para a tarifa do *feed-in tariff* seria 1% superior. A tabela 3.4 apresenta as taxas garantidas do *feed-in tariff* para os anos de 2004, 2007 e 2009.

Deve-se ressaltar que através desse complexo e arrojado sistema de *feed-in tariffs* que a Alemanha mostra-se como o maior país na área de incentivos e desenvolvimento da tecnologia fotovoltaica.

Assim sendo um grande exemplo para um futuro programa brasileiro. Outro programa bem sucedido é o Espanhol que será apresentado a seguir.

Tabela 3.4 – Visão global do *Feed-in Tariff* Alemão em 2004, 2007 e 2009 em R\$/kWh.

Capacidade	Ato de 2009	Ato de 2007	Ato de 2004
Instalações montadas em telhados			
Até 30 kW	1,10	1,08	1,13
30 kW até 100 kW	1,04	1,03	1,07
Acima de 100 kW	1,01	1,02	1,06
Acima de 1000 kW	0,84	0,88	1,06
Eletricidade produzida que é utilizada no prédio/instalação			
Até 30 kW	0,64	-	-
Instalações ao ar livre (cobertura de estacionamentos)			
Todas	0,81	0,8162	0,85
Bônus para instalações em fachadas			
Todas	-	0,13	0,13
Redução para instalações ao ar livre			
	Taxa básica: 10%	Taxa básica:	Taxa básica: 5%
	2010: 10%	A partir de 2009: 7%	
	A partir de 2011: 9%	A partir de 2011: 8%	
Redução para sistemas em telhado			
	Taxa básica e bônus:	Taxa básica:	Taxa básica: 5%
	Até 100 kW	A partir de 2009: 7%	
	2010: 8%	A partir de 2011: 8%	
	A partir de 2011: 9%		
	Acima de 100 kW		
	2010: 10%		
	A partir de 2011: 9%		

Fonte: BMU, 2009.

3.6.4.2 O programa *feed-in tariff* Espanhol

O programa espanhol de Feed-in tariffs também é muito completo e respeitado, principalmente porque obteve e continua atingindo resultados satisfatórios. A seguir está descrito as três últimas regulamentações referentes a sistemas fotovoltaicos que foram aprovadas na Espanha, conhecidos como Decretos Reais.

Decreto Real 436/2004 (DR 436/2004)

O programa espanhol de feed-in tariff foi construído a partir do Decreto Real 2818/1998. Os sistemas FV tinham a opção de entregar a energia do sistema fotovoltaico por um preço ligado a “média da tarifa de energia” ou participar no mercado regular de energia por meio de uma taxa que varia mensalmente. Todavia a Lei do Decreto Real 7/2006 de 23 de junho de 2006 separou o feed-in tariff da média da tarifa de energia. As taxas foram garantidas enquanto o sistema estivesse funcionando. A tabela 3.5 mostra as taxas garantidas para 2006 nas quais foram fixadas nos termos do DC 436/2004.

Tabela 3.5 – Feed-in tariffs Espanhol em 2006.

Remuneração Espanhola aos sistemas FV (R\$/kWh)			
Menor que 100 kW		Maior que 100 kW	
Entre 1 e 25 anos	1,12 (5,75 x MTE(1))	Entre 1 e 25 anos	0,59 (3 x MTE(1))
A partir de 26 anos	0,90 (4,6 x MTE(1))	A partir de 26 anos	0,47 (2,4 x MTE(1))

Fonte: ASIF, 2006.

Nota: MTE = “Média da tarifa de eletricidade” estimada no começo do ano considerando o custo de geração de 1 kWh.

Decreto Real 661/2007 (DR 661/2007)

Após o Decreto Real de 2006 o governo Espanhol viu a necessidade de melhorar seu programa pois o objetivo de disseminar a tecnologia FV estava sendo obtido mas os investidores optaram por instalações de grandes centrais produtoras. O governo queria incentivar mais a produção em centrais distribuídas, telhados de casa e edificações. Assim o Decreto Real 661/2007 foi construído embasado no DR 436/2004 e entrou em vigor em 1 de junho de 2007.

As tarifas são anualmente revisadas e eram reduzidas pela seguinte forma:

- Índice de Preços ao Consumidor menos 0,25% até 2012
- Índice de Preços ao Consumidor menos 0,50% depois de 2012

Tabela 3.6 – Feed-in tariffs Espanhol em 2007 de acordo com DR 661/2007

Remuneração Espanhola aos SFCR (R\$/kWh)					
Menor que 100 kW		Entre 100 kW e 10 MW		Entre 10 MW e 50 MW	
Entre 1 e 25 anos	1,13	Entre 1 e 25 anos	1,06	Entre 1 e 25 anos	0,59
A partir de 26 anos	0,90	A partir de 26 anos	0,85	A partir de 26 anos	0,47

Fonte: ASIF, 2007.

As tarifas foram garantidas até que fossem instalados 371 MW conectados a rede elétrica até 2010. Esse novo decreto foi tão bem sucedido que a meta foi alcançada em agosto de 2007. A tabela (3.6) mostra o novo regime de tarifas a partir do ano de 2007.

Devido ao grande sucesso do decreto anterior o governo Espanhol fixou uma data limite para novos projetos utilizando o programa de 2007. Após essa data, 30 de setembro de 2008, a instalação de novos sistemas FV iria estar regida pelo novo Decreto Real que fosse elaborado e sancionado. Assim surgiu o Decreto Real 1575/2008 (DR 1575/2008). O novo programa de feed-in tariff considera dois pontos:

A meta de capacidade anual de instalação é fixada. As novas plantas são concedidas até que a capacidade anual seja alcançada. Todo ano essa capacidade anual é atualizada por meio de um algoritmo.

As tarifas são calculadas de acordo com a capacidade instalada referente ao ano anterior. A tabela (3.7) mostra a taxa garantida para 2009.

Tabela 3.7 - *Feed-in tariffs* Espanhol em 2009 de acordo com DR 1575/2008. Valores em R\$/kWh.

Tipo de instalação	Tarifa	Limite da capacidade no primeiro ano
Instalações em telhados ou fachadas e em estruturas de estacionamento		
Menor que 20 kW	0,87	267 MW
Maior que 20 kW	0,82	
Outras instalações	0,82	133 MW

3.7 SISTEMAS FOTOVOLTAICOS NO BRASIL

Para garantir o atendimento à crescente demanda por energia e, ao mesmo tempo, buscar soluções econômicas, de segurança de suprimento, saúde pública, acesso universal e sustentabilidade, o investimento no setor energético e a inserção de novas tecnologias na matriz tornam-se fundamentais. Devido às crescentes pressões ambientais com relação a exploração do potencial hídrico na Amazônia e com centrais geradoras cada vez mais afastadas dos centros de carga, o país encara novos desafios neste começo do século XXI. Uma das grandes apostas mundiais para resolver problemas similares é o uso de sistemas fotovoltaicos conectados à rede. Aposta essa, que também poderia ser considerada dentro do planejamento e expansão do setor elétrico brasileiro.

No Brasil, a promoção do uso de energia solar fotovoltaica é irrisória. Os poucos programas criados para incentivar o uso dos sistemas FV não foram capazes de disseminar sua utilização e consolidar. Assim, um mercado para alavancar centros de tecnologia de ponte, geração de milhares de empregos de alta qualidade e desenvolver uma indústria nacional de equipamentos e serviços. A falta de políticas públicas que viabilize tudo isso é a principal barreira apontada por especialistas.

A potência acumulada instalada de sistemas fotovoltaicos no Brasil é de aproximadamente 20 MW (IEI, 2009). Esse dado equivalente apenas aos sistemas fotovoltaicos isolados (também chamados de autônomos), pois os SFCR no país não possuem fins comerciais, apenas experimental. O total aproximado desses sistemas experimentais é de 153 kW.

O maior programa de incentivo criado pelo governo brasileiro até hoje, para incentivar o uso da energia solar fotovoltaica foi o PRODEEM (Programa de Desenvolvimento Energético de Estados e Municípios). Porém, todo o suporte dado foi em direção aos sistemas autônomos. Toda implementação de SFCR foram ações isoladas, experimentais e individuais.

No final de 2008, criou-se, no âmbito do Ministério de Minas e Energia (MME), o Grupo de Trabalho de Geração Distribuída com Sistemas Fotovoltaicos (GT-GDSF). Sua finalidade é elaborar uma proposta de política para dar suporte à difusão da tecnologia fotovoltaica no país.

Apesar de alguns esforços recentes, no horizonte do Plano Nacional de Energia 2030 (EPE, 2007) , o uso da energia solar fotovoltaica não foi contemplada como uma alternativa de geração de energia e suporte ao SIN, na contramão do que se observa no resto do mundo. Mesmo com a isenção de impostos como o ICMS sobre alguns equipamentos para aplicação desses sistemas, não houve efeito algum sobre a disseminação do seu uso por consumidores nacionais.

O preço dos SCFRs no Brasil é de seis a sete vezes maior do que o custo marginal de expansão do setor elétrico brasileiro (R\$ 125,40/MWh) e a eletricidade gerada é de três a quatro vezes mais cara que a tarifa média de eletricidade paga pelos consumidores (IEI, 2007). Mas, a experiência internacional mostra que, apesar dos custos díspares, políticas públicas, como a implementada na Alemanha, são capazes de ultrapassar essas barreiras e, acima de tudo, ajudar na redução das emissões de gases de efeito estufa, fornecendo grande benefício ambiental não só para o próprio país mas também para o mundo.

Neste capítulo foi apresentado o sistema fotovoltaico, definições, aplicações, tecnologias, mercado e políticas promocionais. O capítulo seguinte fará uma abordagem completa sobre outro tipo de geração, aquela na qual se utiliza de termelétricas. Essa abordagem será importante para efeitos de comparação e análise nos capítulos subseqüentes.

4 TERMELÉTRICAS A CARVÃO MINERAL

As usinas termelétricas (UTE) são apontadas pelo PNE – 2030 como uma solução para a diversificação da matriz de geração elétrica brasileira. No entanto, com as alarmantes projeções relacionadas aos impactos ambientais e conseqüentemente às alterações climáticas, o mundo empenha-se cada vez mais para inserir fontes alternativas renováveis para compor e expandir o parque de geração de eletricidade atual.

No entanto, as UTEs a carvão mineral, combustível com maior índice de poluição, são muito criticadas por causarem uma série de agravantes ambientais, não só durante a fase de operação da usina, mas desde a extração do carvão da natureza. Apesar do avanço realizado em P&D, com o objetivo de equipar as térmicas geradoras com tecnologias limpa (emissões próximas de zero), esta realidade ainda é muito cara (mais até do que a utilização de fontes de geração como a fotovoltaica, por exemplo) e sua inserção no mercado está prevista apenas para depois de 2020 (WCI, 2009).

Nas seções a seguir são apresentadas informações relevantes que tratam de aspectos ligados à cadeia produtiva do carvão no Brasil e no mundo, bem como características do parque térmico brasileiro. No decorrer do capítulo serão fornecidos dados e custos importantes relacionados aos impactos provenientes das usinas a carvão, fundamentais para posterior análise e comparação com os benefícios provenientes dos sistemas fotovoltaicos.

4.1 RECURSOS E RESERVAS DE CARVÃO MINERAL

O carvão mineral é composto por uma mistura de hidrocarbonetos, principalmente, e matéria inorgânica (óxidos de silício, enxofre, alumínio, ferro, cálcio, sódio, potássio e magnésio). Sua formação leva milhões de anos e se dá a partir da decomposição de matéria orgânica. O contato com os minerais nas camadas de solo e as condições de temperatura e pressão durante a sua formação definem a composição do carvão. Por isso, não apresenta composição uniforme e é encontrado nas diferentes jazidas pelo mundo com características do solo daquela região.

Existem vários tipos de carvão e de reservas e usos desse combustível fóssil. Segundo o World Coal Institute (WCI) - ou Instituto Mundial de Carvão - o carvão é classificado de acordo com seu grau de pureza, como: linhito, sub-betuminoso, betuminoso e antracito. 53% das reservas mundiais são de carvão de alta qualidade (52% de betuminoso e 1% antracito, que possui o mais alto teor de carbono), enquanto 47% são de carvão de baixa qualidade (30% sub-betuminoso e 17% linhito, que possui o mais alto teor de umidade). As reservas medidas brasileiras totalizam 6,7 bilhões de toneladas, de acordo com o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 2005). Linhito e carvão sub-betuminoso podem ser encontrados em vários estados brasileiros. As maiores reservas, no entanto,

estão localizadas nos estados do Rio Grande do Sul, de Santa Catarina e Paraná, com 89,25%, 10,41% e 0,32% respectivamente do total.

Geograficamente bem distribuído em regiões politicamente estáveis, disponível em abundância, mais acessível do que outros combustíveis fósseis e de fácil transporte, o carvão é a principal fonte de geração de energia elétrica do mundo, responsável por gerar 41% de toda essa energia (IEA, 2008). Em países como Austrália, África do Sul, Polônia, USA e Alemanha essa dependência é ainda maior. Além disso, 26,5% da demanda global por energia primária é suprida por carvão. Sua demanda irá aumentar mais rápido do qualquer outra fonte energética nos próximos anos e dentro do cenário BAU, aproximadamente 50% de toda a energia gerada no mundo, até 2050, terá como combustível o carvão (IEA, 2008).

Números como esses chamam ainda mais atenção quando tratamos dos problemas ambientais que o uso do carvão traz para toda a população mundial. Tais problemas antes tratados regionalmente, agora, devido às reais e alarmantes prospecções feitas pela comunidade científica, também se globalizaram. Países desenvolvidos já investem maciçamente em tecnologias capazes de mitigar os inúmeros problemas causados por toda a cadeia produtiva do carvão e seu uso como combustível. Mas, algumas previsões mostram que muitas das tecnologias “limpas” só estarão disponíveis comercialmente a partir de 2015.

Sem outras opções de fontes energéticas menos poluentes ou devido às enormes reservas naturais desse mineral, muitos países continuarão utilizando-o cada vez mais para acompanhar o rápido crescimento de sua economia e conseqüente aumento no consumo de carvão. China e Índia são exemplos desse retrato. O consumo de carvão na Ásia em 2008 correspondeu a 61,5% do total no mundo e cresceu quase 6% em apenas um ano (BP, 2008). Mesmo assim, o número de ações e medidas para mitigar os efeitos das crescentes emissões de CO₂e, de longe acompanham esse mesmo ritmo. Com isso, as emissões de GEE que deviam apresentar uma taxa de decréscimo, aumentam ano após ano. A preocupação com as conseqüências desses elevados índices de emissão ainda não faz parte da realidade dos países em desenvolvimento.

No Brasil, tal tendência não se justifica. Além de possuir reservas de carvão de baixa qualidade, o potencial energético a partir de fontes renováveis como hidráulica, solar, eólica e biomassa, é enorme. Mesmo assim incentivos à construção de usinas termelétricas, movidas a combustíveis fósseis, são vistos frequentemente no país. Em 2000, foi promulgado o Programa Prioritário de Termelétricidade - PPT, com o objetivo de criar incentivos ao setor privado para construir 49 usinas, dentre elas algumas abastecidas a carvão. Vimos também que com os investimentos do PAC, este setor ainda é altamente beneficiado. Atos como esse mostram que o interesse de poucos ainda predomina sobre as melhores soluções de energia que nosso país poderia adotar, como por exemplo aproveitar melhor as ótimas condições de vento, sol e biomassa disponíveis em abundância.

4.2 TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO

O carvão é responsável por cerca de 25% das emissões globais dos gases de efeito estufa (GEE) (WCI 2009). Uma pesquisa da International Energy Agency (IEA) destacou que essas emissões poderiam ser diminuídas em 5,5% se termelétricas a carvão com tecnologia mais velha fossem substituídas por outras com maior eficiência. Melhorias na performance e no custo de tecnologia de baixa emissão de GEE são imprescindíveis. Métodos de captura e estocagem de carbono (*Carbon Capture and Storage - CCS*) serão fundamentais para que as térmicas a carvão alcancem níveis tão baixo de emissão quanto ao das fontes renováveis de energia, ou seja, muito próximos ao nível zero de emissão. Mas alguns desses métodos de CCS não atingiram maturidade tecnológica e ou serão inviáveis economicamente por mais algumas décadas. Preços de termelétricas sem e com CCS podem variar até 90%.

A alta no preço do gás e do petróleo, a oferta de tecnologias de queima limpa e a incerteza do real aproveitamento das reservas hídricas para a geração de eletricidade tornam cada vez maiores a possibilidade de expansão do parque termelétrico a carvão no Brasil (PNE 2030, 2006). Contudo, a quantidade de impactos ambientais provocados pelo uso do carvão e de tecnologias de queima limpa e de CCS que ainda estão em fase de pesquisa e desenvolvimento e ou demonstração e apresentam alto custo, levantam questionamentos com relação à sustentabilidade global do plano de expansão do setor elétrico.

Vale ressaltar que para ser considerada uma tecnologia de queima limpa ou *clean coal technology*, métodos complementares de controle de emissões de NO_x, de dessulfurização de gases (FGD) e de remoção de materiais particulados devem estar presente na planta de geração. Nos sistemas de FGD a amônia ou o calcário podem ser usados como absorventes. O uso de dessulfurizadores representa um custo adicional de investimento entre 30 e 400 US\$/kW instalado para instalação e um custo adicional de operação de 7 a 45 US\$/kW.

Hoje, no mundo, as principais tecnologias usadas nas plantas termelétricas são (CARVALHO, 2005):

- Carvão Pulverizado (PF);
- Usinas supercríticas e ultrasupercríticas;
- Combustão em Leito Fluidizado à pressão atmosférica (AFBC);
- Combustão em Leito Fluidizado com pressurização (PFBC); e
- Gaseificação Integrada com Ciclo Combinado (IGCC).

Na tabela 4.1 constam informações de algumas dessas tecnologias de geração termelétrica e seu atual estágio de desenvolvimento.

Tabela 4.1 – Tecnologias de geração termelétrica a carvão mineral

Tecnologia		Situação	Eficiência na conversão	Investimento (US\$/kW)(1)
Combustão pulverizada		C	38-46%	1.300-1.500
Combustão em Leito Fluidizado	Pressão atmosférica	C/D	34-37%	1.450-1.700
	Circulação	C/D	37-39%	1.459-1.700
	Pressurização(2)	D	42-45%	1.450-1.700
Gaseificação Integrada	Com ciclo combinado	D	45-48%	1.450-1.700
	Com célula combustível	P&D	40-50%	1.700-1.900
Combustão direta	Turbina	P&D	35-45%	1.200
	Diesel	P&D	35-40%	500-1.000

Fonte: IEA, 1997.

Situação: C=Comercial; D=demonstração; P&D=pesquisa e desenvolvimento;

(1)=valores internacionais; (2)=vapores sub e supercríticos;

Em países como Alemanha, onde a preocupação com o meio ambiente e com a segurança energética é realmente levada a sério, as tecnologias mais avançadas usadas em termelétricas já são uma realidade. Mas, como o Brasil utiliza carvão nacional para gerar eletricidade em mais de 90% de suas usinas e seus investimentos em P&D nessa área são mínimos, as tecnologias de combustão pulverizada e leito fluidizado são aquelas possíveis de serem empregadas nas futuras termelétricas a carvão (PNE 2030, 2006).

4.3 CARACTERIZAÇÃO TÉCNICO-ECONÔMICA DO PARQUE TÉRMICO BRASILEIRO

A potência instalada de usinas termelétricas no Brasil representa 22% da capacidade total instalada (ONS). Mas devido ao regime intenso de chuvas observado nos últimos anos, as hidrelétricas sozinhas geraram pouco mais de 85% de toda a eletricidade consumida em 2007. Nesse mesmo ano, as centrais termelétricas a carvão em operação no Brasil, localizadas próximas às minas de carvão, produziram apenas 7,9 TWh, dos 435,68 TWh que foram gerados (ANEEL, 2008). Essa situação ociosa evidencia mais ainda a relevância em investimentos a serem aplicados em outras fontes de geração de energia elétrica. Mesmo assim, em 2008, o governo destinou R\$ 58 milhões do PAC para investir em térmicas a carvão.

Em território brasileiro existem 5 UTEs a carvão em operação, 2 previstas para entrar em operação já em 2010 e 5 projetos outorgados.

A tabela 4.2 mostra a composição da matriz de geração de eletricidade a carvão no Brasil. De acordo com o Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica (PDEE 2006/2015 - MME/EPE, 2006), mais dois empreendimentos encontram-se em construção com previsão para entrar em operação até 2010: Jacuí e Candiota III, adicionando 700 MW ao parque de geração brasileiro tabela 4.3.

Tabela 4.2 – Usinas termelétricas a carvão em operação no Brasil e suas características

Usina	Destino da Energia	Município	Potência (MW)
Charqueadas	PIE	Charqueadas – RS	72
Figueira	SP	Figueira – PR	160,25
Jorge Lacerda I, II, III e IV	PIE	Capivari Baixo – SC	857
Presidente Médici A, B e C	SP	Candiota – RS	796
São Jerônimo	SP	São Jerônimo – RS	20
Total			1.905,25

Fonte: Aneel, 2008

Tabela 4.3 – Usinas termelétricas a carvão com previsão para entrar em operação em 2010 no Brasil.

Usina	Município	Potência (MW)
Jacuí	Charqueadas - RS	350
Candiota III	Candiota - RS	350
Total		700

Fonte: MME/EPE, 2006.

Existem ainda outros 5 projetos que irão somar 3.148 MW ao parque de geração térmica a carvão brasileiro. Esses projetos já foram outorgados e encontram-se em fase de estudos de viabilização técnico-econômica e socioambiental. Com exceção do projeto de Sepetiba, no Rio de Janeiro, todos os outros 4 projetos, que podem ser vistos na tabela 4.4, preveem a utilização de carvão nacional como combustível.

Tabela 4.4 – Termelétricas outorgadas no Brasil.

Usina	Município	Potência (MW)
Seival	Candiota – RS	562
CTSul	Cachoeira do Sul - RS	650
Figueira II	Figueira – PR	126
Usitesc	Treviso – SC	440
Sepetiba	Itaguai – RJ	1.370
Total		3.148

Fonte: MME/EPE, 2006

As UTEs Presidente Médici (Candiota), Jorge Lacerda e Charqueadas utilizam a tecnologia de carvão pulverizado. Essa tecnologia permite o uso do carvão nacional como combustível, pois ela pode ser usada na queima de carvão de baixa qualidade. Considera-se que, no horizonte do PNE 2030, avaliando o atual estágio de desenvolvimento das tecnologias acima citadas, as tecnologias de combustão pulverizada (PF) e leito fluidizado são as com maior probabilidade de serem implementadas nas futuras termelétricas que não irão utilizar carvão importado.

Como já vimos, o carvão brasileiro é classificado como pobre por apresentar poder calorífico (PC) menor que 4.500 kcal/kg (em geral, o carvão de boa qualidade é aquele que apresenta um PC igual ou maior que 5.500 kcal/kg), elevado teor de cinzas e enxofre, como mostra a tabela 4.6. Por esta razão, a usina de Candiota gasta quase o dobro da quantidade de carvão para produzir a mesma quantidade de

energia elétrica que uma usina nos EUA, que por lei deve utilizar carvão com PC de no mínimo 6.200 kcal/kg. Além disso, o carvão de Candiota possui propriedades higroscópicas, tornando o processo de beneficiamento do mesmo antieconômico. Isso significa que boa parte da energia liberada pela queima do combustível será utilizada para fazer a água absorvida durante esse processo evaporar. Já o uso do carvão das reservas de Santa Catarina e Paraná dá origem a rejeitos com alta concentração de enxofre e necessitam de tratamento ao serem descartados. Todos esses aspectos encarecem significativamente os custos de operação.

Podemos classificar os custos para as usinas termelétricas em dois tipos: custos de investimento e custos de geração. Os custos de investimentos referem-se ao terreno, aos equipamentos e sua montagem, a construção civil da planta (incluindo canteiro de obra e acampamento), a subestação e a administração. Os custos de geração representam os custos de quando a usina já está em operação, como combustível, outros produtos consumidos no processo de geração ou no processo de mitigação dos impactos, mão-de-obra, manutenção e serviços diversos.

Considerando dados da ANEEL como referência, a tabela 4.5 mostra valores para o custo de investimento em US\$/kWh para plantas termelétricas a carvão de acordo com diferentes tecnologias.

Tabela 4.5 – Custo de tecnologias utilizadas em termelétricas

Tecnologia	Custo (US\$/kW)
Combustão Pulverizada	1.300 - 1.500
Leito Fluidizado 1	1.450 - 1.700
Leito Fluidizado 2	1.450 - 1.700
Leito Fluidizado 3	1.450 - 1.700
Gaseificação Integrada	1.450 - 1.700

Fonte: ANEEL 2005

Nota: 1 Pressão atmosférica; 2 Circulação (vapores sub e supercríticos) e 3 Pressurização (vapores sub e supercríticos).

Esses custos não são fixos, como podemos notar, e seu intervalo de variação também pode mudar de ano para ano. Essa dependência está atrelada à demanda por usinas térmicas e ao preço do aço principalmente. Outro fator que afeta o preço é a capacidade da usina, pois sabemos que devido aos ganhos em escala, quanto maior o tamanho da usina preços menores podem ser considerados para uma mesma tecnologia. No entanto, a escolha da tecnologia depende do grau de eficiência que se quer e dos fatores ambientais que serão considerados e exigidos.

Em se tratando dos custos de geração, o custo predominante é o custo do combustível, cujo conteúdo energético (PC) e o conteúdo de enxofre são determinantes. Considerando as propriedades únicas de cada carvão encontrado em diferentes regiões (qualidade), a forma como ele é lavrado (mina a céu aberto ou subterrânea), a necessidade de beneficiamento, o destino (meio de transporte e distância) e a quantidade contratada, os custos são bastante díspares.

A seguir, na tabela 4.6, algumas características do carvão nacional podem ser encontradas. Devido ao elevado conteúdo de impurezas presente no carvão lavrado no Brasil, torna-se inviável economicamente seu transporte por distâncias relativamente longas. Por esse motivo todas as plantas termelétricas, cujo carvão não é importado, estão localizadas na “boca da mina”.

Tabela 4.6 – Características do carvão brasileiro.

Estado	Jazida	Poder Calorífico (kcal/kg)	Carbono (%)	Cinzas (%)	Enxofre (%)
Paraná	Cambuí	4.850	30	45	6
	Sapopema	4.900	305	435	78
Santa Catarina	Barro Branco	2.700	214	621	43
	Bonito	2.800	265	583	47
Rio Grande do Sul	Candiota	3.200	23,3	52,5	16
	Santa Terezinha	3.800 - 4.300	28 – 30	41 - 49	0,5 - 1,9
	Morungava / Chico Lomã	3.700 - 4.500	27,5 - 30,5	40 - 49	0,6 - 2
	Charqueadas	2.950	24,3	54	13
	Leão	2.950	24,1	55,6	13
	Iruí	3.200	23,1	52	25
	Capané	3.100	29,5	52	8

Fonte: DNPM, 2000

Diversos fatores contribuem para o estabelecimento do preço do carvão que chega até as térmicas. Dentre eles estão: mineração a céu aberto ou subterrânea, qualidade e conseqüente necessidade de beneficiamento, de que forma o carvão é transportado, distância e quantidade contratada. Na tabela 4.7 podemos ver a origem do carvão empregado em cada termelétrica brasileira e seus respectivos preços.

Tabela 4.7 – Origem do carvão usado nas usinas em operação no Brasil.

Usina	Contrato (t/mês)	Fornecedor	Mina	Preços maio/2005 (R\$/t)	Mês de reajuste
Presidente Médici	133.333	CRM	Candiota	40,63	Abril
São Jerônimo	6.500	CRM	Leão I	100,06	Maio
Jorge Lacerda	200.000	CCCE	STECESC	138,68	Setembro
Charqueadas	28.886	COPELMI	Recreio	68,69	Maio
Figueira	6.500	CAMBUÍ	CambuÍ	208,49	Janeiro

Fonte: CARVALHO, 2005.

CRM: Companhia Rio Grandense de Mineração

CCCE: Consórcio Catarinense de Carvão Energético

COPELMI: Companhia de Pesquisa e Lavras Minerais

CAMBUÍ: Companhia Carbonífera do Cambuí

O complexo Jorge Lacerda é abastecido pelo carvão proveniente de Santa Catarina. Este é minerado em subsolo e apresenta alto teor de cinzas, necessitando de beneficiamento. Esse processo resulta no aproveitamento de apenas 35-40% de todo o minério extraído. O carvão, cuja origem é do Rio Grande do Sul, é minerado a céu aberto (menor custo de extração). A usina Presidente Médici é abastecida por esse carvão. Charqueadas, apesar de receber carvão também desse estado, está localizada a distâncias maiores da mina, por isso seu preço é um pouco mais alto. O carvão recebido por Figueira apresenta o mais elevado preço por quatro fatores: economia de escala, profundidade da exploração, características da camada de carvão e grau de beneficiamento requerido.

Preços internacionais são fornecidos em publicações da *Coal Trader International* e *International Coal Report* e são disponibilizados em US\$/tonelada FOB no porto de origem. Porém, Europa ARA (portos de Amsterdam, Rotterdam e Antuérpia), Japão e Coréia consideram preços CIF, cujo frete do transporte até o destino final e outras taxas relacionadas, como seguro, já estão incluídos no preço de venda.

No cenário internacional foi observado, entre 1990 e 2002, um constante declínio no preço do carvão. Mas a partir de 2003 essa trajetória se inverteu e entre outubro de 2005 e março de 2006 o preço do carvão *spot*, para entrega imediata, subiu 30%.

Os custos de operação e manutenção também apresentam grande variabilidade, pois dependem da tecnologia da planta, do fator de carga da mesma e da heterogeneidade do combustível. Segundo o Plano Nacional de Energia 2030 (2006), tais custos devem ser classificados em fixos e variáveis. A tabela 4.8, portanto, nos fornece uma média desses custos.

Tabela 4.8 – Média dos custos fixos e variáveis de operação e manutenção

Tecnologia	Media dos custos variáveis de O&M (US\$/MWh)	Média de custos fixos de O&M (US\$/kW-ano)
Combustão Pulverizada	6,4	28
Leito Fluidizado	-	-
IGCC	4,2	36

Fonte: EPRI, NETL, DOE, GTC, ConocoPhillips, GE, Bechtel, 2006.

Os custos indicados na tabela 4.8, no entanto, representam os custos para usinas submetidas a um regime operacional diferente das usinas brasileiras. Neste caso o fator de capacidade considerado é de 80%, o que provoca uma redução nos custos de operação e manutenção.

O PNE 2030 (2007) considera, de acordo com a realidade de operação, tecnologia empregada e característica do combustível utilizado nas usinas brasileiras, custos variáveis e fixos como segue:

Custo variável = 4 US\$/MWh

Custo fixo = 40 US\$/kW-ano

Tais custos representam apenas os custos de operação e manutenção da usina excluindo o custo do combustível.

4.4 IMPACTOS AMBIENTAIS

Os combustíveis fósseis são os principais responsáveis pelo volume de emissões de gases no mundo. Como principal vilão nesse grupo, aparece o carvão mineral, pois apresenta o maior coeficiente de emissões, quase o dobro do gás natural (DERMAUT, 2005). Visto as diferentes propriedades encontradas nesse mineral, durante a queima, seus diversos compostos reagem lançando na atmosfera óxidos de carbono, nitrogênio e enxofre (CO_x , NO_x , SO_x), além de particulados.

Com os vários impactos socioambientais associados não só à geração de energia em termelétricas a carvão, mas também à geração de energia em todas as suas formas, surgem nas últimas décadas medidas, leis e propostas com o intuito de regular, mitigar e controlar esses impactos. As usinas termelétricas podem causar a degradação da qualidade ambiental direta ou indiretamente, e por isso tem de passar por um processo de licenciamento ambiental, conforme estabelecido pelo CONAMA Nº 237/1997. Em todas as fases do empreendimento, viabilização, construção, operação e descomissionamento, questões ambientais são avaliadas pelos órgãos ambientais responsáveis durante o processo de licenciamento de acordo com a legislação em vigor, e o atendimento dos requisitos ambientais adicionais julgados relevantes e demandados pela sociedade (XAVIER 2004).

No Brasil existem esforços no sentido de controlar as emissões nocivas ao bem-estar da biodiversidade desde os anos 1970. Em 1990, uma resolução importante do CONAMA entrou em vigor, vindo a substituir a portaria 0231 de 1976. Esta resolução estabeleceu novos padrões de qualidade do ar. A tabela 4.9 a seguir mostra alguns dados que valem ser citados.

Tabela 4.9 – Limites de concentração de poluentes no ar

Elemento poluente	Concentração média (mg/m^3 de ar)
Partículas totais em suspensão	80
Partículas inaláveis	60
Fumaça	50
SO_2	80
CO	10.000
O_3	160
NO_2	100

Fonte: Resolução CONAMA nº 003/90

Contudo, com as tecnologias hoje disponíveis, muitas dessas emissões já são controladas e ficam dentro dos limites estabelecidos pela portaria. Basta algum investimento adicional na planta original da usina para que as emissões desses elementos se mantenham abaixo do máximo permitido.

Alterando a composição da atmosfera, danos reais ou potenciais ao meio ambiente e a saúde são iminentes e inquestionáveis. Apesar da enorme quantidade de poluentes encontrados na atmosfera urbana, apenas alguns são julgados como potencialmente causadores de efeitos adversos na saúde. Assim na elaboração das regulamentações ou na falta delas os órgãos ambientais nacionais se recorrem ao estabelecido por instituições internacionais, como EPA, a OMS, Banco Mundial e OCDE.

O Comitê Coordenador de Atividades de Meio Ambiente do Setor Elétrico - COMASE por exemplo, estabeleceu em 1994 o “Referencial para Orçamento dos Programas Socioambientais”, abordando hidrelétricas, termelétricas convencionais e sistemas de transmissão. Uma rápida consulta a esse manual vislumbra as causas e os tipos de diversos impactos associados ao processo de construção e operação das termelétricas a carvão, bem como quando eles ocorrem (construção, operação ou pós-operação) e algumas sugestões de mitigação e controle dos mesmos. A tabela 4.10 mostra alguns desses aspectos.

Tabela 4.10 – Impactos relacionados à construção, operação e pós-operação das UTE’s a carvão

Causas	Impactos	TO	Medidas/Ações/Projetos/Programas
Ocupação do solo	interferência com flora e fauna produção de ruído e poeira erosão do solo emissão de GEE pelas máquinas e caminhões que utilizam combustíveis fósseis	C	- recuperação de áreas degradadas - arborização - utilização de sistemas anti-poeira - regulação das máquinas para evitar produção de ruídos e emissões desnecessárias
Movimentos migratórios	Alteração da organização política e social da região Aumento da demanda por serviço público, habitação e infra-estrutura de transporte Aumento das atividades econômicas da região	C/O	Reorganização das atividades econômicas Organização das condições sanitárias e de saúde
Distorção estética	Poluição visual	C/O	Projetos arquitetônicos que reduzam o impacto visual
Produção de efluentes sanitários	Disseminação de doenças Interferência com fauna e flora aquática	C/O	Utilização de sistemas para tratamento de esgoto
Percolação da água da chuva nas áreas de estocagem de combustível	Contaminação de cursos d’água Contaminação do lençol freático	O	Instalação de bacias de sedimentação ou decantação Neutralização dos efluentes Impermeabilização de áreas de estocagem de

			combustível Monitoramento do lençol freático
Produção de emissões aéreas de material particulado	Dependendo da concentração: - Problemas respiratórios nos trabalhadores e populações próximas - Interferência na flora e na fauna	C/O	- Utilização de combustível com menores teores inertes - Remoção dos inertes antes da combustão (beneficiamento) - Utilização de tecnologias modernas de combustão com maior eficiência - Monitoramento das emissões
Emissões aéreas de óxidos de enxofre (SOx)	Dependendo da concentração: - Cheiro irritante - Problemas respiratórios e cardiopulmonares - Interferência na flora e na fauna	O	- Utilização de combustível com menores teores de enxofre - Remoção do enxofre antes da combustão (beneficiamento) - Utilização de tecnologias modernas de combustão com maior eficiência - Monitoramento das emissões e da qualidade do ar
Emissões aéreas de dióxido de carbono (CO ₂)	- Contribuição para o agravamento do efeito estufa	O	- Reflorestamento - Utilização de tecnologias modernas de combustão com maior eficiência
Emissões aéreas de óxidos de nitrogênio (NOx), hidrocarbonetos e monóxido de carbono (CO)	Dependendo da concentração: - Produção de oxidantes fotoquímicos - Diminuição da visibilidade (smog) - Irritação nos olhos e garganta - Interferência na flora e na fauna agravamento das chuvas ácidas	O	- Controle da combustão - Adoção de queimadores de baixa emissão de NOx - Utilização de tecnologias modernas de combustão com maior eficiência - Monitoramento das emissões e da qualidade do ar
Vazamentos involuntários do sistema de manuseio e estocagem de combustíveis líquidos	- Contaminação dos cursos de água - Interferência na flora e fauna aquáticas - Contaminação do lençol freático	O	- Implantação de sistemas de retenção de óleo - Impermeabilização das áreas de estocagem

Produção de efluentes líquidos da drenagem pluvial, lavagens e tratamento de água	<ul style="list-style-type: none"> - Elevação do teor de sólidos suspensos e dissolvidos nos cursos de água - Interferência na flora e fauna aquáticas O 	O	<ul style="list-style-type: none"> - Cuidados operacionais evitando o espalhamento de partículas combustíveis e cinzas - Bacias de sedimentação e neutralização - Monitoramento dos efluentes líquidos
Produção de efluentes líquidos do sistema de remoção de cinzas pesadas	<ul style="list-style-type: none"> - Contaminação dos cursos de água com sólidos suspensos e dissolvidos, metais lixiviados e alteração do pH O 	O	<ul style="list-style-type: none"> - Decantadores e bacias de sedimentação - Correção de pH e precipitação de metais - Uso de sistemas de remoção de cinzas a seco - Monitoramento da qualidade da água
Produção de resíduos sólidos oriundos do processo	<ul style="list-style-type: none"> - Efeito estético indesejável - Ocupação de áreas extensas de depósito - Possibilidade de contaminação de recursos hídricos devido a percolação das chuvas - Poeiras / partículas fugitivas 	O/PO	<ul style="list-style-type: none"> - Utilização dos resíduos sólidos (reaproveitamento) como matéria prima para outros processos industriais - Seleção de áreas adequadas para disposição temporária dos resíduos - Implantação de aterro de resíduos conforme especificação do órgão ambiental

Fonte: MME/ELETOBRÁS/COMASE

Legenda: TO = tempo de ocorrência; C = construção; O = operação; PO = pós-operação

Dentre tantas causas e conseqüências é difícil saber qual situação tem os piores impactos na natureza e no meio urbano. Contudo, pode ser destacado o aumento do efeito estufa, a formação de chuva ácida e a produção de resíduos sólidos. Quando o carvão é explorado e queimado sem controle, os danos podem ser irreversíveis. Muitos estudos também estão sendo realizados para tentar quantificar o impacto na saúde da população, devido às emissões das UTEs. A saúde pública é hoje assunto de extrema relevância quando fala-se das externalidades da geração de eletricidade por meio de termelétricas a carvão.

Em 2007, a produção de carvão no Brasil atingiu 5,965 milhões de toneladas e aproximadamente 85% dessa produção foi destinada à geração de energia elétrica (BEN, 2008). Por isso, faz-se necessário considerar os impactos de toda a cadeia de produção energética a partir do carvão, apesar de o setor elétrico ser responsável diretamente apenas pela fase de geração de energia pelas termelétricas. Logo, devemos considerar os impactos da cadeia energética completa que podem afetar a sociedade como um todo.

Segundo o PNE 2030, as atividades da cadeia de produção energética a partir do carvão mineral podem ser assim resumidos:

- exploração e mineração do carvão;
- beneficiamento do carvão;
- transporte do carvão;
- armazenamento do carvão;
- queima do carvão para produção de energia;
- disposição e gerenciamento dos resíduos;

Os impactos socioambientais provocados por essas atividades podem ser vistos na tabela 4.11.

Tabela 4.11 – Impactos socioambientais relacionados à cadeia de produção energética a partir do carvão

O que	Impactos
Ar	Poeira Gases nas minas de subsolo
Solo	Geração de Resíduos Alteração na vegetação e na fauna Variação na morfologia do relevo Alteração das características do solo
Água Superficial	Alteração físico-química dos mananciais hídricos Alteração dos cursos de água Captação de água para beneficiamento Sólidos em suspensão
Água Subterrânea	Contaminação química Alteração na profundidade do nível d'água Variação nas propriedades dos aquíferos

Fonte: CETEM/MCT, 2001

As práticas de controle de todas as atividades que antecedem a produção de energia também são fundamentais. No mundo e no Brasil o cenário das atuais práticas de mineração é bastante positivo. As

ações corretivas e preventivas já se encontram em um nível muito bom. Porém, é importante lembrar que os impactos positivos ou negativos sempre irão ocorrer e o controle, ou a mitigação desses nunca será 100% eficaz e nunca irá recuperar tudo aquilo que se perdeu com tais atividades, seja físico, químico ou biológico.

No estado de Santa Catarina sabe-se que devido ao descaso e a negligência com as conseqüências da mineração e do uso do carvão, a atividade predatória desenvolvida pelas empresas na região ao longo de algumas décadas deixou quase cinco mil hectares de área degradada, as principais bacias hidrográficas completamente poluídas, provocou o desaparecimento de inúmeras nascentes e cursos d'água. Com isso, os custos de recuperação seriam, segundo estudos do governo do Estado, de cerca de R\$ 250 milhões, mas a Agência Folha apurou que o Ministério das Minas e Energia trabalha com uma cifra de até R\$ 1 bilhão (Agência Folha, 2000).

As Nações Unidas promoveram a Convenção sobre Mudanças Climáticas com o objetivo de estabilizar as emissões de GEE na atmosfera a um nível que não mais ocasione mudanças climáticas extremas e danosas. Em 1992, no Rio de Janeiro, foi realizada a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (UNCED). O Protocolo de Quioto foi criado em 1997 para implantá-la. O ponto mais importante do protocolo é a redução dos níveis de emissão dos GEE pelos países desenvolvidos (países do Anexo-1) em 5,2% abaixo dos níveis de 1990. Essa meta, assumida por 39 países, deve ser alcançada entre 2008 e 2012. Os países que não têm metas (países em desenvolvimento, incluindo Brasil) são chamados os países Não-Anexo 1.

Sabe-se que o parque de geração brasileiro é relativamente limpo devido a grande presença de hidrelétricas que o compõem. Mas o adicional de aproximadamente 5.000 MW previstos em novas termelétricas a carvão no Sistema Interligado Brasileiro (SIN), mais que dobra o nível atual de emissões de GEE nesse sistema. As estimativas apontam que serão lançados adicionalmente, pelo acréscimo citado, pelo menos 22,3 milhões de toneladas de CO₂e/ano, para um fator de capacidade médio operativo de 60% (PNE 2030, 2006).

Algumas medidas importantes podem ser tomadas para reduzir o número de emissões de CO₂ como (HOSKYN et al apud LORA, 2002):

- eficiência e conservação de energia;
- substituição de combustíveis;
- utilização de fontes renováveis de energia;
- captura e estocagem de CO₂ (CCS);

Todos esses passos já são realizáveis. Os métodos de CCS ainda custam muito caro, mais até do que a utilização de fontes renováveis, e ainda precisam ser aprimorados. A eficiência e a conservação de energia depende de políticas públicas com foco na questão e acima de tudo do uso que cada

consumidor faz da energia, ou seja, conscientização. A substituição de combustíveis remete a utilização das fontes renováveis de energia, como solar e solar fotovoltaica, eólica, hidráulica e biomassa.

O Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2006 - 2015 mostra que 54% dos 7.600 MW previstos para entrar em operação no horizonte do Plano provêm de combustíveis fósseis (gás natural, óleo combustível, óleo diesel e carvão). As emissões totais foram estimadas em torno de 30 Mt CO₂ para 2014. Isso significa um aumento de cerca de 3 vezes o valor das emissões estimadas pelo MME/EPE em 2006, que correspondem a 12,2 Mt CO₂.

A partir de 2010 os níveis de emissão de CO₂ em todas as regiões do Brasil vão aumentar. O principal motivo para isso acontecer é a entrada das usinas Candiota III e Jacuí, no sul do país. No nordeste a maior causa é a entrada de várias usinas geradoras a gás natural na região.

O Brasil, apesar de não ter níveis tão altos de emissões de GEE, como aqueles registrados nos países desenvolvidos, é o terceiro país na lista dos países em desenvolvimento com a maior taxa de crescimento de emissão desses gases devido à produção e ao consumo de energia. Ainda assim não definiu nenhuma meta ou intenção de redução de suas emissões de GEE até o momento em que este trabalho estava sendo escrito.

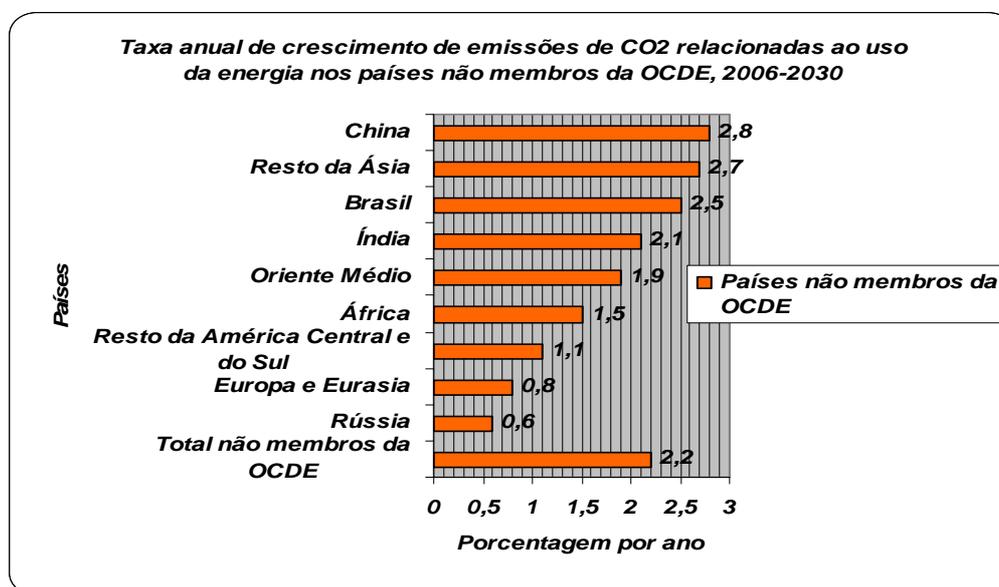


Figura 4.1 – Taxa anual de crescimento das emissões de dióxido de carbono relacionadas à energia. (Fonte: IPCC)

A forma como a sociedade moderna se desenvolveu tornou cada vez maior a necessidade de se ter energia. A energia traz bem-estar para gerações presentes e futuras, além disso, pode ser uma grande aliada no combate às desigualdades sociais e importante ferramenta para aumentar o padrão de vida de

qualquer ser humano. Mas sua produção e consumo têm de ser equilibrada e principalmente sustentável em todas as esferas.

A escolha de fontes de energia que entram na matriz energética de qualquer país, deve avaliar e considerar os aspectos econômicos, sociais e ambientais. É muito importante o estabelecimento de indicadores de sustentabilidade que respeitem essas três dimensões de sustentabilidade.

Indicadores ambientais: emissões de gases de efeito estufa, poluição do ar, uso da terra, uso de material e produção de rejeitos e formação de chuvas ácidas. Por outro lado podemos citar como indicadores socioeconômicos o esgotamento das reservas de combustível e a garantia de suprimento.

Atividades humanas como transporte, indústria, agricultura e conversão de energia causam danos ao meio ambiente e à saúde humana. Estes variam de acordo com o tipo da atividade e o local onde ela está sendo realizada. Sabemos que em geral, o custo de impactos ambientais provenientes da produção de energia elétrica não está internalizado ao custo total das usinas. Segundo a política internacional tais custos são chamados de custos das externalidades ou custos externos.

Nos últimos 20 anos, muito se avançou em estudos e métodos que possibilitam estimar monetariamente as externalidades dos danos ligados às atividades humanas, principalmente pelo projeto “ExternE”, ou Externalities of Energy, promovido pela Comissão Europeia. Apesar das inúmeras variáveis inerentes ao cálculo dos efeitos da conversão de energia, das incertezas e diferentes opiniões, o ExternE se tornou uma fonte reconhecida para estimar tais externalidades.

O projeto ExternE tem como principal objetivo valorar os maiores impactos das atividades econômicas. De acordo com o projeto os custos externos, também conhecidos como externalidades, é todo impacto não considerado ou não compensado que atinge um grupo de pessoas causado pela atividade econômica e social de um outro grupo. Assim, uma usina geradora, ao lançar SO₂ na atmosfera, provocando danos a instalações e à saúde humana, implica automaticamente em um custo externo.

A internalização dos custos das externalidades pode ser feita de várias formas. Uma delas é aumentar o preço da tarifa energética de acordo com a fonte produtora de energia elétrica. Para a produção de eletricidade a partir do carvão, por exemplo, seriam adicionados de 2 a 7 centavos de euro por kWh na maioria dos estados membros da União Europeia (ExternE). Outra solução seria a promoção de fontes novas e renováveis de energia através de políticas públicas adequadas a cada país.

As categorias de impacto analisadas para precificar os custos externos segundo o projeto são: saúde humana e mortalidade, saúde humana e morbidade, materiais de construção, agricultura, aquecimento global, ecossistemas e uso e manejo da terra. A tabela 4.12, a seguir, foi resultado do estudo do ExternE e apresenta um resumo para os preços dos custos externos de algumas fontes de geração.

Tabela 4.12 – Custos das externalidades.

Fonte	Externalidades (R\$/MWh)
Carvão e linhito	51 a 382,5
Óleo	76,5 a 280,5
Gás	25,5 a 102
Nuclear	5,1 a 17,9
Biomassa	5,1 a 127,5
Hidrelétrica	2,55 a 25,5
FV	0 a 15,3
Eólica	0 a 6,38

Fonte: ExternE

Posto tais informações, é possível analisar o custo de se produzir energia elétrica a partir do uso do carvão como combustível, além de adicionar os custos sociais e ambientais (custo externos) a essa tarifa de geração.

No capítulo a seguir será feita, portanto, uma análise comparativa entre os sistemas de geração de eletricidade apresentados no trabalho.

5 PROPOSTA, PRECIFICAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Este capítulo apresenta os resultados obtidos por meio das proposições feitas nos capítulos anteriores. Para efetuar toda a análise, num primeiro momento é proposto o programa brasileiro de promoção de sistemas fotovoltaicos.

A proposta é que o Brasil desenvolva legalmente um programa nacional que terá seu início no ano de 2011. O ano de 2010 servirá para a realização dos estudos necessários, além de todo caminho burocrático que um programa desse porte terá de sofrer.

O programa é embasado nos moldes daquele que foi desenvolvido na Alemanha e se mostrou o mais eficiente no âmbito do desenvolvimento e disseminação da tecnologia FV. O objetivo do programa brasileiro consistiria na meta de instalação de 30 GW de sistemas FV até o ano de 2030. Segundo as projeções do Ministério de Minas e Energia o consumo de energia elétrica em 2030 será de 1030,1 TWh, assim a potência instalada de um sistema fotovoltaico no mesmo ano será responsável por suprir cerca de 4,6% dessa demanda.

O programa brasileiro terá metas de instalação anuais que deverão ser alcançadas e não ultrapassadas, garantindo assim um crescimento do mercado FV constante e sólido. O programa de incentivo é baseado no *feed-in tariff* alemão. Todo sistema que for instalado enquanto durar o programa receberá uma tarifa diferenciada por kWh gerado. Esse benefício terá a duração de 20 anos que é tempo necessário para que o investimento inicial seja pago.

Por meio da figura 3.4 do capítulo 3, que mostra uma tendência de queda no valor do investimento por kWp num tempo futuro, considera-se então para a presente análise três diferentes valores para esse dado, levando-se em conta a sua tendência de queda. A tabela 5.1 apresenta cada um dos três casos e seus respectivos valores de custo de retorno (R\$/kWh) levando-se em conta os parâmetros da tabela 5.2. Para o cálculo da tabela 5.1 foi utilizado um valor médio de irradiação de 1.500 watts por metro quadrado.

Tabela 5.1 – Projeção do valor do investimento inicial (US\$/kWp) e custo de retorno da energia (US\$/kWh) em relação ao tempo futuro.

Ano	Caso FV	Valor em US\$/kWp	Valor em US\$/kWh
2011 a 2015	Caso FV 1	7.000,00	0,594
2016 a 2025	Caso FV 2	6.000,00	0,509
2026 a 2030	Caso FV 3	5.000,00	0,425

Tabela 5.2 – Parâmetros para o cálculo do custo de retorno da energia (US\$/kWh).

Parâmetro	Valor
Investimento	Dependente do caso da tabela 5.1
Tempo de retorno	20 anos
Fator de Capacidade	18%
Taxa Anual	12%

Esses três diferentes casos são levados em conta no planejamento do programa, assim como no respectivo valor da tarifa prêmio a ser paga. A tabela 5.3 mostra resumidamente o funcionamento do programa conforme metas de instalação e o impacto financeiro. Essa tabela apresenta dados importantes referentes apenas a alguns anos. Os anos escolhidos são os de começo e fim do pagamento do programa além dos anos de transição dos casos, como visto na tabela 5.1.

Tabela 5.3 – Plano do programa brasileiro de sistemas FV e o impacto econômico.

Ano	Meta de Instalação (MW)	Potência Instalada Acumulada (MW)	Potência Instalada no Programa por Caso (MW)			Total Anual do Fundo FIT (bilhões de R\$)
			Caso 1	Caso 2	Caso 3	
2011	1000	1000	1000	0	0	1,593
2015	1000	5000	5000	0	0	7,966
2016	1500	6500	5000	1500	0	10,014
2025	1500	20000	5000	15000	0	28,450
2026	2000	22000	5000	15000	2000	30,725
2030	2000	30000	5000	15000	10000	39,829
2035	0	30000	0	15000	10000	31,863
2040	0	30000	0	7500	10000	21,621
2045	0	30000	0	0	10000	11,380
2049	0	30000	0	0	2000	2,276

Da tabela 5.3, observa-se, que os valores que devem ser arrecadados para o Fundo de Feed-in Tariff (FIT) sempre são na casa dos bilhões de reais, chegando a um pico no ano de 2030 de R\$ 39.829.000,00. Apesar desse valor representar uma boa parcela do que vale na totalidade o sistema elétrica brasileiro, o investimento do governo será muito menor, considerando que para a realização de tal programa, conforme citado no capítulo 3, esse fundo deve ser mantido pelos próprios consumidores de energia elétrica. Desvinculando o Estado dessa obrigação e de qualquer crise que possa atrapalhar o programa.

São duas as propostas para manter esse fundo. A primeira proposta é que o montante anual do fundo seja rateado entre todos os domicílios brasileiros. Para tal análise foi considerado que o número de domicílios brasileiros é igual a 57.557.000 no ano de 2008 segundo o IBGE e cresce a uma taxa anual igual a 3,1%.

A primeira proposta mostrou-se socialmente injusta, pois cobrava o mesmo valor adicional na conta de energia para todos, sem distinção de poder aquisitivo. Ou seja, no ano de pico do fundo que é em 2030, tanto o domicílio pertencente à classe mais baixa quanto aquele da classe mais alta teriam que

pagar um valor adicional de R\$ 29,46 por mês na conta de energia elétrica. Valor, este, muito alto, mostrando que essa primeira proposta é economicamente inviável.

A segunda proposta consiste no rateio do montante do fundo FIT dentre todos os consumidores de energia do Brasil. Logo, o valor do fundo daquele ano seria dividido pelo valor da energia que foi consumida durante o mesmo. Assim tem-se um valor no acréscimo da tarifa de energia (R\$/kWh). Este método é socialmente justo, pois aquele consumidor que gasta mais energia, classes mais altas, pagarão mais e as classes mais baixas pagarão menos. No ano de 2030, maior valor do fundo FIT, o acréscimo no valor da tarifa será de 0,03866 (R\$/kWh). Mostrando-se um método mais justo e economicamente viável. Isso só foi possível, pois esse segundo método rateia o valor do fundo não somente com o setor residencial, mas também com todos os outros setores consumidores de energia elétrica como o setor do comércio e da indústria, grandes consumidores de eletricidade.

A tabela 5.4 mostra esses resultados relacionando apenas os anos de maior relevância para a análise.

Tabela 5.4 – Demonstrativo do rateio do fundo FIT utilizando dois métodos diferentes.

Ano	Fundo FIT (bilhões)	Domicílios	Rateio por domicílio por mês	Energia Consumida (TWh)	Tarifa Adicional (R\$/kWh)
2011	R\$ 1,593	63.077.000	R\$ 2,104	508,24	0,00313
2015	R\$ 7,966	71.269.825	R\$ 9,314	596,4	0,01335
2016	R\$ 10,014	73.479.189	R\$ 11,357	618,44	0,01619
2025	R\$ 28,450	96.714.668	R\$ 24,513	868,35	0,03276
2026	R\$ 30,725	99.712.822	R\$ 25,678	900,07	0,03411
2030	R\$ 39,829	112.664.131	R\$ 29,459	1030,1	0,03866
2035	R\$ 31,863	131.243.860	R\$ 20,231	1191,85	0,02673
2040	R\$ 21,621	152.887.621	R\$ 11,785	1353,6	0,01597
2045	R\$ 11,380	178.100.709	R\$ 5,324	1515,35	0,00750
2049	R\$ 2,276	201.233.514	R\$ 0,942	1644,75	0,00138

Através desses resultados observa-se que um programa para a promoção do desenvolvimento na utilização de sistemas fotovoltaicos, aplicando o método de divisão do fundo FIT no consumo da energia, é viável.

Entretanto, se o Brasil não desenvolver políticas desse tipo, pode ser efetuada outro tipo de análise. Utilizando os valores da tabela 5.1 e considerando três cenários diferentes para a correção da tarifa normal de energia, valores na tabela 5.5, é possível verificar quando a instalação de sistemas FV será economicamente viável sem nenhum tipo de subsídio. É considerado um valor de 0,35 R\$/kWh para a tarifa normal de energia no ano de 2011. O gráfico 5.1 apresenta o resultado dessa comparação.

Tabela 5.5 – Valores para a correção da tarifa normal de energia.

Cenário	Correção Anual
Cenário 1	2%
Cenário 2	3%
Cenário 3	4%

A partir do gráfico 5.1 observa-se que caso o cenário 3 se confirme, o investimento em sistemas FV através dos próprios consumidores tornar-se-á economicamente viável. Considerando o pior panorama, ou seja, a taxa de aumento da tarifa de acordo com o cenário 1, e garantindo a confirmação do caso FV 3, o investimento em um sistema FV será viável apenas no ano 2048.

Este resultado é interessante, pois com a implementação de um programa de incentivo a sistemas fotovoltaicos, como já citado, tem-se a uma idéia que provavelmente quando o programa brasileiro de incentivos terminar no ano de 2050, o investimento nesses sistemas FV já valerá a pena, mesmo sem tal suporte. Assim, com um mercado maduro e consolidado no Brasil, esse, por si só, continuará a se desenvolver continuamente sem nenhum tipo de intervenção.

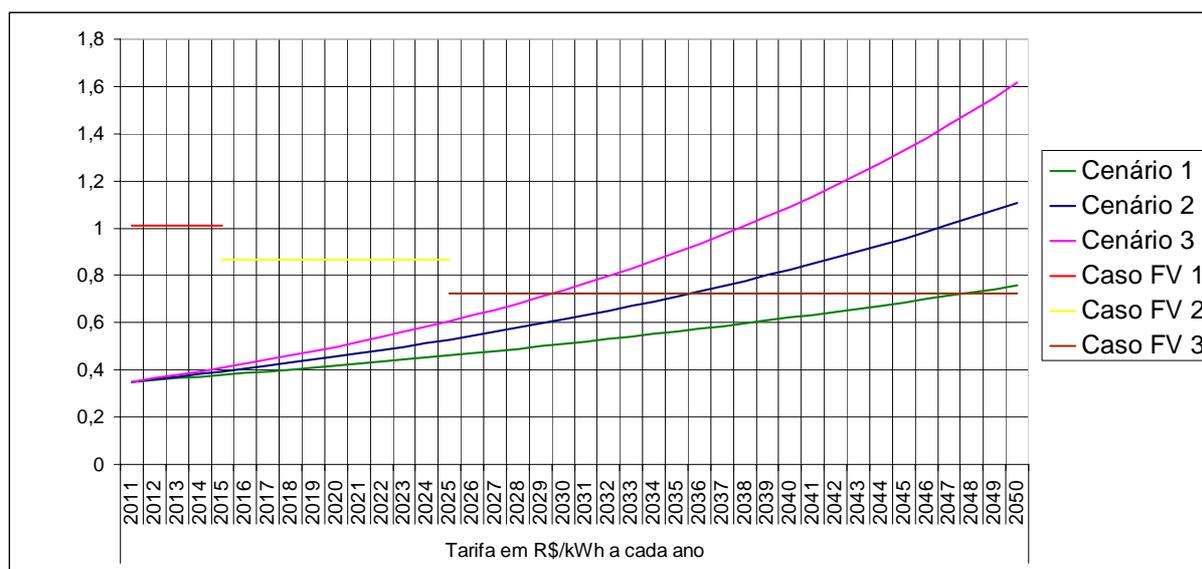


Gráfico 5.1 – Comparação entre a tarifa FV e a tarifa normal de energia em R\$/kWh ao longo do tempo.

Outra proposição do presente trabalho é a comparação entre a utilização de sistemas fotovoltaicos ao invés de usinas termelétricas a carvão. Para essa comparação utilizam-se três valores diferentes do preço do carvão. Foi levado em conta o menor e o maior valor da tonelada de carvão proveniente de minas brasileiras. Conforme o capítulo 4, o carvão mais barato é utilizado na usina termelétrica Candiota III e o mais caro na usina termelétrica Figueira. Para efeito de comparação foi utilizado o valor de R\$ 181,90 a tonelada de carvão internacional por meio de uma parametrização dos dados dos últimos dez anos (BP, 2008). No intuito de comparações futuras o valor dos referidos preços foi atualizado a uma taxa de 5% ao ano, também baseado na parametrização feita.

Tabela 5.6 – Parâmetros para o cálculo do custo do quilowatt-hora da geração por meio de carvão.

Investimento (U\$/kW)	1.500,00
Taxa de retorno	12%
Vida útil da usina	30 anos
Eficiência da usina	30 %
Fator de capacidade	40%

Utilizando os parâmetros das tabelas 5.6 e 5.7, além dos valores dos preços do carvão atualizados, é calculado o custo em reais do quilowatt-hora para cada tipo de carvão em questão. Os valores dos preços atualizados e do custo do quilowatt-hora para alguns anos referente às três fontes de carvão são apresentados nas tabelas 5.8, 5.9 e 5.10.

Tabela 5.7 – Poder calorífico do carvão de acordo com a fonte.

Poder calorífico do carvão (kcal/kg)		
Candiota III	Figueira	Internacional
3200	4850	3200

Tabela 5.8 – Custo do quilowatt-hora ao longo do tempo para Candiota III.

Ano	Preço (R\$/ton)	Custo (R\$/kWh)
2008	52,8	0,1612
2010	58,21	0,1660
2015	74,29	0,1803
2020	94,82	0,1986
2025	121,01	0,2220
2030	154,45	0,2519
2035	197,12	0,2901
2040	251,58	0,3389
2045	321,09	0,4012

Tabela 5.9 – Custo do quilowatt-hora ao longo do tempo para Figueira.

Ano	Preço (R\$/ton)	Custo (R\$/kWh)
2008	271,00	0,2737
2010	298,77	0,2901
2015	381,82	0,3389
2020	486,67	0,4012
2025	621,13	0,4807
2030	792,74	0,5821
2035	1.011,76	0,7116
2040	1.291,29	0,8768
2045	1.648,06	1,08

Tabela 5.10 – Custo do quilowatt-hora ao longo do tempo para Internacional.

Ano	Preço (R\$/ton)	Custo (R\$/kWh)
2008	181,90	0,2765
2010	200,54	0,2932
2015	255,95	0,3428
2020	326,66	0,4062
2025	416,91	0,4870
2030	532,10	0,5902
2035	679,11	0,7219
2040	866,74	0,8900
2045	1.106,20	1,1045

Por meio dos dados das três últimas tabelas e utilizando os três valores para o custo da energia fotovoltaica gerada da tabela 5.1 é obtido o gráfico 5.2. Esse gráfico compara os três valores do custo da energia FV em relação aos valores dos custos das diferentes fontes de carvão ao longo do tempo.

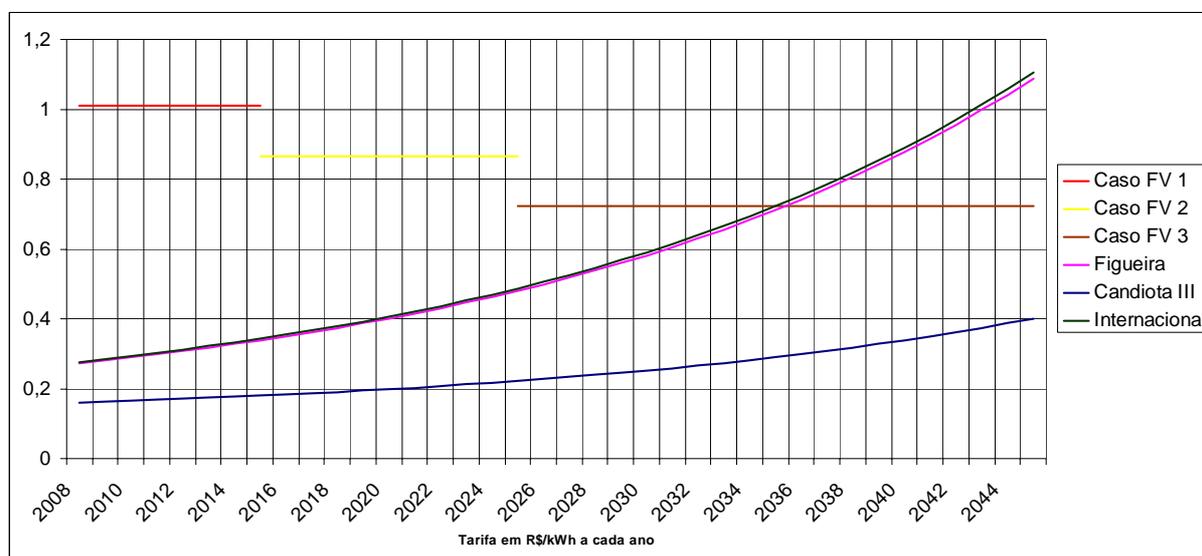


Gráfico 5.2 – Comparação entre valores de custos de FV em relação às fontes de carvão em R\$/kWh.

O gráfico 5.2 mostra que os custos da energia gerada de Figueira quanto utilizando o carvão Internacional são muito próximos e seguem a mesma tendência, aproximadamente no ano de 2036 estes terão o mesmo valor da energia FV gerada, pois provavelmente o caso FV 3 irá se confirmar. Isto demonstra que a partir desse ano, dependendo do carvão utilizado, o investimento em usinas fotovoltaicas será tão competitivo quanto em usinas termelétricas a carvão. Em contraponto a tudo isso, analisando simplesmente o lado econômico, Candiota III dificilmente será menos competitiva que a aplicação FV.

Se considerarmos que os sistemas fotovoltaicos instalados serão todos conectados à rede, e portanto, muito próximos do ponto de consumo, vários encargos que estão agregados a tarifa normal de cobrança de energia podem ser abatidos. Assim o preço final na tarifa do consumidor é praticamente o preço de custo do sistema FV. Em contraponto temos que, o preço que um consumidor paga pela energia elétrica gerada numa usina a carvão é mais alto do que o preço de custo aqui considerado.

A última proposição é levar em conta nas análises o valor do impacto ambiental, visto no capítulo 2 e 4, que as termelétricas a carvão estão causando ao nosso planeta. Numa primeira análise levam-se em conta os valores extremos das externalidades de usinas termelétricas a carvão, como citado na tabela 4.12. Os valores de externalidades usados estão na tabela 5.11. Esses valores são aplicados aos valores dos custos da energia a carvão, já calculados nas tabelas 5.8, 5.9 e 5.10, e assim os gráficos 5.3, 5.4 e 5.5 são obtidos.

Tabela 5.11 – Valores das externalidades aplicados às usinas termelétricas a carvão.

Externalidade 1	R\$/kWh 0,0510
Externalidade 2	R\$/kWh 0,3825

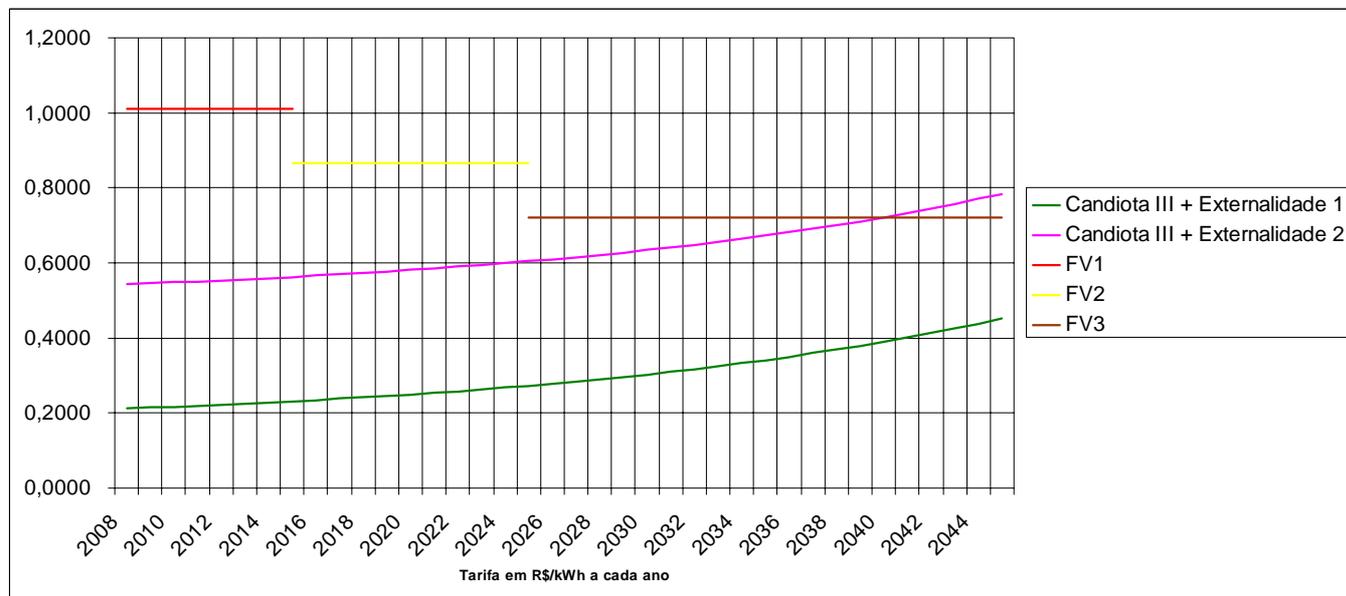


Gráfico 5.3 – Comparação entre custos da energia de Candiota III mais externalidades em relação aos custos do FV.

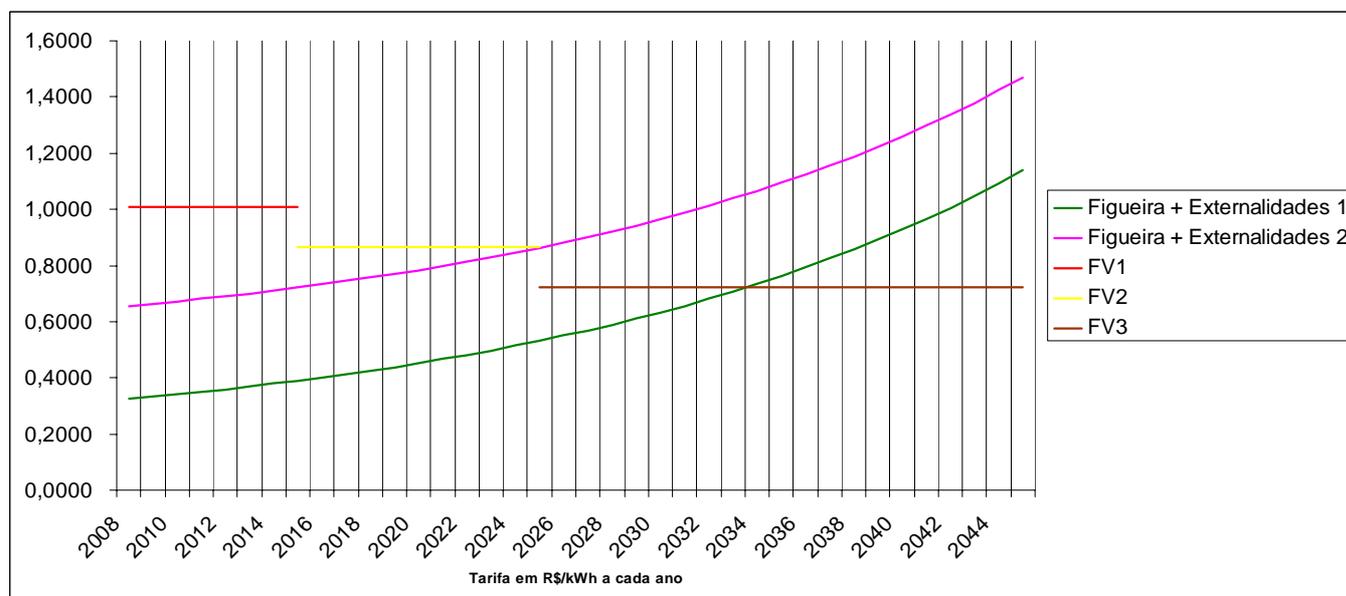


Gráfico 5.4 - Comparação entre custos da energia de Figueira mais externalidades em relação aos custos do FV.

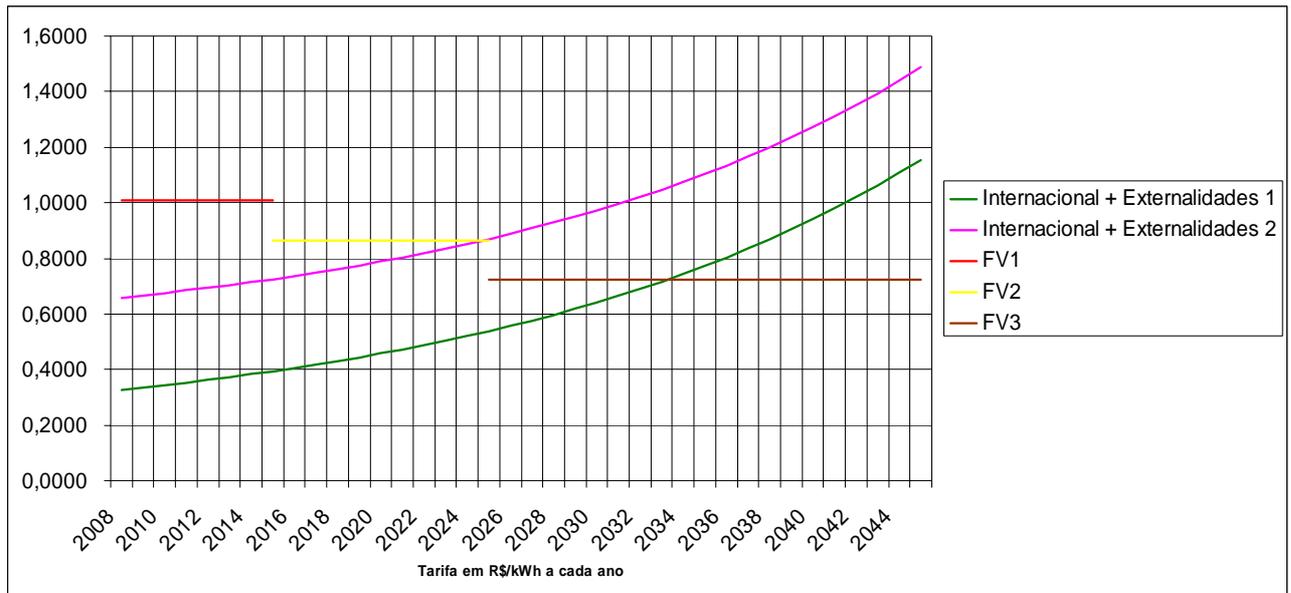


Gráfico 5.5 - Comparação entre custos da energia do Internacional mais externalidades em relação aos custos do FV.

Analisando os três últimos gráficos é verificado a grande influência que os custos das externalidades pode ter no valor do preço final. O valor do custo da energia de Candiota III, que numa observação anterior, os custos da energia não alcançavam os custos do FV, com o valor da maior externalidade adicionada ocorre a equiparação de custos no ano de 2040.

Já os gráficos 5.4 e 5.5 mostram resultados impressionantes. Através da adição da maior externalidade ambas as fontes energéticas têm seus custos de energia equivalentes ao FV. Já no ano de 2025, considerando que o cenário FV3 ainda não estava confirmado, e, levando em conta o menor valor da externalidade, os custos de energia irão se equiparar no de 2034.

Esses resultados demonstram que, quando o Brasil adicionar aos custos de energia gerada proveniente de fontes a carvão, os preços destas e da geração fotovoltaica serão equivalentes entre os anos de 2025 e 2034.

Ainda levando em conta considerações ambientais, é muito importante citar a quantidade evitada de emissão de carbono que o Brasil teria caso implementasse o programa nacional de promoção a sistemas FV.

Levando em consideração o método apresentado na seção 2.4 e utilizando dois cenários diferentes. O primeiro considera para o cálculo toda a matriz energética brasileira e suas projeções segundo o MME. O segundo cenário considera apenas a parcela que utiliza fontes a carvão e a gás natural, fontes não renováveis de energia.

A tabela 5.12 apresenta a média de emissão de CO₂ por MWh referente a cada cenário para alguns anos além do valor em toneladas da emissão de carbono evitado.

Tabela 5.12 – Média de CO₂ por MWh e quantidades em toneladas de emissão de CO₂ evitados.

Ano	2010	2015	2020	2025	2030
Média 1 de Emissão de CO ₂ (ton/MWh)	0,100	0,092	0,087	0,093	0,097
Média 2 de Emissão de CO ₂ (ton/MWh)	0,523	0,528	0,533	0,547	0,557
Energia FV Gerada (MWh)	1.157.800	7.884.000	19.710.000	31.536.000	47.304.000
Cenário 1 – Toneladas de CO ₂ Evitado	155.161	729.118	1.718.121	2.937.797	4.603.072
Cenário 2 – Toneladas de CO ₂ Evitado	827.428	4.167.424	10.506.887	17.274.685	26.346.221

Por meio dos resultados da tabela (5.12) e utilizando os dados da tabela (2.1) do capítulo 2 pode ser feito a mensuração em reais do valor dessas toneladas de carbono que deixarão de ser emitidas. Para o cálculo foi considerado o maior valor de uma RCE projetado para o ano de 2012 pela instituição Societé Générale. O valor dessa RCE é de R\$ 45,90. A tabela (5.13) apresenta esses valores para os cenários 1 e 2 no ano de 2030.

Tabela 5.13 – Valores em reais das toneladas de CO₂ evitadas no ano de 2030

Cenário 1 – Toneladas de CO ₂ Evitado	R\$ 211.281.005
Cenário 2 – Toneladas de CO ₂ Evitado	R\$ 1.209.291.544

Esses valores, que poderiam ser arrecadados com políticas junto a ONU de substituição de usinas que não utilizam fontes renováveis de energia por sistemas FV, são expressivos. Mostrando mais uma vez a grande relevância que o meio ambiente e seus impactos tem na matriz energética brasileira.

A seguir são apresentadas as conclusões e algumas recomendações para estudos futuros, considerando todos os resultados obtidos no presente capítulo.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho tinha como objetivos apresentar dois sistemas de geração de energia elétrica, as termelétricas a carvão e os sistemas fotovoltaicos, e compará-los de formas distintas. Verificar quando a aplicação de sistemas FV seria economicamente viável, como seria um programa brasileiro de promoção a geração FV e qual seria o impacto financeiro, quando o custo da energia fotogerada seria equivalente a energia de fontes a carvão num tempo futuro e comparar as duas fontes energéticas levando em consideração o fator das externalidades aplicado a geração das termelétricas a carvão.

A proposta para um programa brasileiro para desenvolvimento de aplicação de sistemas fotovoltaicos utilizando a segunda metodologia, que é a divisão do fundo FIT proporcional ao consumo de energia entre todos os consumidores, se mostrou viável economicamente. Além de que na comparação entre os custos da energia fotogerada e da energia com tarifa normal, foi observado que um programa brasileiro nos moldes citados é essencial para alavancar o mercado interno de sistemas FV nos próximos 30 anos. Quanto ao lado ambiental, o programa brasileiro seria responsável por deixar de emitir uma parcela considerável de CO₂, cuja arrecadação pode ser maior que 1 bilhão de reais, dependendo do valor da tonelada de CO₂ praticada no mercado. Para gerar arrecadação, essa parcela de CO₂ evitada poder ser vendida como créditos de carbono e com o montante realizar trabalhos para alavancar o uso de fontes renováveis no Brasil, além de tornar projetos na área de eficiência de energia uma prioridade.

Portanto, a difusão e utilização dos sistemas fotovoltaicos são sustentáveis ambientalmente e socialmente. O fator econômico torna-se sustentável no presente com a aplicação de uma legislação adequada. Já considerando as termelétricas a carvão, observou-se que seu uso é insustentável tanto ambientalmente quanto socialmente. No entanto, por ser uma tecnologia madura, ela é vantajosa apenas economicamente.

Na comparação entre os custos da energia gerada a partir das fontes FV versus as UTEs a carvão, ficou claro que ambas irão se equivaler num momento futuro, por volta do ano de 2036. Mas considerado os valores de externalidades esse tempo pode ser reduzido para o ano de 2025. Assim fica claro que ambas tecnologias irão concorrer financeiramente, mas no intuito de desenvolver o mercado FV brasileiro o mais rápido possível e diminuir as emissões dos GEE, é primordial o planejamento e implementação de um programa brasileiro de incentivo a instalação de sistemas fotovoltaicos desde já. Além de desenvolver o mercado nacional, a possibilidade do país se tornar um grande exportador de produtos para o mercado FV, exportando tecnologia (produtos com alto valor agregado), é grande.

As diretrizes para a formulação de uma legislação que dê suporte ao uso de sistemas fotovoltaicos foram apresentadas neste trabalho, mostrando a presente, real e sustentável possibilidade de se considerar que, na expansão do sistema elétrico brasileiro para as próximas décadas, tais sistemas representem parte de todo seu potencial.

Porém, é fundamental e imprescindível que a realização de outros estudos sejam feitos de modo a avaliar:

- o impacto no fluxo de potência da rede do SIN devido a inserção de uma certa potência de SFCR;
- a eficácia de se compor parte da matriz com sistemas distribuídos;
- a estabilidade de operação do SIN após a inserção dos sistemas distribuídos na rede;
- a economia com custos de T&D pela substituição das atuais fontes de geração, cada vez mais distantes dos centros de carga, por fontes novas e renováveis de energia, capazes de gerar eletricidade tão próximas da carga quanto se queira;
- a sustentabilidade de outras fontes de geração energia elétrica;

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2008). “Atlas da Energia Elétrica do Brasil”. 5ª Ed. Brasília:

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (2005). “Atlas da Energia Elétrica do Brasil”. 2ª Ed. Brasília:

Agência Folha. (2000). “Exploração de carvão polui o sul de Santa Catarina” Disponível em: <<http://www1.folha.uol.com.br/folha/cotidiano/ult95u17688.shtml>>

ALDABÓ, R. (2002). “Energia Solar”. São Paulo.

BP – British Petroleum. (2008). “BP Statistical Review of World Energy”. BP, London.

CARVALHO, C.H.B. (2005) “Oportunidades de Negócios no Setor Elétrico com Uso do Carvão Mineral Nacional”. Apresentação EPE.

CETEM/MCT (2001). Projeto Conceitual para Recuperação Ambiental da Bacia Carbonífera Sul Catarinense, vol I, RT 33/2000 – Relatório Técnico elaborado para o SIECESC; Centro de Tecnologia Mineral.

COMASE, Comitê Coordenador das Atividades de meio Ambiente do Setor Elétrico. (1994). Referencial para Ornamentação dos Programas Socioambientais, MME, Rio de Janeiro.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. (2000). “Anuário Mineral de 2005”. Brasília,.

DNP - Departamento Nacional de Produção Mineral. (2000). “Anuário Mineral de 2000”. Brasília, 2000.

DERMAUT, J., GEERAERT, B. E. A. (2005). A Better Understanding of Greenhouse gas Emissions for Different Energy Vectors and Applications. World Energy Council: Brussels.

ESTUDO STERN: Aspectos Económicos das Alterações Climáticas, Resumo Executivo Disponível em : <http://www.hm-treasury.gov.uk/d/stern_longsummary_portuguese.pdf>

EPIA – European Photovoltaic Industry Association. (2008) “Solar generation V”.

ExternE - Externalities of Energy. (2005) Methodology 2005 Update. Edited by Peter Bickel and Rainer Friedrich. Institut für Energiewirtschaft und Rationelle Energieanwendung . IER Universität Stuttgart, Germany.

IEA PVPS – International Energy Agency Photovoltaic Power Systems Programme, “Promotional Drivers for grid-Connected PV”. March, 2009.

IEA – International Energy Agency, (2008). “Coal information”, OECD. Paris.

IEA – International Energy Agency, (2008). “Energy Technology Perspectives”. OECD, Paris,

IEA – International Energy Agency, (2009). “Key World Energy Statistic”. Paris.

IEI - International Energy Initiative. (2009). Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica no Brasil: Panorama da Atual Legislação. Campinas.

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. (1995) “Second Assessment Report : Climate Change”

IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change. (1996). “Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories”.

LORA, E. E. S. (2002). Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte. 2ª edição, Editora Interciência.

MME/EPE (2006). Plano Decenal de Expansão de Energia Elétrica 2006-2015. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br>>.

MME/EPE (2007). Plano Nacional de Energia 2030. Brasília.

MME/ELETREBRÁS/COMASE. “Referencial para Orçamentação dos Programas Socioambientais. Vol. II – Usinas Termelétricas”.

MME/EPE (2008) Balanço Energético Nacional - BEN 2008 - Ano base 2007. Brasília.

RÜTHER, R. (2004). “Edifícios Solares Fotovoltaicos”. Florianópolis.

REUTERS. (2009) “Oferta de RCEs & previsões de preço para 2012”. Disponível em: <http://www.carbonobrasil.com/#analise_financeira/noticia=722790>.

RODRIGUES, C.R.C. (2002). “Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na Geração Distribuída: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados a Rede”. Dissertação de mestrado, Campinas.

STERN - Stern Review on the Economics of Climate Change. (2006). Disponível em: <http://www.hm-treasury.gov.uk/sternreview_index.htm>

XAVIER, E. E. (2004). “Termelétricidade no Brasil – Proposta Metodológica para Inventário das Emissões Aéreas e sua Aplicação para o Caso do CO₂”.

SHAYANI, R. A. (2006) “Medição do rendimento global de um sistema fotovoltaico isolado utilizando módulos de 32 células”. Brasília.

CARLOS, R. C. R. (2002). “Mecanismos Regulatórios, Tarifários e Econômicos na geração Distribuída: O Caso dos Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede.” Campinas.

WORLD COAL - Disponível em: <<http://www.worldcoal.org>>.

WCI – World Coal Institute. <<http://www.wci-coal.com>>.

