PAULO MARCOS PUTERMAN

RENOVÁVEL E ARMAZENADA: POSSÍVEL CONTRIBUIÇÃO DA ENERGIA SOLAR PARA A MANUTENÇÃO DA SUSTENTABILIDADE E SEGURANÇA DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interunidades em Biotecnologia USP/Instituto Butantan IPT, para obtenção do Título de Doutor em Biotecnologia.

São Paulo
2013

PAULO MARCOS PUTERMAN

RENOVÁVEL E ARMAZENADA: POSSÍVEL CONTRIBUIÇÃO DA ENERGIA SOLAR PARA A MANUTENÇÃO DA SUSTENTABILIDADE E SEGURANÇA DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação Interunidades em Biotecnologia USP/Instituto Butantan IPT, para obtenção do Título de Doutor em Biotecnologia.

Área de concentração: Biotecnologia

Orientador: Prof. Dr. Marcos Kisil

Versão original

São Paulo
2013

DADOS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
Serviço de Biblioteca e Informação Biomédica do
Instituto de Ciências Biomédicas da Universidade de São Paulo

© reprodução total

Puterman, Paulo Marcos.
Renovável e armazenada: possível contribuição da energia solar para a manutenção da sustentabilidade e segurança da matriz energética brasileira / Paulo Marcos Puterman. -- São Paulo, 2013.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Kisil.

Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo. Instituto de Ciências Biomédicas. Programa de Pós-Graduação Interunidades em Biotecnologia USP/IPT/Instituto Butantan. Área de concentração: Biotecnologia. Linha de pesquisa: Bioenergia.

Versão do título para o inglês: Storable and renewable: possible contribuition of the solar energy to the sustainability of the brazilian electricity supply system.

1. Bioenergia 2. Energia solar 3. Renovável 4. Sustentabilidade I. Kisil, Prof. Dr. Marcos II. Universidade de São Paulo. Instituto de Ciências Biomédicas. Programa de Pós-Graduação Interunidades em Biotecnologia USP/IPT/Instituto Butantan III. Título.

ICB/SBIB091/2013

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Programa de Pós-Graduação Interunidades em Biotecnologia
Universidade de São Paulo, Instituto Butantan, Instituto de Pesquisas Tecnológicas

---

Candidato(a): Paulo Marcos Puterman.

Título da Tese: Renovável e armazenada: possível contribuição da energia solar para a manutenção da sustentabilidade e segurança da matriz energética brasileira.

Orientador(a): Prof. Dr. Marcos Kisil.

A Comissão Julgadora dos trabalhos de Defesa da Tese de Doutorado, em sessão pública realizada a ...../...../....., considerou

( ) Aprovado(a) **( ) Reprovado(a)**

Examinador(a): Assinatura: .....
Nome: .....
Instituição: .....

Examinador(a): Assinatura: .....
Nome: .....
Instituição: .....

Examinador(a): Assinatura: .....
Nome: .....
Instituição: .....

Examinador(a): Assinatura: .....
Nome: .....
Instituição: .....

Presidente: Assinatura: .....
Nome: .....
Instituição: .....

PARA MINHA MÃE

RESUMO

PUTERMAN, P. M. **Renovável e armazenada**: possível contribuição da energia solar para a manutenção da sustentabilidade e segurança da matriz energética brasileira. 2013. 100 f. Tese (Doutorado em Biotecnologia) - Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

Tendo por base o conceito de Energia Renovável e Armazenada, este trabalho realiza a comparação entre a eficiência de conversão da irradiação solar fotovoltaica e a fotossintética em Energia Elétrica através da análise do ciclo de vida energético (ACVE) e de sua expressão em empreendimentos implantados. Esta análise envolveu um exame aprofundado dos recursos (tecnologia, implantação, estrutura financeira e operativa, utilização de recursos hídricos e alocação de resíduos, além de aspectos da produção de alimentos e aquecimento global) envolvidos em todas as etapas do ciclo de vida dos empreendimentos. Isso se fazia necessário porque as eficiências propaladas em proposições acadêmicas ou comerciais tendiam a ser parciais, não dando conta da efetiva energia líquida gerada. A apuração da energia líquida gerada enfatiza a necessidade de fomento às cadeias de suprimento, incentivando conteúdo local por meio de intervenção regulatória sugerida. Tal intervenção busca identificar e favorecer uma tecnologia de conversão de irradiação solar e, assim procedendo, agregar segurança à matriz energética do Brasil, aumentando sua capacidade de armazenamento sustentável de energia.

Palavras-chave: Bioenergia. Energia solar. Renovável. Sustentabilidade.

ABSTRACT

PUTERMAN, P. M. **Storable and renewable**: possible contribution of the solar energy to the sustainability and energy security of the brazilian electricity supply system. 2013. 100 p. Ph. D. thesis (Biotechnology) - Instituto de Ciências Biomédicas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

Based on the concept of Renewable and Stored Energy, this paper performs a comparison between the efficiency of photovoltaic and photosynthetic solar electricity conversion by examining the life cycle energy analysis (ACVE) and its expression in projects deployed. This analysis involved a detailed examination of the resources (technology, deployment, operational and financial structure, water use and allocation of waste, as well as aspects of food production and global warming) involved in all stages of the life cycle of the projects. This was necessary because the efficiencies verified in academic and/or business propositions tended to be partial, not realizing the effective net energy generated. The calculation of net energy generated emphasizes the need for fostering supply chains by encouraging local content through regulatory intervention suggested. This intervention seeks to identify and promote a technology of converting solar radiation and, in so doing, add security to Brazil's energy matrix, increasing its storage capacity in terms of sustainable energy.

Keywords: Bioenergy. Solar Energy. Renewable Energy. Sustainability.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Mix de combustíveis no segmento de eletricidade no mundo.....10
Figura 1.2 - Características do Parque Hidráulico Brasileiro.....12
Figura 1.3 - Evolução da Capacidade Instalada do SIN.....13
Figura 1.4 - Evolução na emissão de Gases do Efeito Estufa.....14
Figura 1.5 - Capacidade Instalada Eólica no Brasil.....15
Figura 1.6 - Preços dos leilões para energia a partir de Biomassa.....16
Figura 1.7 - Perfil de Produção de Energia Eólica.....16
Figura 3.1 - Escopo de um ACV para o segmento de geração de eletricidade renovável.....26
Figura 3.2 - Escopo de um ACVE para o segmento de eletricidade renovável.....27
Figura 4.1 - Evolução Projeto Sunshine no Japão.....31
Figura 4.2 - Crescimento do número de instalações solares na Alemanha.....32
Figura 4.3 - Escopo de um ACVE para o segmento de eletricidade fotovoltaica.....40
Figura 4.4 - Terreno da usina de Tauá.....41
Figura 4.5 - Estimativa de diesel utilizado nas duas operações.....42
Figura 4.6 - Principais componentes da usina de Tauá.....43
Figura 4.7 - Energia para produção de módulo fotovoltaico policristalino.....44
Figura 5.1 - Usinas Termoelétricas a biomassa em operação e potência instalada por Estado.....49
Figura 5.2 - Produção e produtividade da indústria canavieira no Brasil.....50
Figura 5.3 - Evolução do Autoconsumo e da Exportação de Bioeletricidade.....51
Figura 5.4 - Evolução da exportação de energia elétrica do setor sucroalcooleiro na área da CPFL.....52
Figura 5.5 - Benefícios do Proinfa.....**53**
Figura 5.6 - Preços-teto históricos corrigidos pelo IPCA.....54
Figura 5.7 - Materiais, processos e produtos envolvidos na indústria sucroalcooleira.....56
Figura 5.8 - Produção de bioeletricidade.....57
Figura 5.9 – Termoelétrica Pierp.....57
Figura 5.10 - Estágios de ciclo de vida de um sistema fotossintético.....59
Figura 5.11 - Sistema de Geração Termoelétrica movida a bagaço de cana.....60
Figura 5.12 - Componentes da termoelétrica Pierp.....61
Figura 5.13 - Componentes industriais.....62
Figura 5.14 - Transporte dos componentes industriais.....63
Figura 5.15 - Montagem dos componentes industriais.....63
Figura 6.1 - Índice de insolação na Terra.....66
Figura 6.2 - Sistema de Geração Termoelétrica movida a bagaço de cana.....69
Figura 6.3 - Ciclo de Vida de Tauá.....71
Figura 6.4 - Ciclo de Vida da PIERP.....72
Figura 7.1 - Risco de insegurança energética no curto prazo.....79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABEEólica	Associação Brasileira de Energia Eólica
BEN	Balanço Energético Nacional
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CDE	Conta de Desenvolvimento Energético
COGEN	Associação da Indústria de Cogeração de Energia
CO^2	Dióxido de Carbono
ECE	Encargo de Capacidade Emergencial
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EREC	European Renewable Energy Council
GEE	Gases de Efeito Estufa
GWEC	Global Wind Energy Council
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organization for Standardization
MME	Ministério de Minas e Energia
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
ONU	Organização das Nações Unidas
PCH	Pequena Central Hidroelétrica
PCT	Pequena Central Térmica (com uso de biomassa)
PIB	Produto Interno Bruto
PLD	Preço de Liquidação de Diferenças
PROINFA	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e de Custódia – Banco Central do Brasil
SIN	Sistema Interligado Nacional
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
TUST	Tarifa de Uso do Sistema de Transmissão
UNICA	União da Indústria de Cana-de-Açúcar

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - ENERGIA RENOVÁVEL ARMAZENADA X ENERGIA RENOVÁVEL: SUSTENTABILIDADE E SEGURANÇA DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA 10
CAPÍTULO 2 - CONVERSÃO FOTOSSINTÉTICA X FOTOVOLTAICA 18
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA PARA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO (ACVE) EM PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE 23
CAPÍTULO 4 - EFICIÊNCIA NA CONVERSÃO DE IRRADIAÇÃO SOLAR EM ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA: ACVE TAUÁ 30
CAPÍTULO 5 - EFICIÊNCIA NA CONVERSÃO DE IRRADIAÇÃO SOLAR EM ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA TECNOLOGIA FOTOSSINTÉTICA (COMBUSTÃO DIRETA): ACVE PIERP 49
CAPÍTULO 6 - COMPARAÇÃO ENTRE EFICIÊNCIA NA CONVERSÃO DE IRRADIAÇÃO SOLAR EM ENERGIA ELÉTRICA NAS TECNOLOGIAS FOTOVOLTÁICA E FOTOSSINTÉTICA (COMBUSTÃO DIRETA) COM BASE NOS DADOS DOS ACVES 66
CAPÍTULO 7 - CONCLUSÃO: SUSTENTABILIDADE E SEGURANÇA ENERGÉTICA.....77
REFERÊNCIAS.....83
ANEXO - Proposta de resolução para a ANEEL: identificação de vantagem para o país na realização de análise do ciclo de vida energético para geração de energia solar fotossintética.....93

CAPÍTULO 1 – ENERGIA RENOVÁVEL ARMAZENADA X ENERGIA RENOVÁVEL: SUSTENTABILIDADE E SEGURANÇA DA MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

A capacidade instalada de geração de eletricidade (potência fiscalizada) no Brasil, em agosto de 2012, era de 119.069 MW (ANEEL, 2012). Desse total, 83.078 MW se referiam à geração hidráulica, 32.343 MW à térmica, 2.007 MW à nuclear e 1.638 MW à eólica (ANEEL, 2012). A predominância da Geração Hidrelétrica no Brasil era uma exceção no quadro mundial. Na média mundial, a hidreletricidade participava com 14%, enquanto carvão (42%), gás natural (21%), óleo (5%), nuclear (14%), solar/eólica/biomassa (3%) completavam o mix (IEA, 2010). Neste contexto comparativo, a IEA (International Energy Agency) tratava (IEA, 2010) a água como combustível (*fuel)*.

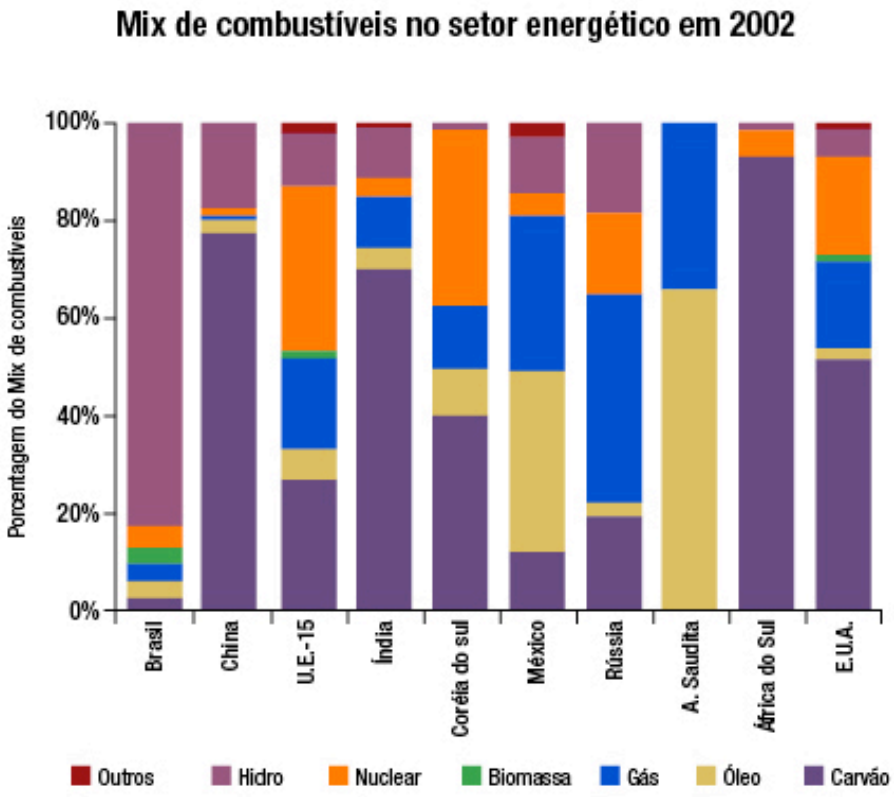


Figura 1.1 - Mix de combustíveis no segmento de eletricidade no mundo
Fonte: WRI (2002)

Combustível é o melhor conceito disponível para uma representação clara da natureza potencial da energia armazenada num determinado sistema (MAHESH,

2009). Ao compararmos as diversas formas de produção de energia a partir de seu combustível (água e vento incluídos), podemos comparar sua sustentabilidade. Segundo dados de 2002 publicados em 2004 (IEA, 2010) para os países emergentes conhecidos como BRIC, China e Índia se destacavam pela geração concentrada em carvão em função de suas reservas naturais. Já a Rússia, pelo mesmo motivo, se destacava na produção de eletricidade baseada em gás natural. Assim como a preponderância do uso do carvão na China e Índia e do gás na Rússia se dava em função de uma disponibilidade local, a presença preponderante da Hidreletricidade na Matriz Energética Brasileira era consequência também da disponibilidade de recursos hídricos no Brasil (locais).

A água, enquanto combustível, no entanto, apresentava um grande diferencial em relação aos demais. Além de ser armazenável (como de certa forma o são carvão e gás), ela era renovável, não estando, portanto, sujeita a uma disponibilidade característica de reserva natural, que tende a se esgotar impactando a segurança energética de um sistema. Assim, o que diferenciava o mix de combustíveis brasileiro não era apenas sua condição preponderantemente renovável, mas principalmente sua condição Renovável e Armazenada.

O objetivo deste trabalho é apresentar argumentos que colocam a geração de eletricidade a partir de biomassa como Solar, Renovável e Armazenada, portanto alinhada com as características existentes na hidreletricidade. Este objetivo pretende colaborar no encaminhamento de investimentos e políticas públicas, orientação esta exemplificada pela proposta de resolução anexada.

A predominância da matriz Renovável e Armazenada sempre foi muito cara ao planejamento energético brasileiro. Como garantir para o futuro a permanência e sustentabilidade desta condição? Esta preocupação esteve presente no discurso e na prática da Empresa de Pesquisas Energéticas (CERPCH, 2012). Tendo por base uma previsão de crescimento da economia a taxas de 4,7% a.a. e uma evolução no PIB/per capita à razão de 3,9% a.a. (EPE, 2011), a Empresa de Pesquisas Energéticas (ANEEL, 2012) Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2012) em 2010 previa que o consumo de eletricidade cresceria 60% até 2020 (ONS, 2011). Diante deste quadro o Brasil iria precisar aumentar sua capacidade de geração. O aumento no consumo adivinhava problemas na segurança energética do país, principalmente porque em 2011 o armazenamento de energia hidrelétrica era decrescente, pois os novos aproveitamentos hidráulicos, em função de limitações ligadas principalmente

ao licenciamento ambiental de empreendimentos, trabalhavam com reservatórios cada vez menores (ONS, 2011).

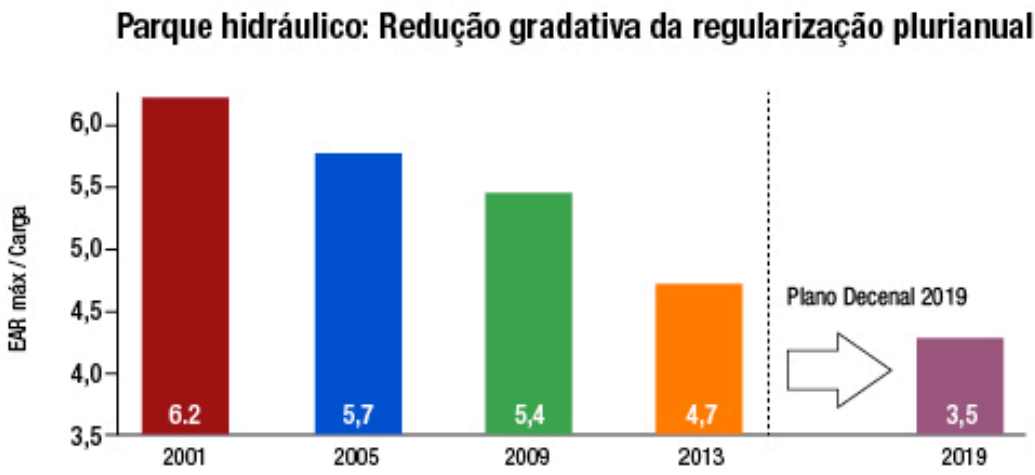


Figura 1.2 - Características do Parque Hidráulico Brasileiro
Fonte: ONS (2011)

Esta tendência apontava para uma redução de 50% na efetiva capacidade de armazenamento de energia hidrelétrica no Brasil para o período de 2001 a 2019, aumentando bastante o risco de desabastecimento em caso de desvios na pluviometria. Esse risco viria a ser diminuído com a contratação de outras fontes dentro do período. Assim, a diminuição na Energia Armazenada Hidrelétrica poderia obrigar o país a planejar um aumento na capacidade de geração e armazenagem de energia elétrica proveniente de outros combustíveis fósseis, provavelmente aumentando a intensidade de carbono na Matriz Energética (ONS, 2011).

Evolução da Capacidade Instalada do SIN

	2010		2015		Crescimento 2010-2015	
Hidráulica	85.690	79,3%	98.035	71,0%	12.345	14%
Nuclear	2.007	1,9%	2.007	1,5%	-	0,0%
Gas/GNL	9.263	8,6%	12.180	8,9%	2.917	32%
Carvão	1.415	1,3%	3.205	2,3%	1.790	127%
Biomassa	4.577	4,2%	7.272	5,3%	2.695	59%
Óleo	4.212	3,9%	9.913	7,3%	5.701	135%
Eólica	826	0,8%	5.248	3,8%	4.422	535%
Total	107.990	100%	137,860	100%	29.879	28%

Figura 1.3 - Evolução da Capacidade Instalada do SIN
Fonte: ONS (2011)

Assim, enquanto o Organizador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2009) apontava um crescimento de 14% na capacidade dos aproveitamentos hidrelétricos do Brasil entre 2010 e 2015 (ONS, 2011), as Fontes fósseis como carvão, óleo e gás apresentavam uma perspectiva de crescimento de 127%, 135% e 32% respectivamente (ONS, 2011). Vale a pena ressaltar que restrições poderiam vir a ocorrer em função do potencial de geração de gases do efeito estufa desses combustíveis, principalmente no que se refere a carvão e óleo. Esses dados reforçam a constatação da mudança na qualidade da energia armazenada no Brasil pela ONS (de renovável para não renovável), motivada pela diminuição no ritmo de expansão dos reservatórios hidrelétricos. Este aumento obviamente se refletiria na previsão de duplicação das emissões de gases do efeito estufa pelo sistema elétrico brasileiro em função da maior utilização de combustíveis não renováveis como carvão, óleo e gás. A título de comparação, é interessante verificar as emissões resultantes da geração hidrelétrica, apesar de o Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação considerá-la neutras (RIBEIRO, 2009).

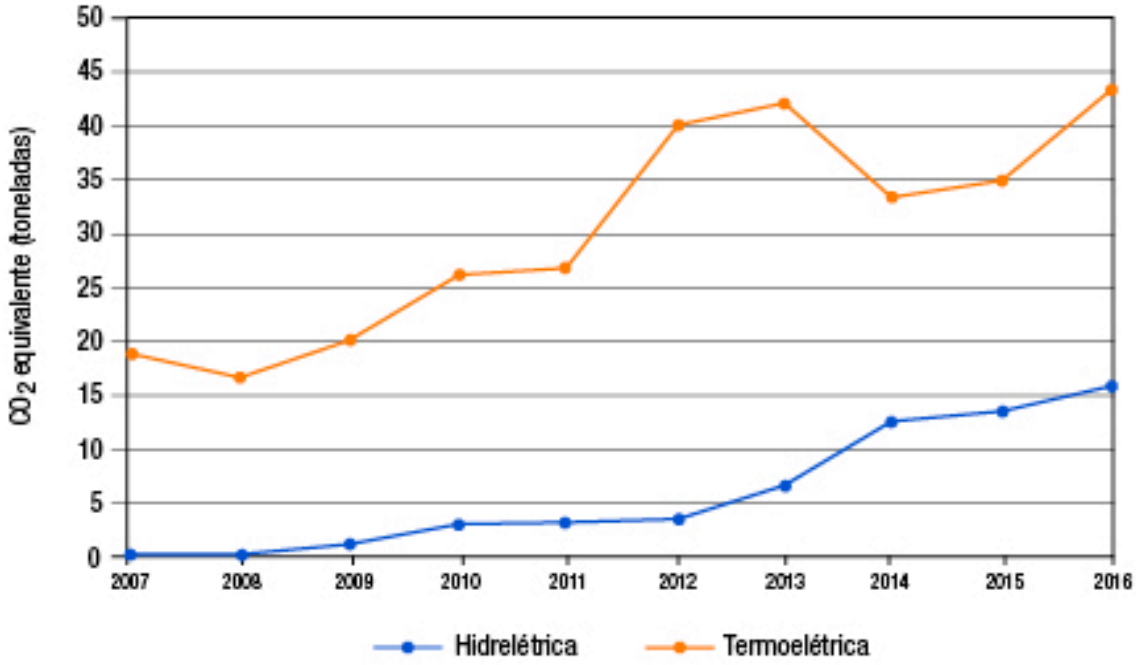


Figura 1.4 - Evolução na emissão de Gases do Efeito Estufa
Fonte: Ribeiro (2009)

Assim, o possível aumento na emissão de CO2 pela matriz energética brasileira decorrente da utilização mais intensiva de combustíveis fósseis apresentava uma estreita relação com a diminuição na capacidade de armazenagem de energia hidrelétrica prevista, como ilustra a figura acima para o período entre 2007 e 2016. Numa tentativa de atenuar este quadro de aumento de emissões, a energia eólica compareceria com um crescimento de 535% (ONS, 2011). Algumas alternativas de se armazenar energia elétrica proveniente de energia eólica haviam sido testadas, sem, no entanto, se mostrarem eficazes (IBRAHIM; ILINCA; PERRON, 2008).

Apesar de renovável, fontes como eólica (por exemplo) não possuíam condição armazenável como a hidrelétrica. Este ônus não viria a impedir o crescimento de sua presença na matriz. Os leilões de 2009, 2010 e 2011 contrataram 5.813 MW de potência Eólica instalada, representando um crescimento na participação total de 1,4 para 7,2% em 2015 (ABEEólica, 2011).

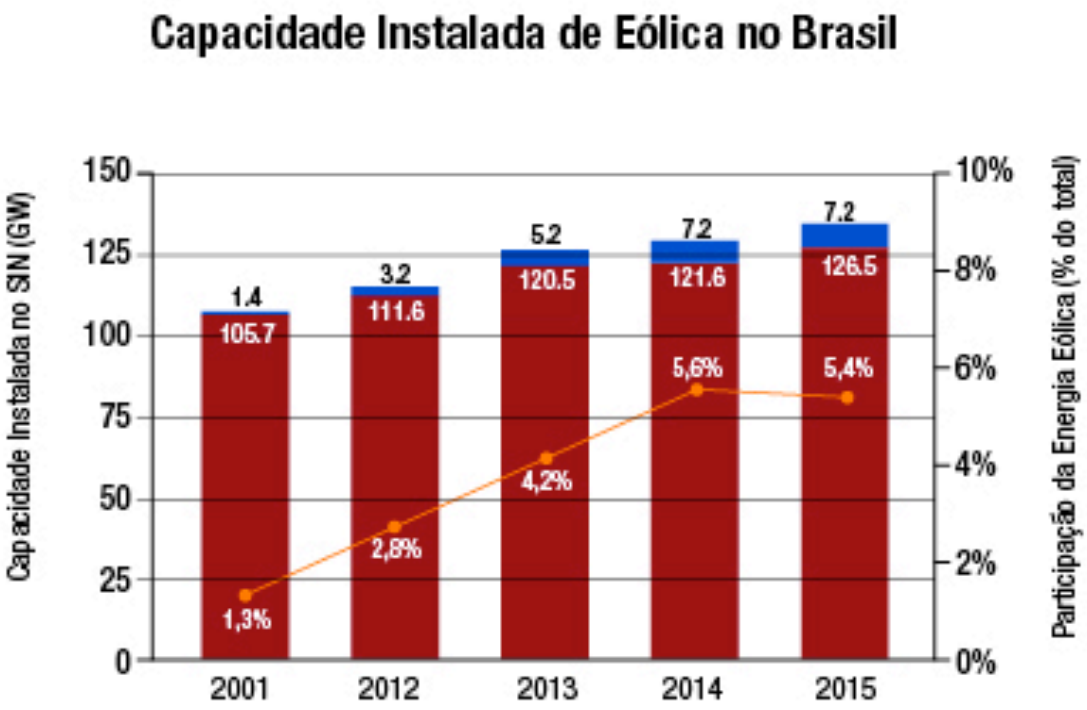


Figura 1.5 - Capacidade Instalada Eólica no Brasil
Fonte: ABEEólica (2011)

A previsão de aumento de 59% da produção de energia elétrica à base de biomassa prevista para o período (ONS, 2011) auxiliaria na manutenção da matriz renovável armazenada (o bagaço possui certa armazenabilidade de que a energia eólica não dispõe). Segundo a COGEN (Associação da Indústria de Cogeração de Energia) e a Unica (União da Indústria de Cana-de-Açúcar), existia no período um potencial de se atingir 15 GW de capacidade instalada para geração de Energia Elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar até 2020. Ainda segundo essas entidades, isso justificaria um incremento maior do que aquele previsto pelo planejamento da EPE. Objetivamente, no entanto, os preços obtidos nos leilões de 2010 e 2011 (EXCELÊNCIA, 2012) inviabilizariam a realização desse potencial.

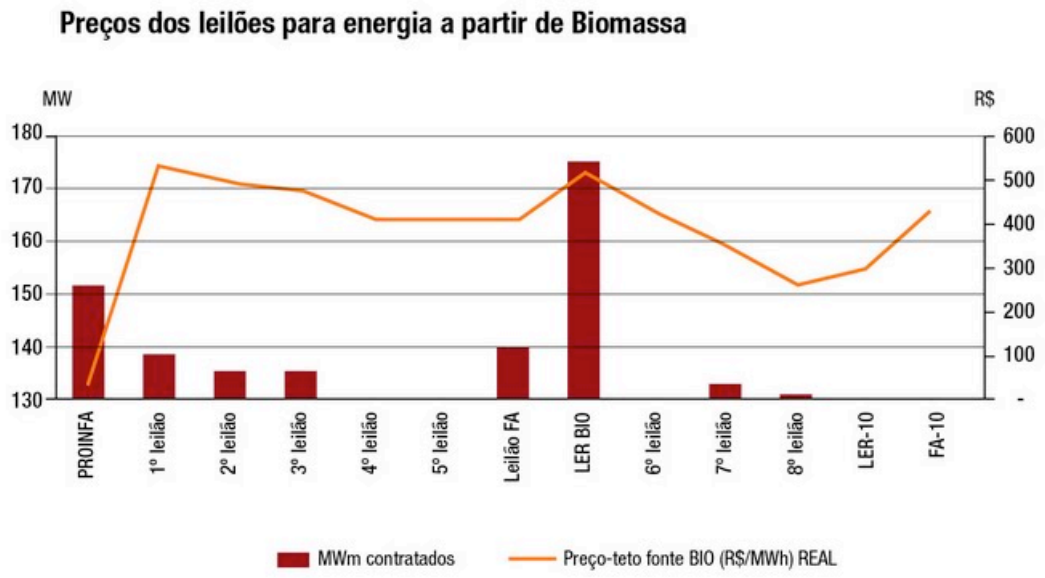


Figura 1.6 - Preços dos leilões para energia a partir de Biomassa
Fonte: EXCELÊNCIA (2012)

Quando vista de forma complementar à energia Armazenável Renovável proveniente da Hidreletricidade, a geração a partir do bagaço ampliaria o potencial da matriz original (UNICA, 2012). Apesar de precária, a armazenabilidade da Energia a partir do bagaço poderia vir a mitigar muitos dos riscos verificados na produção de energia eólica, por exemplo (POTOCNIK, 2007). Por sua característica intermitente, a Geração Eólica trazia em sua gênese uma complementaridade obrigatória com outras fontes (POTOCNIK,2007).

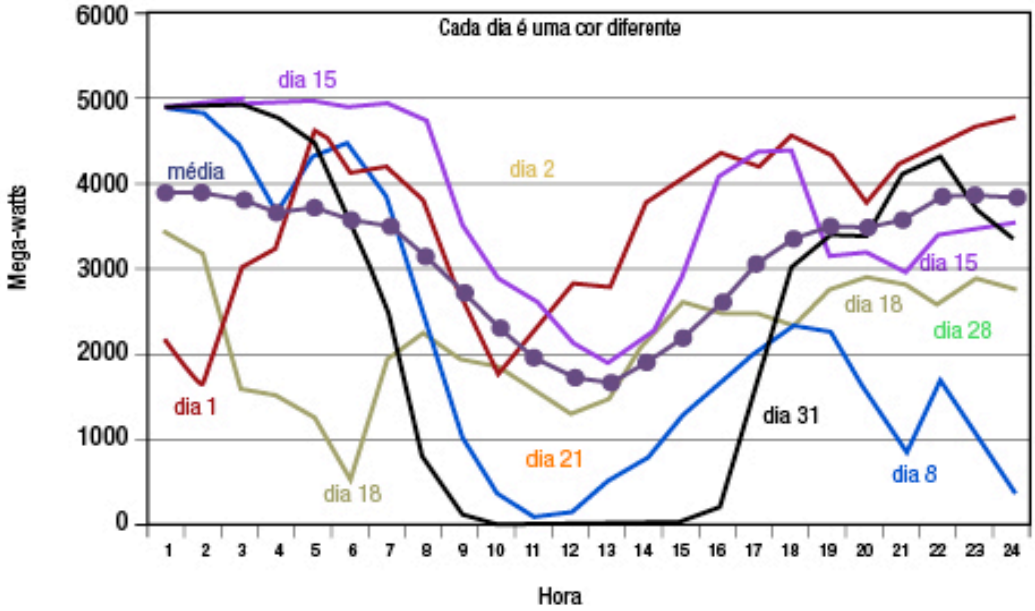


Figura 1.7 - Perfil de produção de Energia Eólica
Fonte: Potočnik (2007)

A figura revela que numa mesma hora do dia (em dias diferentes) a energia eólica podia apresentar perfis de geração muito distintos, trazendo problemas para o sistema e toda a cadeia de valor do segmento. Esta variação na disponibilidade estava longe do ideal e era essencialmente diferente daquela existente a partir de um sistema renovável que trabalhava baseado em energia armazenada como a hidreletricidade, por exemplo. Como vimos, no planejamento regulatório o crescimento do parque de geração no Brasil, decorrente do aumento da demanda, não se daria com o correspondente incremento da sua capacidade de armazenar energia renovável, mesmo aquelas não provenientes de fonte hidráulica (ONS, 2011).

Resumindo, o crescimento projetado da oferta de geração de energia renovável no Brasil nos anos seguintes a 2011 revelava uma mudança radical em suas características. Se o parque hidrelétrico original da matriz privilegiava a energia armazenada renovável e a segurança energética, o novo desenho que incluía hidrelétrica com menor capacidade de armazenamento, eólicas (energia não armazenável) e combustíveis fósseis (carvão, gás e óleo) apontava para uma dependência cada vez maior destes como elemento regulador e garantidor de energia armazenada do sistema, impactando a segurança energética.

Além do ganho de escala em Geração Eólica, outro fator poderia contribuir para a diminuição da energia armazenada disponível e da segurança: a Geração Fotovoltaica, que (na visão do regulador) seria o próximo alvo de expansão do parque gerador (TOLMASQUIN, 2012).

No próximo capítulo, apresentaremos o histórico da geração de energia solar fotovoltaica no Brasil, suas perspectivas a partir do que estava sendo planejado em 2011 e uma visão complementar que introduz a Energia Fotossintética (biomassa) como também Energia Solar.

CAPÍTULO 2 – CONVERSÃO FOTOSSINTÉTICA X FOTOVOLTAICA

Vimos no capítulo anterior que o planejamento da oferta de energia para o Brasil previa uma mudança significativa na quantidade de energia armazenada de sua matriz (ONS, 2011). Esta mudança apresentava ameaças, do ponto de vista da segurança energética, que não seriam mitigadas pela introdução de processos renováveis como o eólico, pedindo medidas complementares no que diz respeito à armazenagem de energia.

O alinhamento da Geração de Eletricidade a partir de Biomassa à condição renovável e armazenada, característica da hidreletricidade, sugere esta complementaridade, norteia este capítulo e o restante deste trabalho também.

Como dito, apesar de renovado, o interesse pela energia solar no Brasil pedia um exame mais aprofundado em relação às suas possibilidades de conversão e armazenagem.

Partindo da premissa de que a Energia Solar está disponível de forma perene, a questão que se coloca é como coletar, armazenar e distribuir este recurso utilizando-se procedimentos sustentáveis.

A luz do sol por si só é um recurso farto e abundante. O planeta acolhe aproximadamente 1 bilhão de TWh (1 TW = 10^{12} W) a cada hora, todos os dias, já há milhões de anos (FOUKAL, 1990). É um recurso previsível e confiável na cronologia de qualquer definição de sustentabilidade[1].

O Brasil tem 1,5% da área da Terra, o que lhe dá um potencial de absorção de carga de 1,5 milhão de TWh (CIA, 2012). Em 2011, uma capacidade instalada de 110 GW com um fator de capacidade de 50% atendia todas as necessidades de consumo do Brasil (EPE, 2010). Logo, teoricamente (desde que a eficiência da conversão de energia solar em elétrica fosse de 100%), se utilizássemos 0,027% do território nacional, teríamos condições de atender todas as nossas necessidades no que se referia à eletricidade, apenas com Energia Solar (como veremos mais adiante, o número era 100 vezes maior, mais próximo de 2%, em função da eficiência na conversão...).

---

[1] "Desenvolvimento Sustentável atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem suas próprias

A mesma disponibilidade se verificava para o resto do planeta cujo consumo em 2011 estava situado na casa dos 131.400 TWh (IEA, 2010). Além do possível atendimento conjuntural, a quantidade de energia disponível excedia em muito as necessidades mundiais planejadas para um futuro próximo (SMIL, 1991). Os números mencionados se referem a uma média e podiam sofrer uma variação em função da distribuição geográfica (LEWIS, 2006).

A Terra toda (oceanos, terra firme etc.) recebe 120 petta watt (SMIL, 2006). Apenas um milésimo desta energia é convertido por fotossíntese (FAO, 2012), e o equivalente a 2% dessa conversão correspondia ao total de eletricidade consumido pelo planeta em 2011 (como vimos) (EIA, 2012). A magnitude desses números podia gerar certa perplexidade: por que diante desta disponibilidade a Geração de Eletricidade a partir de energia solar era incapaz de atender à demanda existente?

Para responder a essa questão, primeiro, neste capítulo, vamos entender os processos tecnológicos de conversão disponíveis para a geração comercial de eletricidade a partir de irradiação solar e suas limitações.

Depois, em capítulos seguintes, ampliaremos este entendimento para a Análise de seu Ciclo de Vida em empreendimentos efetivos. Esta análise compreenderá, de uma forma genérica, todos os custos envolvidos incluindo *equity*, dívida, operações e manutenção, tratamento de resíduos, transmissão, transporte e armazenagem, uso da terra e de recursos hídricos, assim como riscos resultantes do processo industrial e possível interferência nos processos de produção de alimentos e mudanças climáticas.

Dentro do escopo da Análise do Ciclo de Vida, será analisada a eficiência de cada uma das tecnologias de conversão na sua relação com o conjunto de recursos, energéticos e logísticos, de infraestrutura e de serviços ambientais utilizados.

Mas, por ora, voltemos aos processos tecnológicos propriamente ditos.

Por uma questão mercadológica conjuntural, a Energia Solar tinha-se transformado em sinônimo de Energia Fotovoltaica (DIRKSEN, 2012). Do ponto de vista científico e mesmo tecnológico, essa apropriação de significado não fazia muito sentido.

Assim, a partir de um estudo liderado por um professor do MIT (BLANKENSHIP, 2011), que compara Eficiência Fotossintética com Fotovoltaica, adotaremos também o conceito de Conversão Fotossintética como gerador de

eletricidade a partir de energia solar. Este direcionamento será aplicado neste trabalho daqui para frente, numa perspectiva um pouco mais generalista do que aquela adotada no artigo citado. Este entendimento mais macro será precedido, no entanto, de uma visão mais detalhada das duas tecnologias de conversão de energia solar. Assim, vamos nos concentrar nos processos físico-químicos que caracterizam a energia fotoquímica e fotovoltaica como forma de se conhecer como as tecnologias disponíveis realizam a conversão deste potencial em energia elétrica.

Comecemos pela fotossíntese.

Ao longo dos últimos 200 anos, desenvolveu-se uma ciência específica para entender-se aquele que é reconhecido como o principal evento evolucionário: a fotossíntese (MITCH, 2009). Esta ciência tem seu ponto de encontro no International Congress on Photosynthesis, que se realiza a cada 3 anos (MORTON, 2008) e reúne cientistas especializados de várias partes do mundo. São diversas especialidades que se desenvolveram (PS 15, 2012), todas com o objetivo de se entender como organismos transformam CO_2 e água em alimento.

De forma simplificada, a fotossíntese se dá por obra do pigmento da clorofila combinado a mais dezenas de proteínas que se articulam, dando um sentido para a irradiação solar recebida. São dois complexos proteicos (Fotossistema 1 e Fotossistema 2), que se utilizam da água como fonte de elétrons para seus processos de transferência e conversão de energia (OCC, 2012). A irradiação solar (Fótons) aciona um circuito elétrico, no qual os elétrons fluem pelos Fotossistemas através das cadeias de proteína que sintetizam as moléculas enriquecidas de energia ATP e NADPH. Estas moléculas alimentam a síntese de açúcares que os organismos utilizam para crescimento e reprodução (MITCH, 2009).

Do ponto de vista da produção de energia elétrica, esses açúcares podem ser oxidados ou fermentados, gerando calor (ou combustíveis intermediários), que pode ser utilizado na produção de energia elétrica por meio de uma série de processos. O processo mais utilizado é o da oxidação total, através de combustão direta (BURWELL, 1978). Essa combustão é realizada a partir da energia armazenada nas ligações químicas incluídas nas moléculas resultantes. Esta energia é naturalmente armazenada desta forma, para que possa ser utilizada de maneira organizada pelos organismos em sua sustentabilidade e replicação. Enfim, nenhum organismo fotossintetizante utiliza fótons nessas tarefas, mas sim os utiliza para produzir

Energia Armazenada, que será utilizada quando apropriado. Essa habilidade natural torna a Conversão Fotossintética, no conjunto de suas reações, um processo Renovável e Armazenado completo.

E qual seria a quantidade de Energia Armazenada neste processo?

Nos testes de laboratório, o conteúdo energético da fotossíntese é definido pelo calor obtido a partir da combustão total da glicose na obtenção de CO_2 e H_2O. Pode-se comparar esse número com uma medida real (ou estimada) da quantidade de irradiação recebida (área fotossintética x tempo) para se obter um número aproximado de conversão. A bibliografia relata que esse número está normalmente próximo a 1% (BLANKENSHIP, 2011).

Esta glicose, quando disponível para produção de calor, normalmente na forma de massa seca, será inserida em algum processo de produção de eletricidade, sendo o mais comum (como já dito) o de combustão direta, que tem uma eficiência que varia entre 17% e 25% (OREGON, 2012).

Assim, a eficiência do processo fotossintético na conversão de radiação solar em MWh por meio do processo de combustão direta (ou cogeração) varia de 0,17% a 0,25%. Vale lembrar que esse resultado é proveniente de um processo em que a energia foi armazenada e está disponível para uso quando necessário.

Esse processo de Geração é diferente do observado na tecnologia Fotovoltaica.

A produção de energia elétrica a partir da conversão fotovoltaica é realizada sem a mediação da armazenagem, de forma direta. Uma célula solar fotovoltaica é sempre um semicondutor diodo. O material semicondutor absorve os fótons irradiados em quantidade suficiente para que os elétrons saiam da banda de valência para a banda de condução, criando um gradiente de transporte de elétrons. Esse gradiente é uma corrente que precisa ser encaminhada e utilizada de forma imediata, não gerando energia armazenada (SHAH, 1999).

A eficiência desse processo está diretamente ligada ao delta de energia gerado pelo semicondutor, propriedade físico-química do material que o constitui. A carga gerada tem direção devido ao campo elétrico criado pela estrutura física do diodo. Num caso ideal, fótons com energia menor que o delta não gerariam eletricidade nenhuma (sem alteração do estado de valência), enquanto fótons com carga maior que o delta, sim (estado de condução) (SHAH, 1999). No estado de condução,

portanto, o limite para a densidade de corrente passaria a ser o fluxo de fótons com energia maior que o delta de energia gerado pelo semicondutor.

Existe um limite teórico (~1.1 e V) para o qual um máximo de energia pode ser transferido a partir da irradiação incidente. Quando atingido esse limite, teoricamente 50% da energia irradiada podem ser convertidas. Esse limite só é alcançado, no entanto, se perdas óticas (reflexos, sombreamentos etc.) não ocorrerem.

Outros fatores que também têm seu impacto na conversão fotovoltaica são a espessura do semicondutor e o seu material de fabricação (SHAH, 1999).

Numa perspectiva mais comercial, a eficiência da conversão fotovoltaica depende principalmente dos materiais utilizados. Arseneto de gallium (AsGa), fosfito de índio (InP) e Telureto de cádmio (CdTe) são materiais com performance muito boa (acima de 30%), mas custam muito caro. Para o silício cristalino, a eficiência limite foi constatada para 25% (SHAH, 1999) de conversão, numa situação de laboratório.

Para sistemas de larga escala, aceita-se uma eficiência de 18% (+ ou -), 2% considerando-se o silício cristalino. Este valor se refere ao pico de intensidade solar (+ ou - 1 kW/ m^2, como já vimos) (BLAKENSHIP, 2011).

A distinta natureza das eletricidades produzidas, a fotossintética (a partir de energia armazenada em ligações químicas) e a fotovoltaica (diretamente produzida a partir da excitação de semicondutores), implica em graus de eficiência bem diferentes para as duas tecnologias.

O estudo aprofundado de casos reais (que apresentaremos adiante) apontará, no entanto, a medida da sustentabilidade dessas diferenças, trazendo um quadro mais realista que mostrará a dificuldade de se comparar as tecnologias apenas a partir de seus limites teóricos.

No próximo capítulo, será apresentada a metodologia a ser utilizada na realização desta análise.

CAPÍTULO 3 – METODOLOGIA PARA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO (ACVE) EM PROCESSOS DE GERAÇÃO DE ELETRICIDADE

Foi dito anteriormente que a predominância da hidreletricidade proporcionava historicamente um grande diferencial para a matriz energética brasileira em relação à dos demais países (EPE, 2010; IEA, 2010). Passível de armazenagem (assim como carvão, óleo e gás), a hidreletricidade era renovável não estando, portanto, sujeita a uma disponibilidade característica de reserva natural, que tende a se esgotar e impactar a segurança energética de um determinado sistema. Essa condição, renovável e armazenada, estava, no entanto, ameaçada pela redução na capacidade de armazenagem do sistema (ONS, 2011). Tal condição se verificava, contudo, como possibilidade para a geração de eletricidade a partir de biomassa.

Como garantir para o futuro a permanência e a sustentabilidade dessa condição?

Entre outras ideias, em 2011 os agentes do sistema começavam a se voltar para a energia solar fotovoltaica como uma possível alternativa de geração de eletricidade renovável para o Brasil (TOLMASQUIM, 2012).

Foi dito também que, do ponto de vista científico e tecnológico, a energia produzida a partir de biomassa deveria ser considerada energia solar (DIRKSEN, 2012) e que a diferente natureza das tecnologias de geração, a fotossintética (a partir de energia armazenada em ligações químicas) e a fotovoltaica (diretamente produzida a partir da excitação de semicondutores), oferecia possibilidades distintas a partir de uma mesma origem: a irradiação solar.

Como comparar essas tecnologias? Que metodologia se apresentava como a mais adequada?

Esta adequação estava intimamente ligada à inserção do conceito de sustentabilidade na metodologia a ser adotada. O conceito de sustentabilidade ganhou um reforço de sentido quando, em 1983, a Organização das Nações Unidas instituiu a Comissão Mundial sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, que foi responsável, em 1987, pela publicação do documento conhecido como Relatório Brundtland (OUR COMMON FUTURE, 1987). Esse relatório propunha a seguinte definição de Desenvolvimento Sustentável: “Desenvolvimento Sustentável atende às

necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem suas próprias necessidades" (ONU, 1987).

Assim, quando referida a energia enquanto necessidade humana essencial, a definição desenvolvimento sustentável, sustentabilidade, apontava para o fomento das energias renováveis, as únicas capazes de não comprometer a capacidade das gerações futuras de atenderem suas próprias necessidades (ONU, 1987).

A categoria Energia Renovável se aplicava a diferentes processos de geração de eletricidade. Estas se apresentavam como tecnologias mais responsáveis e menos extrativistas, proporcionando uma melhor relação com o meio ambiente (POTOČNIK, 2007).

Estas premissas davam o contorno e a lógica da opção pelo investimento em tecnologias de conversão fotossintética e fotovoltaica também. Condizentes com o conceito de Desenvolvimento Sustentável, elas tinham o potencial de atendimento das necessidades presentes com garantia de manutenção dos recursos para o futuro. Nesta perspectiva, a avaliação das ações que garantiriam um desenvolvimento sustentável precisaria obrigatoriamente de uma Análise de seu Ciclo de Vida, pois somente desta forma se poderia chegar à conclusão se a utilização de tal ou qual recurso atenderia às necessidades do presente sem comprometer a performance destes recursos no futuro.

Mas como a Análise do Ciclo de Vida neste contexto poderia se valer das premissas de sustentabilidade?

A metodologia de Análise do Ciclo de Vida apareceu na década de 70 como uma resposta às preocupações da sociedade no que diz respeito ao esgotamento dos recursos naturais e à degradação do meio ambiente. Naquele momento, a performance ambiental de produtos e processos passou a fazer parte da preocupação de vários segmentos, principalmente agentes reguladores (WEC, 2004).

Mas foi somente em 2006, com a publicação da norma "Gestão Ambiental – ACV –Princípios e Metodologia", ISO 14.040/2006 (ISO 14.040, 2006), que a metodologia ganharia um escopo reconhecido.

A ISO referida buscava uma análise mais objetiva, contando com instruções e parâmetros para a avaliação de impactos os mais variados de forma precisa (ISO, 2006). A norma definia quatro etapas para a estruturação das ACVs:

Na etapa 1, definia-se o objetivo do estudo e sua abrangência. Aqui seria estabelecida a visão do sistema, limites, parâmetros, funções, alocações, requisitos dos dados e hipóteses de limitações (ISO 14.040, 2006) (ISO, 2006). Na segunda etapa, previa-se a coleta dos dados propriamente dita, seguida da análise do repertório inventariado. Equações, agrupamentos e critérios para estes dados são definidos nesta etapa. A terceira etapa concentraria a visão dos impactos e a quarta englobaria as anteriores, pois se responsabilizaria pela interpretação dos dados. Possíveis hipóteses seriam ajustadas e se prepararam bases equivalentes para uma comparação entre as tecnologias.

A norma da ISO não apresentava nenhuma especificidade em relação às tecnologias de geração de Eletricidade no geral e, menos ainda, em relação aos aspectos particulares das tecnologias fotossintética e fotovoltaicas.

O protocolo buscava normatizar as Análises de Ciclo de Vida de uma forma geral e trazer a identificação de oportunidades de otimização dos sistemas, no que diz respeito às suas relações com o meio ambiente nos vários momentos do ciclo de vida de uma determinada implantação. Esses processos facilitariam na tomada de decisão nos diversos níveis de *stakeholders* (*equity*, dívida, reguladores etc.) e na definição clara das responsabilidades (ISO, 2006).

A norma considerava também que não seria possível se fazer uma análise desta natureza sem um detalhamento do tipo "*cradle-to-grave/cradle-to-cradle*" (MCDONOUGH; BRAUMGART, 2002), em que os impactos (ambientais, sociais, econômicos etc.) não ficassem devidamente esclarecidos. A análise deveria partir de um entendimento dos insumos envolvidos, fechando o ciclo com o entendimento de como se daria a desativação e o descarte (ou reciclagem) dos materiais que constituíram o ativo.

Essas etapas se dariam sempre com uma visão de balanço, cuja perspectiva é corretamente visualizada na figura abaixo.

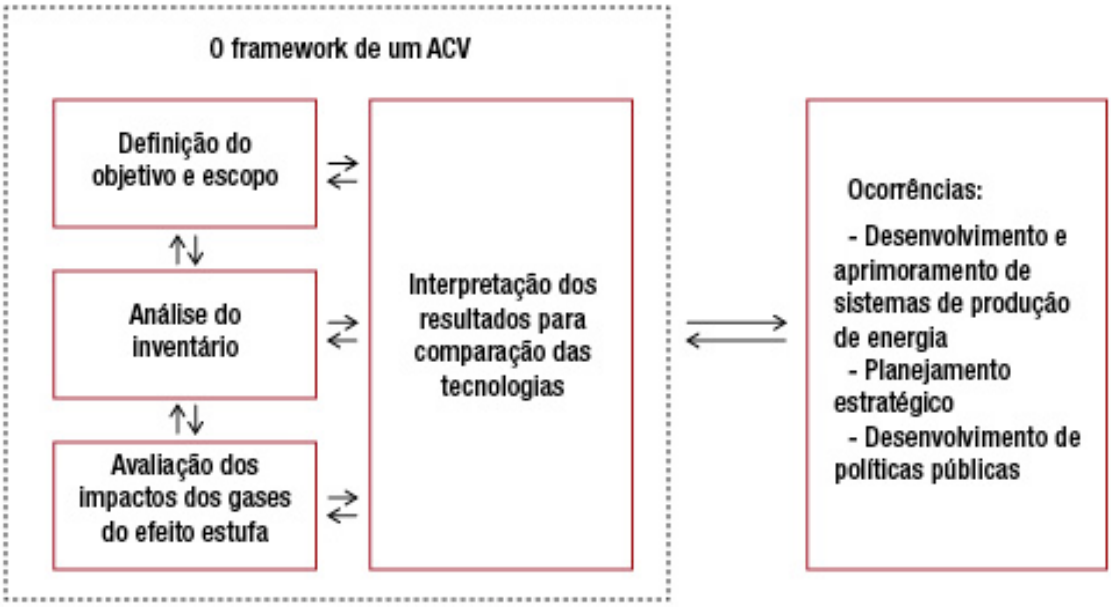


Figura 3.1 - Escopo de um ACV para o segmento de geração de eletricidade renovável
Fonte: Adaptado de ISO, 2006

A partir de uma visão genérica, como desenvolver um Escopo mais específico para a questão energética?

O conceito de Análise do Ciclo de Vida Energético (ACVE) apareceu então como uma possibilidade, uma especialização do conceito original – Análise do Ciclo de vida (HANNON, 1978), e é a metodologia escolhida aqui para dar conta da desejável comparação entre as duas formas de conversão (fotossintética e fotovoltaica).

Essa metodologia procurava restringir as moedas de análise a um denominador comum representado por alguma unidade de energia (BTU, Joules etc.), garantindo a objetividade na comparação (HANNON, 1978).

Para os propósitos deste trabalho, daqui para frente optar-se-á pela unidade MWh para a realização do balanço final dos ACVEs, por se tratar da medida comercial de quantificação dos processos energéticos.

Mas como fica a avaliação de outros impactos? Impacto ambiental, por exemplo? Eles serão avaliados sempre por meio do resultante delta energético (MWHs). Todas as avaliações necessárias para verificação da sustentabilidade de uma determinada tecnologia (nos ACVEs) partem da premissa de que sua viabilidade impacta o balanço energético. Assim, essas avaliações são asseguradas pelo Escopo, mas, por se tratar de um ACVE, a moeda do balanço resultante é

sempre energia. Isso ficará mais claro nos ACVEs apresentados nos próximos capítulos.

Grosso modo, este é o Escopo dos ACVEs que utilizaremos daqui para frente.

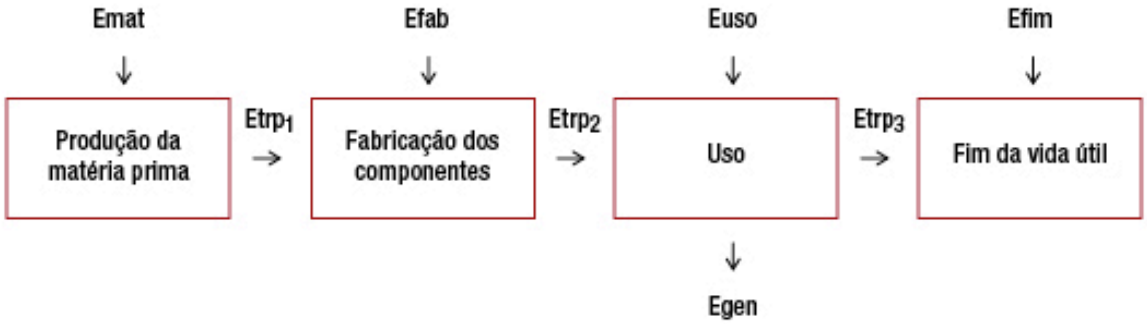


Figura 3.2 - Escopo de um ACVE para o segmento de eletricidade renovável
Estágios de ciclo de vida de uma usina de geração de energia Emat: energia gasta na produção da matéria-prima; Efab: energia gasta na fabricação dos componentes da usina; Euso: energia consumida no funcionamento da usina; Egen: energia gerada pela usina; Efim: energia gasta na desmobilização da usina. Etrp n: energia gasta no transporte entre cada uma das etapas.
Fonte: adaptado de Keoleian e Lewis, 1997

Assim, todos os recursos (insumos) utilizados conhecerão uma redução para um denominador (balanço de MWhs) que leve em conta consumo detalhado de energia em sua elaboração. A definição dos limites do sistema se dará em função de MWhs “imputados” e MWhs produzidos. Isso especifica a unidade MWh como unidade funcional de relação entre os fluxos (HANNON, 1978).

No escopo deste trabalho, o sistema se limita a MWhs gerados, prontos para alimentar o grid. Desta forma, perdas características relativas à distribuição e transmissão não serão consideradas.

As categorias do Escopo ganham finalmente a descrição abaixo, que encerra a apresentação da escolha metodológica realizada.

(A) Emat: Extração, tratamento básico dos materiais e posterior transporte: processo que resultará na obtenção da matéria-prima necessária para a produção dos componentes dos equipamentos.

Inputs: materiais, MWh consumido.

(B) Efab: Construção da unidade geradora e posterior transporte: a matéria-prima obtida em A passa por este processo para ser adequada à produção de equipamentos e componentes para ligação à rede.

Inputs: materiais de A e outros materiais, MWh consumido.

(C) Euso: Operação da usina e geração de energia.

Inputs: MWh consumido.

(D) Egen: Energia gerada.

Outputs: MWh gerado.

(E) Efim: Desativação/Desmontagem/Reciclagem: Inclui máquinas para desmontagem dos equipamentos; alguns materiais utilizados são parcialmente reciclados e outros, triturados.

Inputs: MWh consumido.

(F) $Etrp_n$: inclui o transporte dos equipamentos nas diversas etapas do ciclo de vida da usina. Após a desativação, inclui transporte dos resíduos para o depósito ou para o local de reciclagem.

Inputs: MWh consumido

Estas categorias levam em consideração que um sistema de geração de eletricidade é a soma de um conjunto de processos unitários que podem sobreviver de certa forma desconectados, mas que só ganham sentido quando arranjados de forma estruturada. Assim, a resultante do sistema esperada é o delta MWh resultado da equação MWh out - MWh in.

Esta função caracterizará, portanto, a propriedade essencial de um sistema de geração, sua sustentabilidade, e não mais o fornecimento de energia elétrica propriamente dito. Interessa, portanto, o balanço energético resultante.

Mwhs in e Mwhs out serão identificados por meio da análise de processos de energia, materiais básicos e auxiliares. Acredita-se que o balanço energético será aqui suficiente para a comparação entre as tecnologias, visto que, sob a nossa perspectiva, o delta resultante representa o resultado da energia gerada menos a

energia consumida na aplicação do conjunto de recursos. Enfim, Energia Líquida gerada.

CAPÍTULO 4 – EFICIÊNCIA NA CONVERSÃO DE IRRADIAÇÃO SOLAR EM ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA TECNOLOGIA FOTOVOLTAICA: ACVE TAUÁ

Antes de apresentar o ACVE da Usina Tauá, vale a pena caracterizar o desenvolvimento da energia fotovoltaica no Brasil.

Como visto, o efeito fotovoltaico é o processo através do qual uma célula fotovoltaica converte radiação solar (fótons) em eletricidade (SNL, 2012).

A estrutura das diferentes células fotovoltaicas era semelhante. Nelas, a energia de um fóton era transferida para um elétron de um semicondutor. Esta energia permitia ao átomo do semicondutor integrar-se à corrente de um circuito elétrico. Propriedades inerentes à célula fotovoltaica supriam a voltagem necessária para o direcionamento da corrente para uma carga externa (SNL, 2012).

A primeira célula fotovoltaica capaz de efetivamente converter a luz do sol em energia elétrica recorrente foi apresentada pelo Bell Lab em 1954 (USDE, 2012). Este primeiro desenvolvimento apresentava uma eficiência de conversão na casa dos 4% (USDE, 2012). Seu custo inviabilizava sua aplicação comercial num primeiro momento, exceção feita a determinados aplicativos militares e especializados como indústria aeroespacial, por exemplo.

Essas dificuldades de natureza financeira não impediram, no entanto, que os méritos da Energia Fotovoltaica fossem reconhecidos pela imprensa logo em sua apresentação (NYT, 1954).

Restrita a implantações-teste, a tecnologia fotovoltaica parecia condenada a não ganhar escala durante duas décadas, quando, no espaço de poucos meses, o preço do barril de petróleo foi elevado de US$ 3 para US$ 12 durante a crise que se iniciou em outubro de 1973 (HIRSCH, 1987).

Foi somente durante o desenvolvimento dessa crise do petróleo, em 1974, que a tecnologia ganhou valor estratégico junto ao governo americano e passou a receber uma verba significativa e constante, resultando em avanços tecnológicos que viriam a implicar em aumento de eficiência na conversão da radiação solar em eletricidade.

A partir daquele momento, a história do desenvolvimento da energia fotovoltaica passou a ser a história da alocação de verbas a fundo perdido (pesquisa) e de subsídios bancados pelo contribuinte. Como veremos adiante, isso

não se deu apenas nos Estados Unidos, mas também em outros mercados. Esses investimentos em pesquisas permitiram a redução continuada do preço da célula fotovoltaica ao longo das últimas décadas.

O Sunshine Project, programa do governo japonês, foi uma dessas iniciativas, além de representar um bom exemplo de coordenação entre pesquisa, desenvolvimento e tentativa de implantação comercial da tecnologia (SAKAKURA, 1975). Foram US$ 60 milhões anuais (números da época) investidos, durante a década de 80, em pesquisa e desenvolvimento, montante este que viria a ser multiplicado por 5 quando o projeto entrou na fase de apoio a instalações e comercialização.

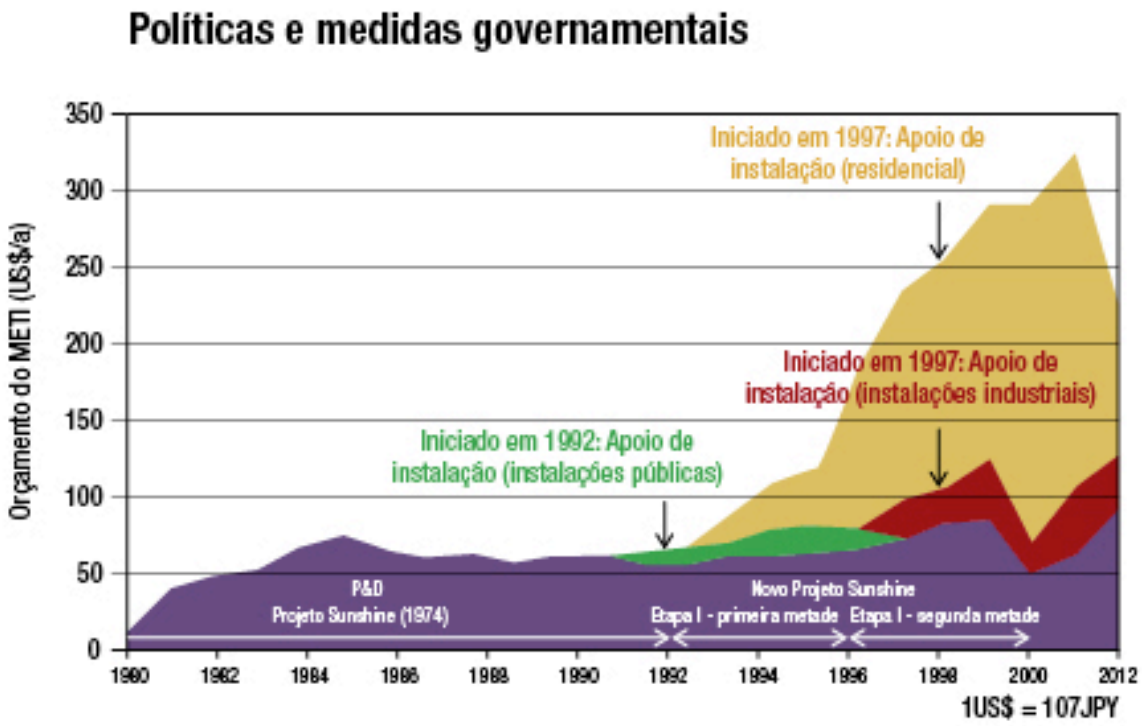


Figura 4.1 - Evolução Projeto Sunshine no Japão
Fonte: Adaptado de Sakakura et al. (1975)

Nos Estados Unidos, essa coordenação entre pesquisa, desenvolvimento e implantação comercial não ocorreu. Lá, o investimento em pesquisa sempre esteve mais ligado a um contexto federal, enquanto que o apoio ao desenvolvimento comercial surgiu mais restrito às diferentes unidades federativas. O estabelecimento do Solar Energy Research Institute, em 1977 (base para o NREL atual), e o lançamento, em 1998, do programa de US$ 112 milhões “Emerging Renewables Program” (com o objetivo de financiar reembolsos para instalações com menos de

30 KW nos segmentos residencial e comercial), exemplificam essa desconexão e a escala diminuta que tais programas tiveram no mercado americano.

A título de comparação, mesmo contando com um mercado muito menor e uma radiação solar muito menos significativa, em 1990 a Alemanha lançou o programa 100.000 tetos solares, alocando uma verba de US$ 500 milhões na busca de uma escala mais expressiva (GAERTNER, 2001).

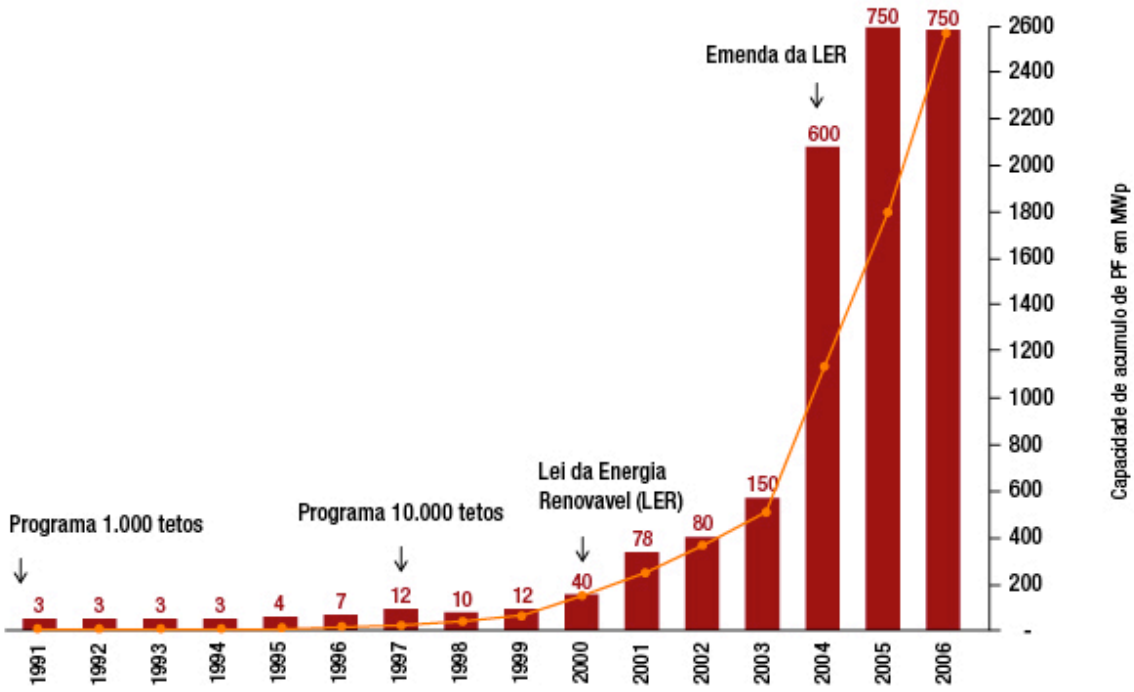


Figura 4.2 - Crescimento do número de instalações solares na Alemanha
Fonte: Adaptado de Gaertner, 2001

Hoje existem incentivos em diversos países e regiões, entre os quais poderíamos destacar: Austrália, Bulgária, Canadá, República Checa, China, França, Alemanha, Grécia, Índia, Itália, Japão, Macedônia, Servia, Eslováquia, Coreia do Sul, Espanha, Taiwan, Turquia, Reino Unido e Estados Unidos.

Os incentivos existentes nesses mercados são basicamente de três tipos e utilizados em diversas fórmulas de combinação: reembolso de despesas, tarifa subsidiada de alimentação da rede e emissão de certificados para livre negociação entre os agentes (KPMG, 2012).

Sem contar com um programa específico de incentivo ao desenvolvimento da Energia Fotovoltaica, o segmento de Energia Solar no Brasil, ao longo dos últimos 30 anos, caracterizou-se por ações reativas a iniciativas de fomento ao desenvolvimento tecnológico e implantações subsidiadas, realizadas em outros

mercados, principalmente nos Estados Unidos, no Japão, na Alemanha e, mais recentemente, na China.

Apesar de sua condição natural, o país até hoje não conseguiu desenvolver tecnologia, estabelecer um mercado para o segmento ou perenizar um programa de fomento.

Mas quais iniciativas foram estas?

Os primeiros programas de fomento no Brasil coincidem cronologicamente com o revés enfrentado pelo setor nos Estados Unidos com a chegada de Ronald Reagan à presidência.

Além de cortar as verbas, Reagan, numa atitude de alto valor simbólico, mandou retirar em 1986 os painéis de energia solar (para aquecimento) do teto da Casa Branca que Jimmy Carter havia instalado em 1979 (BIELLO, 2010).

Essa atitude de Reagan não foi algo isolado, mas estava ligada à percepção corrente, ao fim da década de 80, que apontava para a superação da crise do petróleo ocorrida na década de 70. Além disso, Reagan fazia eco a setores que afirmavam que todo o dinheiro investido em Energia Renovável previamente à sua gestão não havia garantido muita coisa em termos de segurança energética (BIELLO, 2010).

Com o desinteresse do Estado americano no desenvolvimento da Energia Solar, vários incentivos foram interrompidos (como os de natureza fiscal, por exemplo), e a tecnologia passou a ser oferecida para experimentos em vários países.

Essa experiência acumulada apresentava um estímulo para o desenvolvimento fotovoltaico, e o Brasil buscou se aproveitar dessa oportunidade. Exemplo desse estímulo é o convênio de 1992 entre o Centro de Pesquisas de Energia Elétrica da Eletrobrás (Cepel) e o National Renewable Energy Laboratory com a subsequente instalação dos primeiros projetos subsidiados de células fotovoltaicas no Brasil em vários estados (CIER, 2012).

Estas instalações visavam principalmente o atendimento de necessidades específicas de comunidades isoladas (energia solar voltada para aplicativos como bombas para poços, por exemplo), necessidades para as quais a Energia Solar parecia fazer sentido do ponto de vista econômico.

Exemplo dessa atuação foi o primeiro projeto de bombeamento fotovoltaico realizado dentro do convênio NREL/CEPEL/COELBA (o CEPEL sempre trabalhou dentro do âmbito das empresas Eletrobrás, ao qual a Coelba era ligada) (CRESESB, 2012a).

Esse sistema foi instalado para viabilizar um projeto de piscicultura no município de Valente, na Bahia. Com profundidade de 36 m, o poço que alimentava os tanques de criação dos peixes estava cerca de 20 m acima do nível de saída da água e 160 m distante do ponto de captação. Além de alimentar os tanques, o poço fornecia água para consumo na época da estiagem. Dezesseis módulos fotovoltaicos m55 da Siemens e uma bomba submersa alimentavam o sistema (CRESESB, 2012 b).

Vários projetos dessa natureza foram realizados a partir desse convênio, com maior ou menor sucesso.

A experiência adquirida em atuações como essa possibilitou que regiões geograficamente pertencentes a sistemas isolados do grid pudessem propor projetos não apenas ligados a aplicações específicas (bombeamento de água para piscicultura, irrigação etc.), mas também projetos voltados para a geração de energia elétrica propriamente dita.

Sistemas como os instalados em Joanes, Praia Grande, Tamaruteua e São Tomé, a partir de 1996, ilustram bem essa situação (BARBOSA, 2004).

As empresas do sistema Eletrobrás contavam com o aprendizado desses projetos experimentais para a proposição de soluções efetivas de geração de energia renovável para seus clientes de sistemas isolados. Essas intenções, no entanto, viram-se frustradas (mais adiante examinaremos mais detalhadamente o caso Joanes), quando se verificou que tais projetos não se apresentavam como sustentáveis e intensificaram a proposição de sistema de geração de energia a partir de geradores a diesel (BARBOSA, 2004).

A tecnologia fotovoltaica, contudo, viria a ganhar mais uma chance ao participar de implementações ligadas ao programa Luz Para Todos (COELBA, 2010).

O Luz Para Todos, ao contrário dos projetos propostos pelo convênio NREL/CEPEL, não pretendia o atendimento de comunidades, mas sim a conexão de domicílios. Numa tentativa de integração da tecnologia fotovoltaica, o programa

previa que em localidades onde a extensão da rede se mostrasse muito cara, tal atendimento poderia se dar através de uma instalação fotovoltaica (COELBA, 2010).

Estudo comparativo entre conexão à rede e a alternativa fotovoltaica para esse atendimento realizado pela Coelba (COELBA, 2010) mostrava que, para instalações com custo inicial maior que R$ 24 mil, o processo de geração fotovoltaica, mesmo contando com manutenção intensiva, era mais vantajoso no ciclo de vida, gerando uma economia significativa (COELBA, 2010).

Se no ciclo de vida as iniciativas demonstram uma excelente performance (como aponta o relatório), o capex inicial desmotivava esse desenvolvimento dentro das empresas, como revelava a diminuição progressiva em instalações desta natureza dentro do programa Luz Para Todos (COELBA, 2010).

De certa forma, essa diminuição nas instalações ilustrava a história das iniciativas de pesquisa, desenvolvimento e implantação dos processos fotovoltaicos no Brasil, também exemplificada pela atuação da Cepel no contexto do PRODEEM (GALDINO; LIMA, 2002).

Este histórico de descontinuidades em nível de pesquisa, desenvolvimento e implantação junto a entidades de pesquisa e governamentais não poderia se dar de forma muito distinta na iniciativa privada, e o caso da empresa Heliodinâmica se apresentava como um bom exemplo.

No fim dos anos 1970, o físico Bruno Topel conseguiu juntar um grupo de investidores interessados em alavancar a produção de uma linha de produtos fotovoltaicos, que teve sua produção e comercialização iniciada em 1980 na empresa Heliodinâmica (TOPEL, 1993).

Em 1980, a empresa iniciou uma atividade de encapsulamento de células importadas, passando em 1982 à fabricação das lâminas de silício e, na sequência, à fabricação das células solares propriamente ditas.

Além das células e dos módulos, a empresa chegou a fabricar sistemas de eletrificação rural, bombeamento de água, back-up de energia para telecomunicações e cercas (TOPEL, 1993).

Naquele momento, o negócio da Heliodinâmica era protegido pela lei de informática, que impedia importação de módulos fotovoltaicos prontos em função da presença do semicondutor em sua composição. Com a queda dessa proteção em 1992, a empresa não resistiu e diminuiu suas operações.

A Heliodinâmica chegou a ter um porte significativo na década de 80 (entre 1984 e 1995, exportou algo em torno de US$ 10 milhões) (BRASIL ENERGIA, 2001), mas não acompanhou o desenvolvimento tecnológico (segundo Topel), em função da falta de incentivo à sua atuação.

Topel afirmava que, em 1986, a empresa chegara a produzir 5% da produção mundial de fotovoltaicos. Em várias entrevistas, Topel se queixava "da falta de apoio" e criticava o PRODEEM por não ter privilegiado a "indústria nacional". "O PRODEEM comprou equipamentos mal-dimensionados que não funcionam e hoje estão encostados". E esclarecia uma lição que aprendera militando na indústria solar fotovoltaica, exemplificada num resultado objetivo do PRODEEM. "Mais da metade do valor dos equipamentos importados para utilização no PRODEEM contava com subsídio do país de origem", explicava (STEWARD; WILCZEWSKI, 2009).

Assim, os programas brasileiros colaboravam para complementar os programas de subsídios à Energia Fotovoltaica em outros países.

O caso do Japão ilustra a fala de Topel. Com uma produção fotovoltaica que não se diferenciava em termos quantitativos daquela ostentada pela Heliodinâmica até 1993, foi a implantação de um conjunto de subsídios que permitiu à indústria japonesa a expansão e a assunção à liderança na produção e venda de módulos fotovoltaicos durante a década de 1990.

Assim, depois de responder ao que acontecia no mercado americano na década de 90 (cujo símbolo maior é o próprio convênio CEPEL, NREL), nossos programas oficiais passaram a responder à oferta japonesa decorrente de subsídios resultantes do Sunshine Project (SAKAKURA, 1975).

Esse movimento não teve sustentabilidade e, no fim da primeira década do século 21, o Brasil não mais contava com nenhum programa em escala e estruturado para a tecnologia fotovoltaica; e a tecnologia nem integrava as proposições estratégicas da EPE (EPE, 2010).

Uma nova grande onda de subsídios se formava, no entanto, na China a partir de 2006. Estimulada pelo tremendo crescimento da produção chinesa (SOLAR FEEDS, 2012), fruto da disponibilização de recursos fiscais por parte do governo Chinês, a energia fotovoltaica recomeçaria a ser foco de atenção no Brasil novamente no primeiro semestre de 2010, uma resposta direta (mais uma vez!) a um investimento externo subsidiado.

Foi em março desse ano que o Grupo Setorial de Sistemas Fotovoltaicos da Abinee publicou um documento reivindicando uma maior participação da Energia Fotovoltaica na matriz energética brasileira.

Essa reivindicação, no entanto, não resultou efetiva quando se analisa o PDE 2020 publicado pela EPE (EPE, 2011). Nele, a implantação fotovoltaica não é mencionada.

A inauguração da Usina Fotovoltaica Tauá, no Ceará, em agosto de 2011 (uma parceria entre MPX e a chinesa Yingli), não é exatamente uma resposta do segmento à movimentação iniciada pela Abinee, mas o reforça.

Essa usina, que tinha capacidade de 1 MW, responde à tendência internacional existente hoje de ligação direta do processo fotovoltaico à rede, sem nenhuma espécie de armazenagem da energia produzida. O caso Tauá reforça outra ação realizada pelo grupo setorial da Abinee em 2011 e será estudado mais adiante por meio da análise do seu ciclo de vida.

Como contribuição à consulta pública realizada ao PDE de 2020, o grupo sugeria que a EPE projetasse a instalação de 2.000 GW em energia solar no Brasil todo (ABINEE, 2012).

Na justificativa da contribuição, a entidade citou os projetos Megawatt Solar (Eletrosul/Florianópolis) e a planta de 3 MW da Cemig em Sete Lagoas. A Abinee previu ainda em sua contribuição que o país teria, em 2015, 600 MW instalados em painéis fotovoltaicos, chegando finalmente aos 2 GW em 2020.

A EPE não se pronunciou sobre a contribuição da Abinee à consulta pública aberta para o PDE 2020 e seu relatório final ainda não traz nenhuma menção ao segmento (EPE, 2011).

O primeiro passo concreto do marco regulatório em direção a uma atuação estruturada do segmento fotovoltaico para o Brasil aconteceu com a publicação da chamada pública 013/2010 pela Aneel em agosto de 2011 (ANEEL, 2011). Esta buscava legitimar projetos de Pesquisa e Desenvolvimento por *stake holders* como Concessionários, Centros de Pesquisa, Indústria e etc., representando um primeiro passo para uma atuação mais estruturada por parte dos agentes.

Destacava-se entre as perspectivas da chamada “Viabilizar economicamente a produção, instalação e monitoramento da geração solar fotovoltaica para injeção de energia elétrica nos sistemas de distribuição e/ou transmissão” (ANEEL, 2011).

Em suas premissas básicas, detalhava que o projeto tinha que prever “a instalação de uma usina solar fotovoltaica, conectada direta ou indiretamente por meio de unidades consumidoras à rede de distribuição e/ou transmissão de energia elétrica, com capacidade instalada entre 0,5 MWp e 3,0 MWp” (ANEEL, 2011).

A Chamada caracterizava a vontade da agência no que diz respeito à natureza do projeto. Apesar de situada em nível de P & D (pesquisa e desenvolvimento), ela trazia os elementos que deveriam nortear a implantação de projetos fotovoltaicos no país para os próximos anos.

Concentrando o incentivo na forma de verba para P & D, a Aneel “liberava” parcialmente a EPE do atendimento das reivindicações do setor, apesar de não trazer para si o papel da escala.

Tanto a chamada como a implantação em Tauá abriam mão do conceito de energia renovável armazenada (banco de baterias) em projetos fotovoltaicos.

Essa premissa diferia da adotada anteriormente pelas propostas provenientes de programas subsidiados. Examinemos mais detalhadamente o Sistema Joanes (já mencionado), um processo de energia fotovoltaica renovável armazenada inserido no contexto do convênio CEPEL NREL que começou a ser planejado em 1994 e foi inaugurado em 1997 (BARBOSA et al., 2004).

Imaginado como um sistema híbrido, eólico-solar, o sistema tinha características que procuravam assegurar a disponibilidade de energia elétrica renovável e armazenada.

Aproximadamente 200 baterias garantiam que o sistema poderia operar de forma isolada, abastecido tanto por um sistema eólico quanto por um fotovoltaico. Além disso, o sistema estava conectado à rede da UTE – Salvaterra.

Em função de suas características experimentais, o projeto não conseguiu antecipar uma série de problemas e praticamente não gerou.

As dificuldades encontradas pelos gestores (Celpa, Comunidades e Prefeituras) incluíam má qualidade dos materiais utilizados, inexperiência na instalação e, principalmente, ausência de recursos para manutenção.

Custos proibitivos, falta de pessoal adequado e o advento de soluções mais baratas mostraram que a tecnologia da forma como estava implantada não era adequada para o fim proposto (atendimento a comunidades isoladas).

Assim, o que se aproveitava da experiência acumulada desses projetos anteriores é que o armazenamento não funcionava, tanto que nem se mencionava a

possibilidade de uma energia renovável armazenada nas mais recentes proposições fotovoltaicas em função dos fiascos anteriores.

Os procedimentos fotovoltaicos internacionais que ganhavam escala também abriam mão completamente do uso de expedientes de armazenamento de energia.

Como acontecia na Usina Tauá.

A inauguração da Usina Fotovoltaica Tauá, no Ceará, em agosto de 2011 (uma parceria entre MPX e a chinesa Yingli), representava o início de uma nova fase de exploração da Energia Fotovoltaica no Brasil. Esta usina, que tinha capacidade de 1 MW, respondia à tendência internacional existente hoje de ligação direta dos processos fotovoltaicos à rede, sem nenhuma espécie de armazenagem da energia produzida. O caso de Tauá será estudado agora, utilizando-se a metodologia do ACVE já exposta.

Já exploramos no capítulo 2 o conceito de eficiência na conversão da irradiação solar. Além disso, a exposição da metodologia sobre Análise do Ciclo de Vida deixou claro também que o conceito de eficiência na conversão da irradiação solar é na verdade um conceito de eficiência operacional. A explicitação dessa eficiência incluirá obrigatoriamente a análise da produção dos insumos, da industrialização e do descarte de todos os elementos envolvidos na produção de energia elétrica fotovoltaica.

Como visto, a norma A Análise de Ciclo de Vida (ACV), ISO 14.040/2006 (ISO, 2006), era bastante adequada para estes fins, mas, no entanto, não era específica em relação às tecnologias de geração de eletricidade.

A especificação do conceito de ACV para ACVE ou Análise do Ciclo de Vida Energético (HANNON, 1978) e a adoção de uma unidade, o MWh, como padrão, permitiriam o entendimento do processo de geração de energia de forma mais precisa.

Nessa perspectiva, os recursos (insumos) utilizados na implantação da Usina Tauá serão aqui transformados em medida de energia (MWh), e o estabelecimento dos limites do sistema, essencial para a realização das Análises do Ciclo de Vida, dar-se-á em função da localização espaço-temporal de MWhs agregados e MWhs produzidos. Serão considerados apenas MWhs gerados, prontos para alimentar o grid, sem perdas.

Como veremos, em função dos altos custos de industrialização, o ACVE pode representar também oportunidades para redução de custos (por meio da diminuição dos custos da energia), impactando a viabilidade da tecnologia.

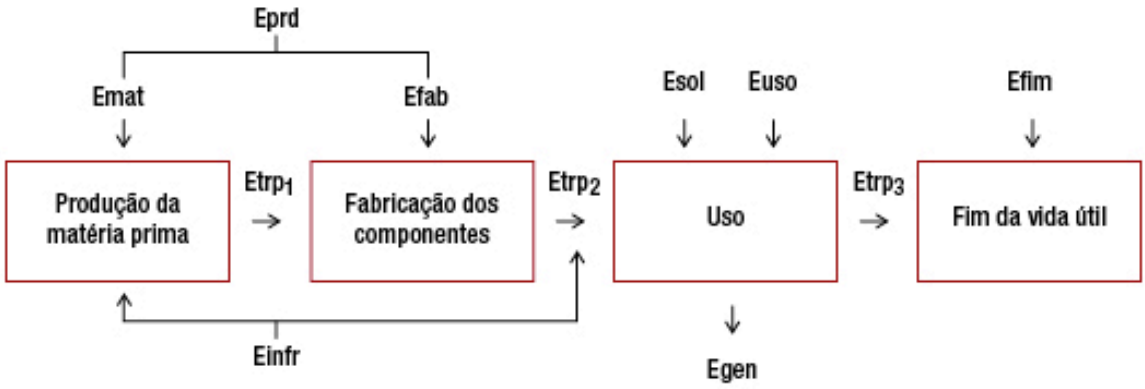


Figura 4.3 - Escopo de um ACVE para o segmento de eletricidade fotovoltaica
Estágios de ciclo de vida de um sistema fotovoltaico. Emat: energia gasta na produção da matéria-prima; Efab: energia gasta na fabricação dos módulos e demais componentes; Esol: irradiação solar na área da usina; Euso: energia consumida no funcionamento da usina; Egen: energia gerada pelos painéis fotovoltaicos; Efim: energia gasta na desmobilização da usina. Etrp n: energia gasta no transporte entre cada uma das etapas; Eprd: energia total gasta na produção dos componentes = Emat + Etrp1 + Efab; Einfr: energia total gasta para a implantação de toda a infraestrutura = Eprd + Etrp2
Fonte: adaptado de Keoleian e Lewis, 1997

Cada uma dessas etapas será entendida numericamente em seus detalhes para que a energia envolvida possa ser somada ao total de inputs energéticos. Assim, por exemplo, produtos envolvidos na fabricação do módulo fotovoltaico como aço, EVA, Silício Cristalino etc. devem ter seus custos energéticos esclarecidos. Processos ligados à produção (como transporte, por exemplo) devem ser analisados também. É o que faremos adiante.

USINA TAUÁ

A usina MPX Tauá é um empreendimento do grupo MPX. Localizada no município de Tauá, a 360 km de Fortaleza, a usina tinha a potência de 1MW em corrente contínua. Eram 4.680 painéis fotovoltaicos instalados em uma área de 12.000 m^2. A energia elétrica gerada pelos painéis era conduzida por cabos elétricos até as caixas de controle e monitoramento, que funcionavam como um ponto de

encontro para a energia gerada. Após concentrada, a energia era enviada através de cabos subterrâneos para uma sala onde estavam localizados os inversores. Nos inversores, a energia produzida em corrente contínua era transformada para corrente alternada. Para a interligação da usina ao sistema elétrico, um transformador elevava a tensão gerada pelos inversores de 220 V para 13,8 KV, e uma linha de transmissão de aproximadamente 2 km conectava a usina à distribuidora local. A MPX possuía planos de expansão dessa usina para até 50 MW (MPX, 2012).

A vida útil dos principais componentes da usina é de 30 anos (ALCEMA et al., 2006), período para o qual calculamos abaixo os gastos energéticos e a geração da usina.

Este era o aspecto do terreno da Usina Tauá antes do início da sua instalação.

Figura 4.4 - Terreno da usina de Tauá
Fonte: Moszkowicz, 2011

Preparo do Terreno

O terreno de 12.000 metros^2 sofreu um processo de supressão vegetal, seguido de operações de terraplenagem (MOSZKOWICZ, 2011). Uma aproximação do gasto energético com essas duas operações pode ser calculada com base no combustível utilizado pelas máquinas nas atividades de preparo do terreno.

A tabela abaixo apresenta a estimativa de diesel utilizado nas duas operações:

Equipamento	Consumo/hora	Horas trabalhadas	Consumo de diesel
Máquina de esteira D-51	9 L/hora	35 h	315 L
Motoniveladora	10 L/hora	30 h	300 L
Retro-escavadeira	7 L/hora	30 h	210 L
Total			**825 L**

Figura 4.5 - Estimativa de diesel utilizado nas duas operações
Fonte: Estimativa do autor

Tomando como base o poder calorífico do diesel (PCI) e adicionando o gasto energético da extração do petróleo, refino e transporte do diesel, temos um gasto energético de 0,012 MWh/litro de diesel (FERRARI FILHO, 2008; MACEDO et al., 2004; SINCONPETRO, 2012). Portanto, os 825 litros gastos equivalem a um total de 10 MWh.

Para o preparo do terreno, temos a seguinte equação:

$$Eprd = 10MWh$$
$$Etrp2 = 0$$
$$Euso = 0$$
$$Efim = 0$$

$$Eprd + Etrp2 + Euso + Efim = 10MWh$$

Obras civis e edificações

A usina de Tauá contava com três edificações: uma guarita, uma casa de apoio e a sala dos inversores, perfazendo uma área construída total de 300 m^2. Para a construção das edificações, foram utilizados cerca de 1.000 metros cúbicos de concreto e 3,8 toneladas de aço. Com um gasto energético de 0,332 MWh/m³ para o concreto (WILSON, 1993; DE PAULA, 2009; TAVARES, 2008), e de 19,29 MWh/ton

para a produção de aço (MACEDO et al., 2004), temos um gasto energético de 406 MWh com a construção das três edificações.

De modo a simplificar as contas, colocaremos o gasto energético com a utilização e manutenção das edificações junto com o gasto de Operação e Manutenção da usina.

Para a instalação dos suportes dos painéis, foram construídas 970 bases de concreto (MPX, 2012b), com um uso estimado de 32m^3 de concreto e 417 kg de aço (estimativa do autor). A produção dos suportes consumiu 19 MWh (ECN, 2006; MACEDO et al., 2004; estimativa do autor)

Somando-se o gasto energético para a construção das edificações com a energia gasta para a construção das bases, temos um gasto energético total com as obras civis de 425 MWh.

Portanto, para as Obras Civis e Edificações, temos a seguinte equação:

$$Eprd = 406\ MWh + 19\ MWh = 425\ MWh$$

$$Etrp2 = 0$$

$$Euso = 0$$

$$Efim = 0$$

$$Eprd + Etrp2 + Euso + Efim = 425\ MWh$$

Componentes da Usina

Os principais componentes da usina estão descritos na tabela abaixo:

Componente	Qde.	Especificação
Painéis fotovoltáicos	4.680	Kyocera KC 215 (Policristalino)
Inversores	9	Ingeteam - Ingecon Sun 100 TL
Suportes de painéis	18	Conectavol - Alphatubo 5h
Caixas de controle	198	Ingeteam - Ingecon Sun
Edificações	3	Guarita, Sala de Inversores e Casa de Apoio

Figura 4.6 - Principais componentes da usina de Tauá
Fontes: Moszkowicz, 2011; JORNAL DA ENERGIA, 2011; MPX, 2012a, b.

Painéis fotovoltaicos

Para a construção da usina, foram utilizados 4.680 painéis fotovoltaicos modelo KD215 (MPX, 2012), fabricados pela empresa japonesa Kyocera. Os painéis possuem potência de 215 Watts e são construídos de silício policristalino (KYOCERA, 2012). A energia gasta para produção da matéria-prima, fabricação dos componentes e montagem do módulo pode ser observada na tabela abaixo:

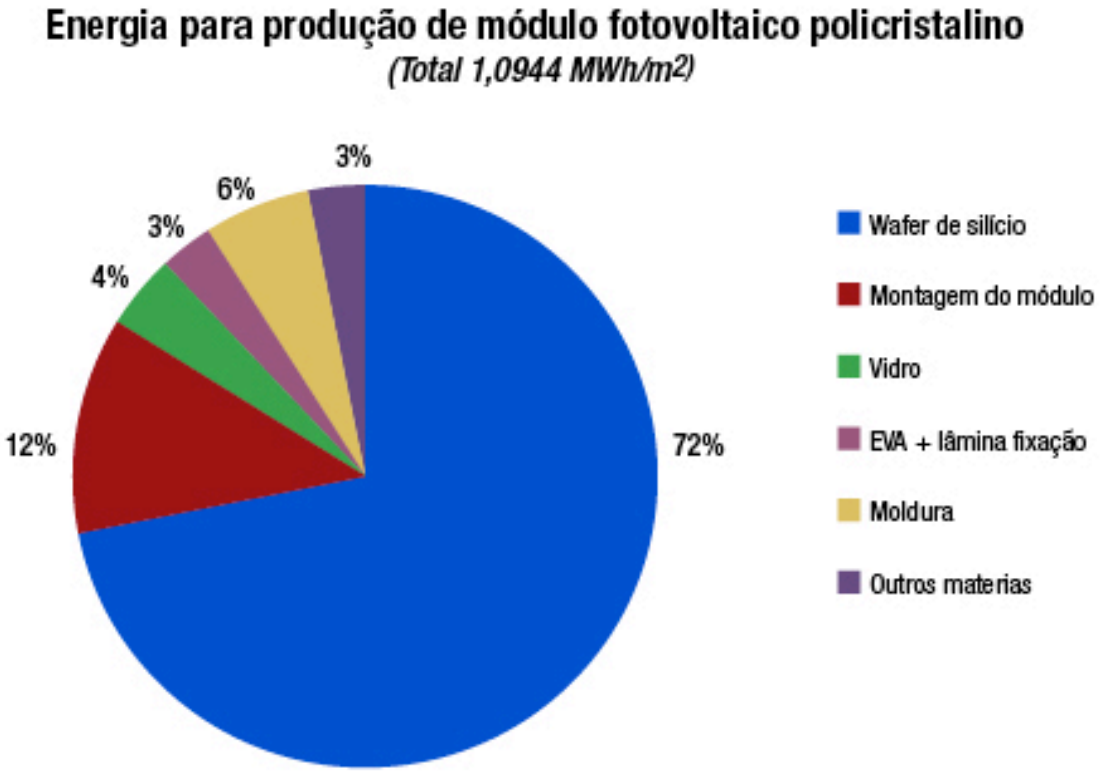


Figura 4.7 - Energia para produção de módulo fotovoltaico policristalino
Fonte: Adaptado de Alcema et al., 2006

Os 4.680 painéis fotovoltaicos somavam uma área de 6.950 m^2 (MPX, 2012c). Assim sendo, a energia gasta com a produção dos painéis foi de 7.606 MWh.

Os painéis utilizados na usina de Tauá foram fabricados no Japão (um lote) e nos EUA (dois lotes) (JORNAL DA ENERGIA, 2011). O gasto energético total para o transporte desses painéis até o local da construção da usina foi de 192 MWh (CEES, 2012; estimativa do autor).

Inversores

Para transformar a energia gerada de corrente contínua para corrente alternada, foram utilizados 9 inversores modelo Ingecon Sun 100 TL, de 100 KW cada, fabricados pela empresa espanhola Ingeteam (JORNAL DA ENERGIA, 2011; MOSZKOWICZ, 2011). Segundo Alcema et al. (2006), a energia gasta para a produção da matéria-prima, fabricação dos componentes e montagem dos inversores é de 0,268 MWh para cada KW de potência. Com 100 KW de potência cada um, temos um gasto de 26,8 MWh, por inversor, e de 241 MWh para os 9 inversores. O gasto energético com o transporte dos inversores foi de 9,6 MWh (CEES, 2012; estimativa do autor).

A vida útil estimada dos inversores é de 15 anos (ALCEMA et al., 2006). O gasto energético com a substituição dos inversores está incluso nos gastos de Operação e Manutenção da usina.

A eficiência média dos inversores é de 96% (INGECON, 2012). Portanto, a perda de energia nos inversores é de cerca de 4%, o que equivale a 67 MWh anuais, considerando-se uma média anual de produção de energia pelos painéis de 1.684 MWh. Nos 30 anos de vida útil da usina, a perda de energia nos inversores soma 2.021 MWh. Somaremos essas perdas à energia gasta com a Operação e Manutenção da usina.

Suporte dos painéis, caixas de controle e cabos elétricos

Os suportes dos painéis fotovoltaicos foram fabricados pela também espanhola Conectavol e são feitos de aço galvanizado (MPX, 2012c). As 168 caixas de controle dos módulos fotovoltaicos são de fabricação da Ingeteam. Seguindo a metodologia sugerida por Alcema et al. (2006), agrupamos os suportes dos painéis, as caixas de controle e os cabos elétricos utilizados para a ligação dos componentes para fins de cálculo energético. A energia gasta para a produção da matéria-prima, fabricação dos componentes e montagem desses três itens é de 0,028 MWh/m^2 de painéis (ALCEMA et al., 2006). Multiplicando esse valor pela área dos painéis (6.959 m^2), chegamos a um valor de 193 MWh. O gasto energético com o transporte desses três itens foi de 51 MWh (CEES, 2012; estimativa do autor).

Operação e manutenção

As atividades com operação e manutenção de uma usina fotovoltaica incluem limpeza dos painéis fotovoltaicos, retirada de ervas daninhas do terreno, troca de inversores, dentre outras (EPRI, 2010). Caso não seja realizada ao menos uma limpeza por ano dos painéis, a geração pode ficar comprometida em até 50%, pois o acúmulo de sujeira dificulta a passagem da irradiação solar (SUMAIMAN, 2010).

Os dados sobre o gasto energético com a Operação e Manutenção (O&M) de usinas fotovoltaicas são escassos. Devido a esse problema, utilizaremos como aproximação as despesas de O & M, convertendo-as para o gasto energético pelo preço de mercado da energia elétrica (R$ 160/MWh) vigente em agosto de 2012.

Segundo o National Renewable Energy Laboratory (NREL, 2010), as despesas com a Operação de Manutenção de uma usina fotovoltaica são da ordem de US$ 9.920 por MW instalado por ano, o que equivalia, em julho de 2012, a aproximadamente R$ 19.840. Logo, no caso de Tauá, o custo total de Operação e Manutenção ao longo dos 30 anos de vida útil da usina seria de R$ 595.200. Dividindo-se esse valor pelo preço de mercado da energia elétrica, chegamos a um total de 3.720 MWh.

Desmontagem dos componentes

Segundo Lewis & Keoleian (1997), o gasto energético com a desmontagem da usina e de seus componentes é difícil de prever, devido à longa vida útil de seus componentes (15 a 30 anos) e à incerteza quanto à evolução das tecnologias de reciclagem. Consideraremos, portanto, o gasto energético para triturar todos os componentes [0,0269 Wh/kg (LEWIS; KEOLEIAN, 1997)], além do transporte até Fortaleza-CE, a metrópole mais próxima da usina.

O gasto total com o transporte dos componentes e picagem é de 38 MWh (LEWIS; KEOLEIAN, 1997; CEES, 2012; estimativa do autor).

Portanto, para os componentes da usina, temos a seguinte equação:

$$Eprd = 7.606MWh + 241\ MWh + 193MWh = 8.040\ MWh$$

$$Etrp2 = 192MWH + 9{,}6\ MWh + 51\ MWh = 253\ MWh$$

$$Euso = 2.021\ MWh + 3.720\ MWh = 5.741\ MWh$$

$$Efim = 38\ MWh$$

$$Eprd + Etrp2 + Euso - Egen + Efim = 14.072 \text{ MWh}$$

Somando-se os gastos energéticos do Preparo do Terreno, Obras civis e Edificações e dos Componentes da Usina, temos o total de energia gasto pela infraestrutura da usina:

$$Einfr = 10 \text{ MWh} + 425 \text{ MWh} + 14.072 \text{ MWh} = 14.507 \text{ MWh}$$, nos 30 anos de vida útil da usina.

Geração de energia

Nos seus seis primeiros meses de operação, a Usina de Tauá produziu um total de 808 MWh comercializáveis (JORNAL DA ENERGIA, 2012), o que equivale a uma média mensal de 135 MWh. Se considerarmos essa média mensal, teremos uma produção de 1.617 MWh comercializáveis ao ano. Considerando que 4% da energia gerada pelos painéis é perdida nos inversores, a geração anual dos painéis é de 1.684 MWh. Em 30 anos, a geração total dos painéis é de 50.523 MWh.

Assim, temos:

$$Egen = 50.523 \text{ MWh}$$

Irradiação solar

A irradiação anual na região da usina de Tauá é de 2.190 KWh/m^2 (ANEEL, 2002). Portanto, na área total de 12.000m^2 da usina, temos uma irradiação total de 26.280 MWh/ano. Em 30 anos, teríamos um total de 788.400 MWh incidentes na área da usina.

Assim, temos:

$$Esol = 788.400 \text{ MWh}$$

Eficiência de conversão

Subtraindo-se o total de energia gasto pela infraestrutura da Usina do total de energia gerada, teremos o total líquido de energia gerada durante o ciclo de vida da usina:

$$Eliq = Egen - Einfr = 50.523\ MWh - 14.507\ MWh = 36.016\ MWh$$

Se dividirmos a energia liquida gerada pela energia proporcionada pala irradiação solar, teremos o fator de Eficiência de conversão da Usina:

$$Eficiência = Eliq / Esol = 36.016\ MWh / 788.400\ MWh = 5\%$$

Esta eficiência é média ao longo de um determinado período, visto que em alguns momentos (noites, por exemplo) a indisponibilidade é total. Os dados aqui obtidos serão utilizados para a comparação com a eficiência obtida na conversão fotossintética.

CAPÍTULO 5 – EFICIÊNCIA NA CONVERSÃO DE IRRADIAÇÃO SOLAR EM ENERGIA ELÉTRICA ATRAVÉS DA TECNOLOGIA FOTOSSINTÉTICA (COMBUSTÃO DIRETA): ACVE PIERP

Apesar do postulado da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) que define biomassa como qualquer recurso renovável de origem orgânica (ANEEL, 2005), a eletricidade produzida a partir de biomassa no Brasil era, em 2005, em sua grande maioria proveniente da combustão direta de bagaço e palha de cana.

Existiam, em 2003, 294 empreendimentos de cogeração à base de biomassa (ANEEL, 2005), e esta capacidade instalada de 4.267 MW envolvia combustíveis como licor negro, madeira, biogás e casca de arroz. A maior parte desta geração (aproximadamente 72% do total) era obtida a partir da cana-de-açúcar (ANEEL, 2005).

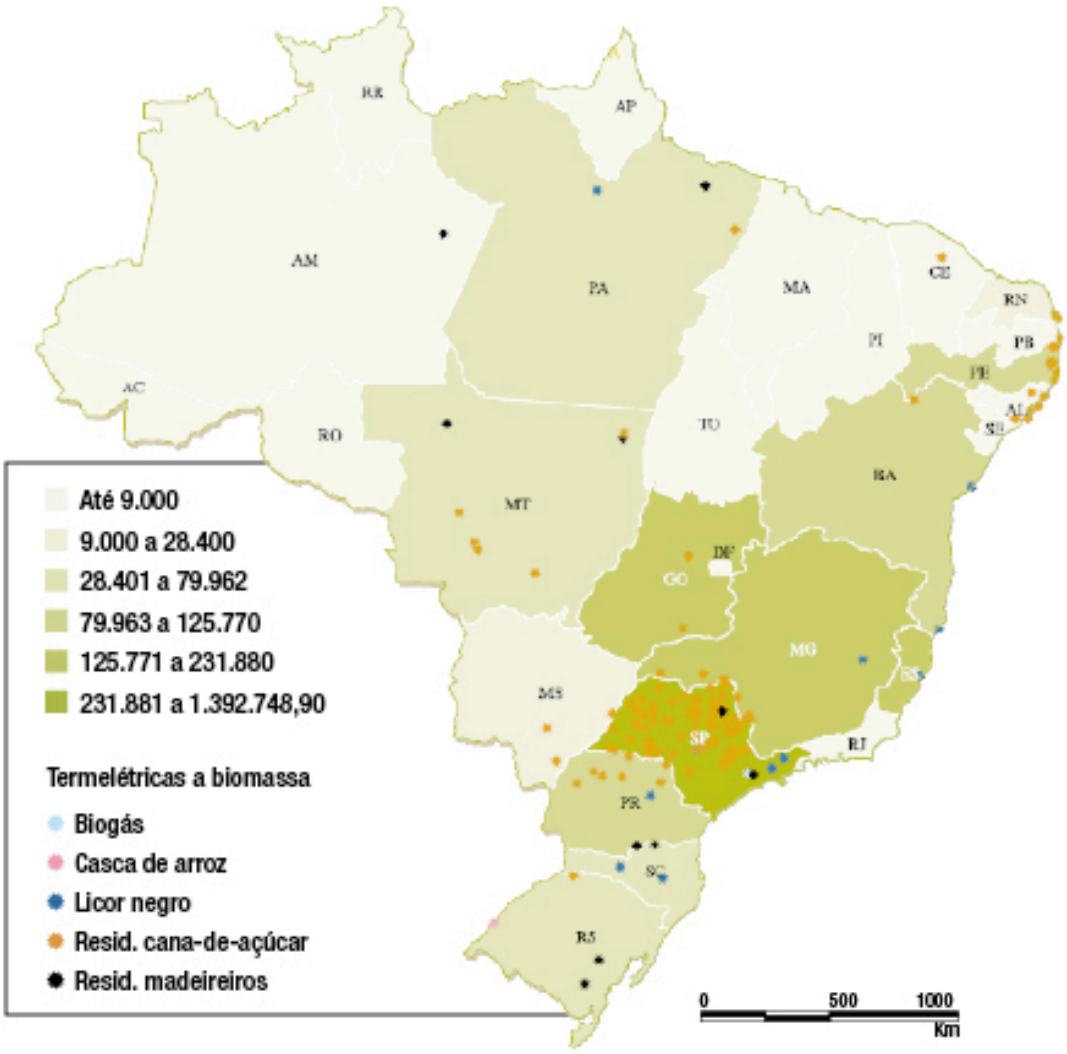


Figura 5.1 - Usinas Termoelétricas a biomassa em operação e potência instalada por Estado
Fonte: ANEEL, 2005

Apesar do grande potencial da palha, a energia elétrica gerada em 2011 era originária prioritariamente a partir do bagaço, que corresponde a aproximadamente 25% da planta.

A planta cana-de-açúcar, *Saccharum officinarum*, apresenta um ciclo de cinco anos (produzindo 85 ton/ha em média), que precisa ser continuamente replicado. (SCARPINELLA et al., 2009).

Em 2007, somente no Estado de São Paulo (JANK, 2007), a safra de cana gerava mais de 250.000 empregos diretos e ocupava área de 4 milhões de hectares.

De acordo com a tabela abaixo, a produtividade da cana ainda é bem maior no Estado de São Paulo, com bastante espaço para crescimento em outros Estados.

Descrição	Brasil	São Paulo
Usinas de cana-de-açucar cadastradas	423	195
Moagem de cana (em milhões de toneladas)	569	346
Produção de açúcar (em milhões de toneladas)	31,05	19,66
Produção de álcool anidro (em milhões de litros)	9,34	6,01
Produção de álcool hidratado (em milhões de litros)	18,17	10,72
Produção total de etanol (em milhões de litros)	27,51	16,72

Figura 5.2 - Produção e produtividade da indústria canavieira no Brasil
Fonte: ÚNICA, 2009[2] apud DANTAS, 2010 – Uso da Biomassa da Cana

O crescimento desta produtividade depende também da disponibilidade de energia para os processos. Historicamente o sistema de cogeração tem sido o responsável pelo fornecimento interno de energia térmica e elétrica das usinas. Assim, é produto e parte do processo, pois parte de energia primária potencial gerada (cana-de-açúcar) é utilizada na produção de eletricidade e/ou energia térmica útil.

Em certa medida, a história da exportação de eletricidade produzida a partir do bagaço é a história do incremento da produtividade nos processos de cogeração das usinas.

2 UNIÃO DAS INDÚSTRIAS DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Setor Sucroenergético - Mapa da Produção - Produção de etanol do Brasil.** UNICA, 2009 – Disponível em: http://www.unica.com.br. Acesso em 10 out. 2009.

Com o objetivo de, por meio de um sistema integrado, garantir-se a potência e transferência de calor de forma eficiente (GABRIEL FILHO et al., 2007), o sistema de cogeração apontava para uma maior segurança energética, visto que as usinas passavam a depender menos de fatores externos (SELF ENERGY, 2008).

A principal mudança que possibilitou o aumento de eficiência da cogeração como um todo foi a melhoria da tecnologia das caldeiras com seu consequente aumento de pressão e melhor aproveitamento do vapor nos processos (SCHIRMER, 2006).

Apesar dessa evolução na tecnologia, da melhoria de aspectos ambientais e melhor relação do custo/benefício da industrialização da cana (VIEIRA; OLIVEIRA JÚNIOR, 1998), foi a ameaça de apagão no governo Fernando Henrique Cardoso a mola propulsora do movimento de ampliação da capacidade exportadora (e consequente exportação) de eletricidade produzida pela cogeração no setor sucroalcooleiro.

Essa motivação gerou uma série de estudos com vistas à viabilidade técnico-econômica das melhorias (retrofits) e novas usinas (greenfields) (ANEEL, 2005; SOUZA; AZEVEDO, 2006).

Esse entusiasmo (que, como veremos adiante, durou pouco) resultou numa política de bons preços específica para o setor de biomassa, representado tipicamente pelas cifras alcançadas no Leilão de Reserva de 2009 (ver quadro de preços dos leilões adiante).

Mas o que aconteceu exatamente?

O quadro abaixo demonstra como a produção de energia das usinas passou a buscar um incremento na exportação para o sistema.

Ano	MW Exportado	MW Consumido	TOTAL
2000	-	120	120
2002 (crise)	120	500	620
2004 (proinfra)	445	620	1.065
2005 (leilão)	434	1.065	1.499
2006 (leilão)	398	1.499	1.897
2007 (leilão)	512	1.897	2.409

Figura 5.3 - Evolução do Autoconsumo e da Exportação de Bioeletricidade
Fonte: Adaptado de Kitayama, 2007

A destinação original da produção de energia elétrica a partir do bagaço de cana era o abastecimento do próprio processo, como vimos e como apontam os números do quadro acima.

A crise do apagão durante o governo Fernando Henrique deu um impulso ao segmento (leilão emergencial, PROINFA e outros leilões como mencionado acima), também confirmado pelo gráfico abaixo.

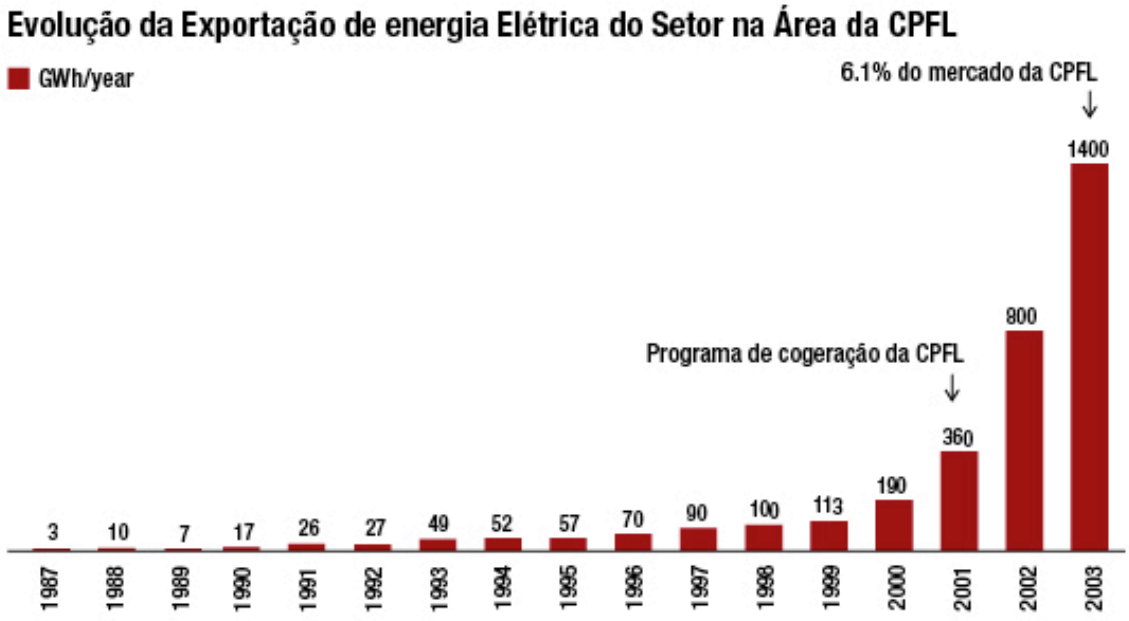


Figura 5.4 - Evolução da exportação de energia elétrica do setor sucroalcooleiro na área da CPFL
Fonte: Lamonica, 2007

Este incremento foi motivado por uma política agressiva de fomento ao setor que incluía, além da compra da energia em leilões específicos para o segmento ao longo da década de 2000, uma garantia de financiamento dos processos por meio da estrutura de Project Finance por parte do Banco Nacional de Desenvolvimento (COSTA; PRATES, 2005).

Essa articulação aparece também na formulação do PROINFA: “As fontes *renováveis* (grifo nosso) de energia terão participação cada vez mais relevante na matriz energética global nas próximas décadas. A crescente preocupação com as questões ambientais e o consenso mundial sobre a promoção do desenvolvimento em bases sustentáveis vêm estimulando a realização de pesquisas de desenvolvimento tecnológico que vislumbram a incorporação dos efeitos da aprendizagem e a consequente redução dos custos de geração dessas tecnologias” (BRASIL, 2007).

O PROINFA não era específico à biomassa e trazia em sua gênese a expressão da promessa de equação que combinava sustentabilidade com energia renovável (BRASIL, 2007).

Social

Geração de 150 mil postos de trabalho diretos e indiretos durante a construção e a operação, sem considerar os de efeito-renda.

Tecnológico

Investimentos de R$ 4 bilhões na indústria nacional de equipamentos e materiais.

Estratégico

Complementaridade energética sazonal entre os regimes hidrológico/eólico (Nordeste) e hidrológico/biomassa (Sudeste e Sul). A cada 100 MW médios produzidos por parques eólicos, economizam-se 40 m^3/s de água na cascata do Rio São Francisco.

Meio Ambiente

A emissão evitada de 2,5 milhões de tCO2/ano criará um ambiente potencial de negócios de Certificação de Redução de Emissão de Carbono, nos termos do Protocolo de Kyoto.

Econômico

Investimento privado da ordem de R$ 8,6 bilhões.

Figura 5.5 - Benefícios do PROINFA
Fonte: BRASIL, 2007

Tecnologias diferentes também ganharam, no contexto do PROINFA, tratamento diferente no que diz respeito à precificação (MME, 2009).

Esse tratamento, política de preços diferenciada por fontes de geração, gerou um impasse que se resolveria nos leilões realizados a partir do fim da primeira década do século XXI, com uma "vitória" de uma política de preços genérica para o setor de fontes alternativas que privilegiava a mais competitiva.

O quadro a seguir é o melhor resumo possível dessa situação, no que diz respeito ao que aconteceu com o setor de geração à base de biomassa.

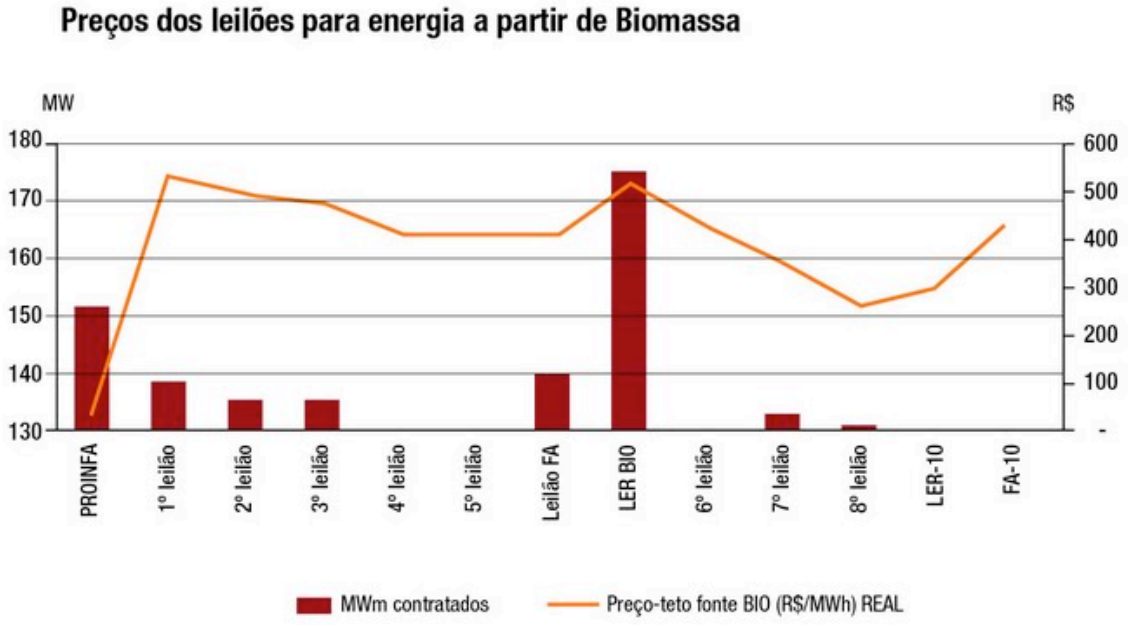


Figura 5.6 - Preços-teto históricos corrigidos pelo IPCA
Fonte: EXCELÊNCIA ENERGÉTICA, 2012

A deterioração dos preços decorrentes da competição com as outras fontes (revelada pela ausência de contratação da fonte em 2010), a partir do Leilão de Reserva, e a demanda contratada de forma inconstante resultaram numa desorganização na cadeia de valor (fornecedores, financiadores, reguladores etc.) (DCI, 2010), no segmento de geração à base de biomassa.

A principal indústria do segmento, por exemplo, não conseguia atender aos seus compromissos e convivia com uma série de problemas (DCI, 2010). O setor como um todo era percebido como ineficaz e o BNDES acabou por diminuir os recursos planejados para serem investidos no segmento.

Enfim, uma situação em que a previsão de aumento de 59% (comparado ao incremento muito superior dos processos de geração eólica, por exemplo) da produção de energia elétrica à base de biomassa (ONS, 2010), apesar de representar um ônus à matriz renovável armazenada, aparecia como justificável do ponto de vista da ineficiência dos segmentos envolvidos.

Como vimos, para a Cogen[3] e a Unica[4] (CASTRO; DANTAS, 2012) existia no período um potencial de 15 GW para a produção de Energia Elétrica a partir do bagaço da cana-de-açúcar até 2020. A realização desse potencial, no entanto, dependia de preços adequados à remuneração do investimento e de ampliação na estrutura de transmissão que viabilizasse a conexão das usinas à rede básica. Objetivamente, no entanto, os preços obtidos nos leilões de 2010 e 2011 (EXCELÊNCIA ENERGÉTICA, 2012) inviabilizariam a realização deste potencial.

Quando tratada de forma complementar à energia armazenada renovável proveniente da hidreletricidade, a geração a partir do bagaço amplia o potencial da matriz original (CASTRO; BRANDÃO; DANTAS, 2012). Apesar de precária, a armazenabilidade da energia a partir do bagaço (como vimos e se adotada...) mitigaria muitos dos riscos verificados na produção de energia eólica. O ACVE Pierp apresentado a seguir pretende ser um dos insumos para a confirmação dessa possibilidade.

Vimos que o processo mais utilizado para a conversão de irradiação solar via fotossíntese em eletricidade é o da oxidação total (através de combustão direta) (BURWELL, 1978).

Nesse processo, a energia química armazenada em ligações presentes nas moléculas resultantes da fotossíntese (estimulada por fótons) é liberada na combustão, aquecendo caldeiras que fornecem vapor para a movimentação de grupos geradores.

Nas plantas, a função original dessa energia armazenada é garantir a sustentabilidade e replicação dos organismos, que não são asseguradas diretamente pelos fótons. Enfim, nenhum organismo fotossintetizante utiliza fótons

[3] A Associação da Indústria de Cogeração de Energia (COGEN) reúne empresas dos setores da agroindústria canavieira, distribuição de gás natural e de energia elétrica, fabricantes e prestadoras de serviço nessa área (COGEN, 2012).

[4] A União da Indústria de Cana-de-Açúcar (UNICA) é a maior organização representativa do setor de açúcar e bioetanol do Brasil. As 146 companhias associadas à UNICA são responsáveis por mais de 50% do etanol e 60% do açúcar produzidos no Brasil (UNICA, 2012a).

nessas tarefas, mas sim os utiliza para produzir energia armazenada, que será utilizada quando apropriado (LESLIE, 2009).

Essa habilidade natural torna a Conversão Fotossintética, no conjunto de suas reações, um processo Renovável e Armazenado completo (LESLIE, 2009).

A produção de energia elétrica a partir da cana-de-açúcar se aproveita da energia armazenada no bagaço como combustível para a oxidação acima referida.

Vale a pena enfatizar que em 2011 o setor sucroalcooleiro brasileiro apresentava um potencial de geração de 15.000 MW através da cogeração em caldeiras, resultante da possível combustão direta de bagaço e palha residuais do processo de produção de açúcar e etanol. Esse potencial se baseava na intensa atividade agrícola que explorava 7 milhões de hectares, colhia 500 milhões de toneladas de cana que, processadas, resultavam em 130 milhões de toneladas de bagaço e palha (resíduo do processo), passíveis de serem utilizados na geração de energia elétrica (UNICA, 2008) (CONAB, 2008).

Em 2011, as usinas em geral produziam eletricidade para seu próprio consumo. Segundo a UNICA, a capacidade disponível efetiva de geração de eletricidade a partir da cana-de-açúcar naquele momento, no entanto, era de cerca de 2.000 MW médio (exportáveis); e, em função da disponibilidade de combustível (bagaço e palha), essa produção restringia-se a cerca de 50% da capacidade instalada (CASTRO; DANTAS, 2012).

Este quadro dá uma ideia dos materiais, processos e produtos envolvidos na indústria sucroalcooleira.

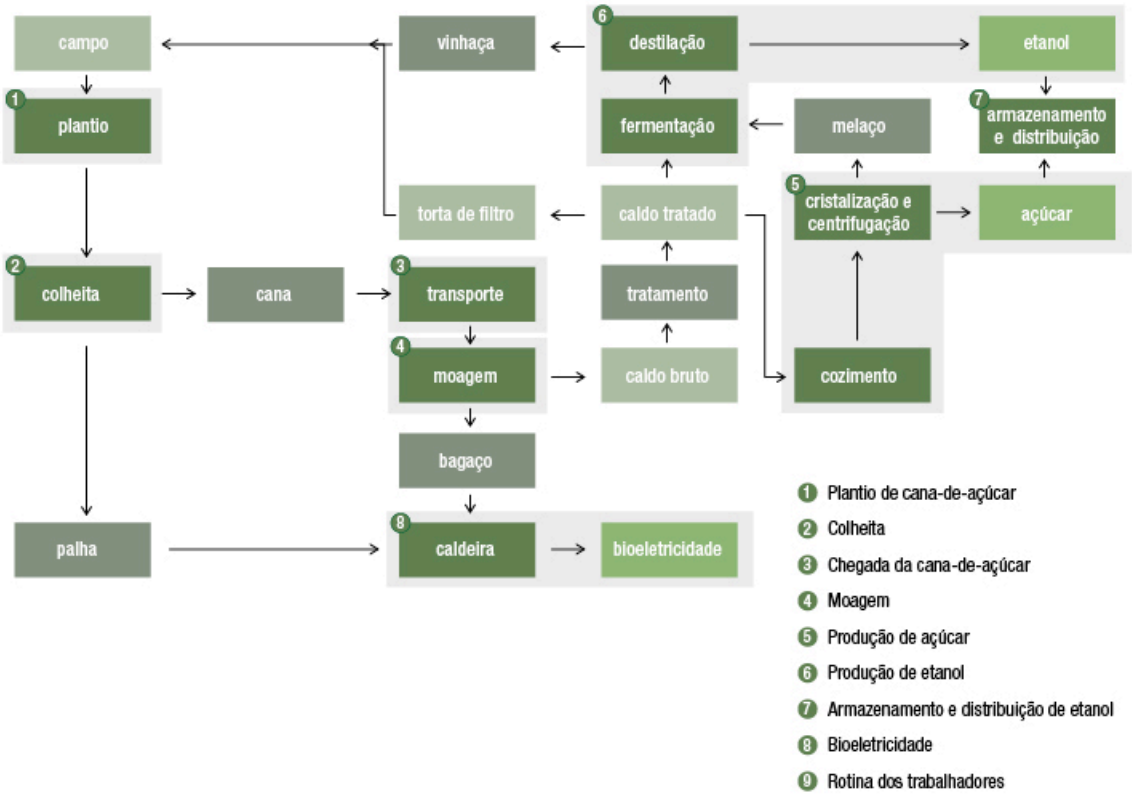


Figura 5.7 - Materiais, processos e produtos envolvidos na indústria sucroalcooleira.
Fonte: UNICA, 2012

Uma ACVE que envolvesse todos esses processos e materiais resultaria por demais complexa.

Assim, partindo-se da premissa de que bagaço e palha podem ser precificados e terem um preço equivalente em energia a partir desta precificação, isolaremos o processo de produção de bioeletricidade partindo deste esquema proposto pela ÚNICA.

Figura 5.8 - Produção de bioeletricidade
Fonte: UNICA, 2012

Para a realização deste ACVE, selecionamos a Pierp, uma estrutura de geração de eletricidade a partir do bagaço que se apresenta desvinculada da produção de açúcar e etanol.

A Pierp Termoelétrica é uma usina de geração de energia elétrica a partir da queima de bagaço e palha de cana, instalada na cidade de Ribeirão Preto (SP).

Figura 5.9 - Termoelétrica Pierp
Fonte: MBFagribusiness

Construída pela Logos Energia, a Pierp foi planejada na época do apagão durante o governo Fernando Henrique. Com capacidade para 5 MW, teve sua capacidade ampliada para 27,8 MW posteriormente, e desde então vem fornecendo energia para o sistema (LOGOS ENGENHARIA, 2012)

Em 2012, a Pierp contava com duas caldeiras de alta pressão, uma de 70 ton de vapor/hora e outra de 80 ton de vapor/hora, alimentadas por um total de 350 metros de esteiras transportadoras. O conjunto gerador era constituído por 4 turbinas, sendo uma com potência de 5,3 MW e outras três com potência de 7,5 MW. A usina contava com uma subestação elevatória de 6,9 KV para 138 KV, e a conexão à rede era feita por uma linha de transmissão de 2,4 Km (LOGOS ENGENHARIA, 2012).

Para este ACVE também será aplicada a norma A Análise de Ciclo de Vida (ACV), “Gestão Ambiental – ACV-Princípios e Metodologia”, ISO 14.040/2006 (ISO 14.040, 2006), em que repetiremos a adoção da unidade, MWh, como padrão, que nos permitirá entender o processo de geração de forma mais ampla e realizar a comparação com a eficiência da conversão verificada no ACVE Tauá.

Da mesma forma como o realizado para a tecnologia Fotovoltaica para o ACVE Tauá, os insumos serão transformados em medida de energia (MWh), e o estabelecimento dos limites do sistema se dará em função de mega watts-hora (MWh) agregados e MWh produzidos. Como no processo fotovoltaico, serão considerados apenas MWh gerados, prontos para alimentar o grid, sem as perdas do sistema de transmissão.

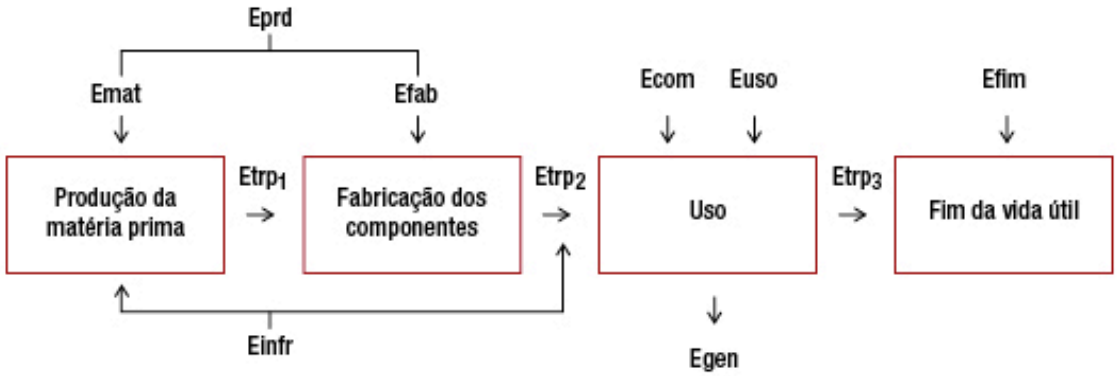


Figura 5.10 - Estágios de ciclo de vida de um sistema fotossintético

Emat: energia gasta na produção da matéria-prima; Efab: energia gasta na fabricação dos componentes da usina, Ecom: energia do combustível utilizado; Euso: energia consumida no funcionamento da usina; Egen: energia gerada pela usina; Efim: energia gasta na desmobilização da usina. Etrp n: energia gasta no transporte entre cada uma das etapas. Eprd: energia total gasta na produção dos componentes = Emat + Etrp1 + Efab. Einfr: energia total gasta para a implantação de toda a infraestrurura = Eprd + Etrp2.

Fonte: Adaptado de KEOLEIAN; LEWIS, 1997

Assim como na análise da tecnologia fotovoltaica, a ACVE tem que envolver desde o exame da extração da matéria-prima (que será beneficiada para a produção dos componentes), até seu descarte ou reciclagem. Os gastos com emissões e

transporte das matérias-primas até as fábricas, assim como das fábricas até a usina, também são considerados, bem como o dispêndio envolvido na manutenção, montagem e desmontagem da usina.

Aqui deve ser incluído também o consumo do transporte da biomassa do local da indústria produtora do resíduo até a usina, mas não o custo da biomassa residual, pois, na maioria das usinas, ela não tem custo. Esses processos ocorrem num espaço de tempo definido, muito importante para a comparação das diferentes tecnologias de geração.

Estabelecemos para a análise em questão um período de 30 anos, equivalente à vida útil dos equipamentos que compõem a usina.

Como já foi dito, por serem comuns a todos os processos de geração renovável de eletricidade, os aspectos ligados à transmissão não serão aqui analisados, pois não fazem parte do sistema de geração.

O sistema de geração termoelétrica movido a bagaço de cana está esquematizado na figura abaixo e na explicação dos processos que o compõem.

Esquema de geração de energia elétrica em uma usina termelétrica

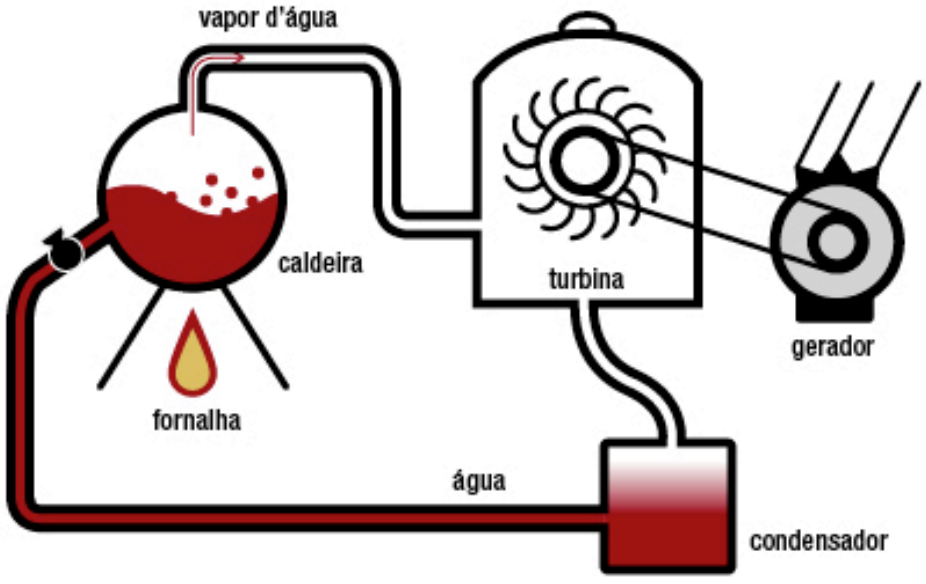


Figura 5.11 - Sistema de Geração Termoelétrica movido a bagaço de cana
Fonte: Autoria própria, com base em ISO, 2006

Preparo do terreno

Estima-se que o preparo do terreno para a implantação da usina tenha consumido cerca de 3.000 horas de máquinas, com um consumo total de diesel de 26.000 L (estimativa do autor). Tomando como base o poder calorífico do diesel (PCI) e adicionando o gasto energético da extração do petróleo, refino e transporte do diesel, temos um gasto energético de 0,012 MWh/litro (FERRARI FILHO, 2008; MACEDO et al., 2004; SINCOPETRO, 2012). O gasto energético com as operações de preparo do terreno foi, portanto, de 313 MWh.

Logo, para o preparo do terreno, temos a seguinte equação:

$$Eprd = 313 \text{ MWh}$$
$$Etrp2 = 0$$
$$Euso = 0$$
$$Efim = 0$$
$$Eprd + Etrp2 + Euso + Efim = 313 \text{ MWh}$$

Edificações

Tomando-se como base o estudo de Macedo et al. (2004), determinamos o gasto energético para cada uma das edificações existentes na Pier-RP, com base na área de cada uma delas. Assim, o gasto energético total com a construção das edificações foi de 11.866 MWh.

Edificações	Peso	Energia	Gasto Energético
Prédio industrial	3.000 m^2	3,14 MWh/m^2	9.414 MWh
Escritórios	300 m^2	5,23 MWh/m^2	1.569 MWh
Oficinas	300 m^2	1,98 MWh/m^2	593 MWh
Almoxarifado	500 m^2	0,58 MWh/m^2	291 MWh
Total			**11.866 MWh**

Figura 5.12 - Componentes da termoelétrica Pierp
Fonte: estimativa do autor

Portanto, para edificações, temos a seguinte equação:

$$Eprd = 11.866 \text{ MWh}$$
$$Etrp2 = 0$$

$$Euso = 0$$

$$Efim = 0$$

$$Eprd + Etrp2 + Euso + Efim = 11.866 \text{ MWh}$$

Para simplificação, somamos o consumo energético das edificações (representado principalmente por gastos com iluminação) ao consumo dos equipamentos industriais.

Equipamentos industriais

Os equipamentos industriais da UTE PIE-RP podem ser divididos em três grandes grupos:

- Esteiras transportadoras
- Turbina, gerador e redutor
- Caldeira e seus periféricos

Como já mencionado, a PIE-RP possui um total de 350 metros de esteiras transportadoras de bagaço, que alimentam as duas caldeiras. As caldeiras, por sua vez, fornecem vapor para os quatro grupos geradores, formados por uma turbina, um gerador e um redutor cada um.

Com base no trabalho de Macedo *et al.* (2004), podemos calcular um valor aproximado para o gasto energético envolvido na extração da matéria-prima e fabricação dos componentes industriais baseado no peso bruto de cada grande grupo.

Extração de materiais e fabricação dos componentes

Adaptando os dados de Macedo, chegamos ao seguinte quadro, totalizando um gasto total de 18.979 MWh.

Componentes industriais	Peso	Energia	Gasto Energético
Esteiras transportadoras	270 t	25 MWh/ton	6.799 MWh
Turbina, gerador, redutor (3x7,5MW; 1x5,3MW)	100 t	21 MWh/ton	2.092 MWh
Caldeira (1x80t/h + 1x70t/h)	620 t	16 MWh/ton	10.088 MWh
Total			**18.979 MWh**

Figura 5.13 - Componentes industriais
Fonte: Logus engenharia, 2012; estimativas do autor

Transporte dos componentes industriais

Para o transporte dos componentes industriais, estimamos uma distância média dos fornecedores de 206 Km, uma vez que a grande maioria deles está localizada nas regiões de Piracicaba-SP (200 Km de Ribeirão Preto-SP) e Jundiaí-SP (265 Km de Ribeirão Preto). Para calcular a energia gasta com o transporte dos componentes, utilizamos o dados do Center for Climate and Energy Solutions (2011) de 735 W/h por tonelada/quilômetro transportada por via terrestre, chegando a um total de 150 MWh.

Transporte dos componentes industriais	Peso	Local Fabricação	Terrestre	Gasto Energético
Esteiras transportadoras	270 t	Piracicaba-SP	200 km	40 MWh
Turbina, gerador, redutor	100 t	Jundiaí-SP	260 km	19 MWh
Caldeira	620 t	Piracicaba-SP	200 km	91 MWh
Total	**990 t**		**206 km**	**150 MWh**

Figura 5.14 - Transporte dos componentes industriais
Fonte: Center for Climate and Energy Solutions (2011), estimativa do autor

Para a montagem dos componentes industriais, adaptamos os dados de Macedo et al. (2004), chegando a um total de 1.028 MW.

Montagem	
Esteiras transportadoras	457 MWh
Turbina, gerador, redutor	86 MWh
Caldeira	485 MWh
Total	**1.028 MWh**

Figura 5.15 - Montagem dos componentes industriais
Fonte: Estimativa do autor; Macedo et al. (2004)

Consumo energético com a operação dos equipamentos industriais

Segundo a PIE-RP, o gasto de energia da usina com o funcionamento de seus equipamentos industriais e escritórios equivale a 5% do total de sua energia gerada. Considerando uma geração média anual de 109.588 MWh, temos um consumo de 5.479 MWh anuais ou 164.381 MWh nos 30 anos de vida útil da UTE.

Para determinar o gasto energético dos lubrificantes e produtos químicos utilizados na operação da UTE, adaptamos os dados de Macedo et al. (2004), chegando a um total de 442 W/h por tonelada de bagaço consumida pela usina. Partindo de um consumo anual de bagaço de 228.253 toneladas, temos um total de 3.024 MWh gastos ao longo dos 30 anos de vida útil da usina.

Somando-se o consumo de energia para a operação da usina com a energia embutida nos produtos químicos utilizados na operação, chegamos a um total de 167.405 MWh.

Desmontagem dos componentes industriais

Segundo Lewis e Keoleian (1997), o gasto energético com a desmontagem da usina e de seus componentes são difíceis de prever devido à longa vida útil de seus principais componentes (25 anos) e à incerteza quanto à evolução das tecnologias de reciclagem. Consideraremos, portanto, o gasto energético para triturar todos os componentes [97 J/kg (LEWIS; KEOLEIAN, 1997)], além do transporte até o local de trituramento.

O gasto total com o transporte dos componentes e picagem é 14,57 MWh.

Portanto, para os Componentes da usina, temos a seguinte equação:

$$Eprd = 18.979\ MWh + 1.028\ MWh = 20.007\ MWh$$
$$Etrp2 = 150\ MWh$$
$$Euso = 167.405\ MWh$$
$$Efim = 14,57\ MWh$$

$$Eprd + Etrp2 + Euso - Egen + Efim = 187.577\ MWh$$

Somando-se os gastos energéticos do Preparo do Terreno, das Edificações e dos Equipamentos industriais, temos o total de energia gasto pela infraestrutura da usina:

Einf = 313 MWh + 11.866 MWh + 187.577 MWh = 199.756 MWh, nos 30 anos de vida útil da usina.

Geração de energia

A PIERP opera em regime de despacho, sendo sua geração anual média de 109.588 MWh.

Em 30 anos de operação, a geração total da usina é de 3.287.628 MWh.

Assim temos:

Egen = 3.287.628 MWh

Energia do combustível

O bagaço de cana, com 50% de umidade, possui um poder calorífico inferior (PCI) de 2,09 MWh/tonelada (MACEDO, 2004). Considerando-se um raio médio de transporte do bagaço de 80 quilômetros e levando em conta um gasto energético para o transporte de 735 Wh por tonelada/quilômetro transportada (Center for Climate and Energy Studies, 2012), temos um gasto com transporte de 0,06 MWh por tonelada. Deste modo, a energia gasta com o combustível da usina é igual a 2,15 MWh por tonelada.

O sistema de geração da usina consome 2,08 toneladas de bagaço (50% de umidade) para cada MWh produzido. Logo, a usina consome 228.254 toneladas de bagaço por ano e 6.847.620 toneladas em 30 anos.

O gasto energético total com o combustível da usina é de 14.740.189 MWh.

Assim, temos:

Ecom = 14.740.189 MWh.

Eficiência de conversão

Subtraindo-se o total de energia gasto pela infraestrutura da Usina do total de energia gerada, teremos o total líquido de energia gerada durante o ciclo de vida da usina:

Eliq = Egen - Einfr = 3.287.628 MWh - 199.756 MWh = 3.087.872 MWh

Se dividirmos a energia líquida gerada pela energia proporcionada pelo combustível, teremos o fator de Eficiência de conversão da energia da biomassa:

Eficiência = Eliq / Ecom = 3.087.872 MWh / 14.740.189 MWh = 21%

Esses indicadores serão comparados aos obtidos para a eficiência na conversão fotovoltaica no próximo capítulo.

CAPÍTULO 6 – COMPARAÇÃO ENTRE EFICIÊNCIA NA CONVERSÃO DE IRRADIAÇÃO SOLAR EM ENERGIA ELÉTRICA NAS TECNOLOGIAS FOTOVOLTÁICA E FOTOSSINTÉTICA (COMBUSTÃO DIRETA) COM BASE NOS DADOS DOS ACVES

Foi visto que o planejamento da oferta de energia para o Brasil vislumbrava a alteração na energia armazenada de sua matriz (EPE, 2011a) e que isso poderia representar uma diminuição na segurança energética do país.

Nesse sentido, as possibilidades apresentadas pela Energia Solar para o país passaram a ganhar um interesse vinculado ao excelente índice de radiação solar presente em território nacional (EPE, 2011b).

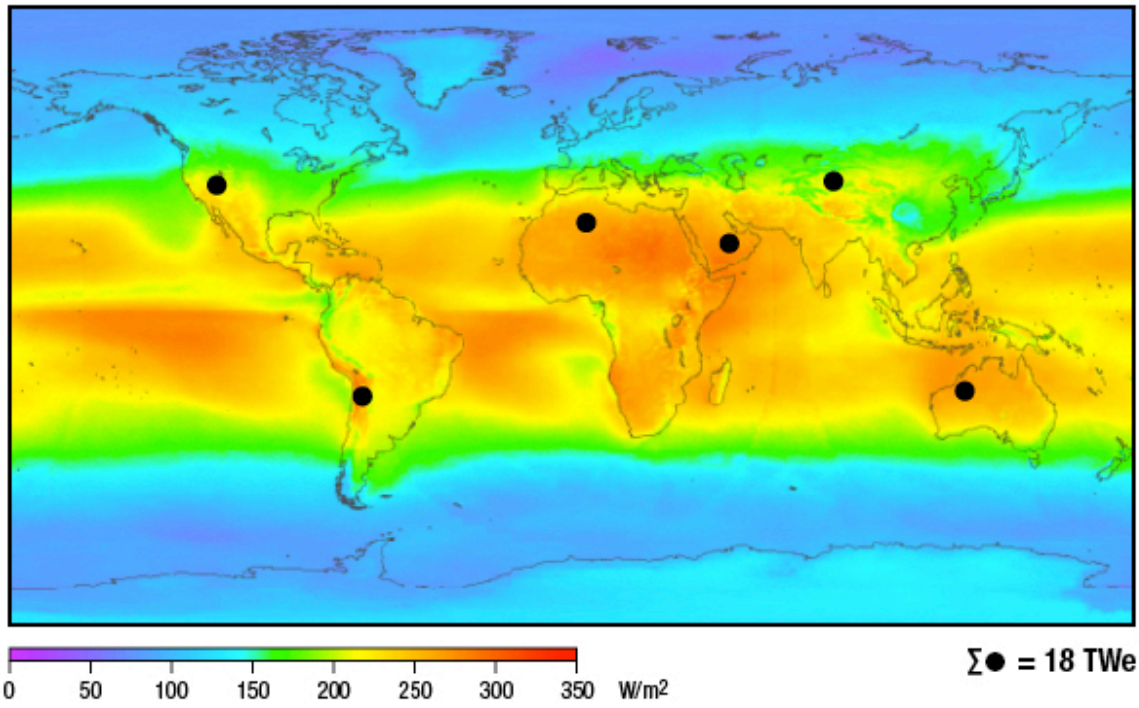


Figura 6.1 - Índice de insolação na Terra
Fonte: Loster, 2010

Se era verdadeiro o potencial para geração de energia a partir da radiação disponível, o desafio estava em como se absorver, armazenar e disponibilizar esta energia da forma mais eficiente possível.

Retomando dados já aqui apresentados: a área do Brasil tem um potencial de recepção da radiação solar equivalente a 1,5 milhão de TWh (CIA, 2012). Tendo em vista que em 2011 o país desenvolvera uma capacidade de geração na casa dos 110 GW (e o fator de realização deste potencial era de 50%), se conseguíssemos alcançar 100% de eficiência na conversão de Energia Solar, a utilização de apenas

0,027% do território nacional seria suficiente para a substituição de toda a capacidade instalada do país. Infelizmente, tal eficiência era teórica.

Entre os processos disponíveis para a realização dessa conversão (e consequente comparação), selecionamos as tecnologias fotovoltaica e fotossintética representadas nos ACVEs desenvolvidos para Tauá e Pierp. Essas unidades de geração forneceram o substrato empírico amparado por documentação teórica (BLANKENSHIP et al., 2011) para a comparação entre eficiência nas conversões fotossintética e fotovoltaica.

Foi visto que a comparação da eficiência dessas tecnologias pedia uma análise dos recursos (financeiros, de implantação, estrutura operativa, destinação de resíduos, utilização de recursos hídricos e imobiliários, além de aspectos da produção de alimentos e aquecimento global) envolvidos em todas as etapas para que as tecnologias realizassem seu potencial.

A análise integral do ciclo de vida das tecnologias, portanto, fazia-se necessário.

Conhecida desde a década de 1970, a metodologia de Análise do Ciclo de Vida apresentava um *framework* para o entendimento de aspectos ligados aos recursos naturais e à degradação do meio ambiente.

Este *framework* ganhou um quadro estável de referência com a publicação da norma ISO (ISO, 2006).

Vimos, no entanto, que a norma da ISO não era específica às tecnologias de geração de energia elétrica. Assim, optamos pela adoção de uma derivação da metodologia, Análise do Ciclo de Vida Energético, mais adequada à comparação objetivada. (HANNON, 1978).

Feita a escolha, definimos uma moeda para realização da análise comparativa: o MWh. Esta foi aplicada nos ACVEs já citados para a obtenção dos balanços finais dos recursos envolvidos em ambas as tecnologias.

Nesse sentido, os recursos necessários para a geração de energia elétrica nas tecnologias eleitas foram traduzidos para um denominador comum (MWhs) que permitiria a comparação que segue.

O efeito fotovoltaico converte radiação solar (fótons) em eletricidade por meio de célula fotovoltaica. Nela, a carga do fóton é transferida para um semicondutor. Esta carga permite ao átomo do semicondutor integrar-se à corrente de um circuito

elétrico. Propriedades inerentes à célula fotovoltaica suprem a voltagem necessária para o direcionamento da corrente para uma carga externa (SANDIA, 2012).

Assim, do fóton ao elétron capaz de gerar carga, as etapas na conversão fotovoltaica são praticamente desintermediadas, quando comparadas à conversão fotossintética. Consta que a primeira célula fotovoltaica desenvolvida pelo Bell Labs apresentava uma eficiência de conversão na casa dos 4% (USDE 2012). Hoje se fala de eficiências bem mais elevadas (BLANKENSHIP et al., 2011).

É preciso entender o que significa isso. Quando apresentados de modo isolado, esses índices de conversão, que integram as fichas técnicas de todos os módulos fotovoltaicos, referem-se à conversão efetiva de watts-pico. O watt-pico é a medida da potência das células fotovoltaicas, verificada com uma irradiação solar de 1.000 watts por m^2, temperatura de 25 ^oC e com um espectro luminoso similar ao encontrado no verão do Hemisfério Norte em latitude de 35^o. Tais condições são, evidentemente, teóricas e servem para estabelecer um parâmetro segundo o qual a potência das células é comparada. Em função da própria maneira pela qual a terra se relaciona com o sol, e também das condições climáticas, a geração de energia elétrica de uma célula fotovoltaica varia a todo instante, podendo ser menor do que a sua capacidade nominal em watt-pico.

Neste trabalho, o que interessa verificar é o que é realmente convertido num determinado período de tempo. No caso, 30 anos, como já foi apontado anteriormente.

Da mesma forma que a eficiência fotovoltaica apresentada em sua formulação comercial é teórica, a observação da eficiência na conversão fotossintética em energia elétrica por meio da combustão direta é complexa e precisa ser definida. Como explicitado no capítulo 2, tudo começa com a fotossíntese que, através da Clorofila (e mais dezenas de proteínas), apresenta uma direção para as cargas recebidas por meio da irradiação solar. Dois complexos proteínicos (Foto sistema 1 e Foto sistema 2) se utilizam da água como fonte de elétrons na transferência destas cargas (OCC, 2012). O circuito onde se movimentam os elétrons integra os fotossistemas, gerando moléculas ricas em energia (ATP e NADPH). Estas vão proporcionar a síntese de outras moléculas que serão utilizadas na combustão (oxidação) (MITCH, 2009).

A produção de energia elétrica a partir da cana de açúcar se aproveita da energia armazenada no bagaço, como combustível para a oxidação acima referida.

O sistema de geração termoelétrica movido a bagaço de cana está esquematizado na figura abaixo.

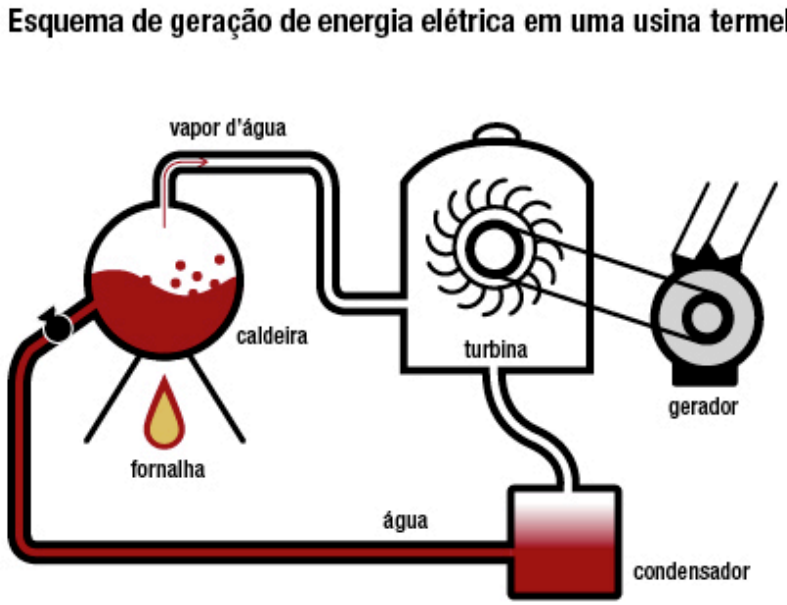


Figura 6.2 - Sistema de Geração Termoelétrica movida a bagaço de cana.
Fonte: Autoria própria, com base em ISO, 2006

O bagaço está representado pelo combustível que arde na fornalha. Esta energia foi naturalmente armazenada e desta forma suporta esta utilização. Essa habilidade natural da biomassa torna a Conversão Fotossintética por meio do processo de combustão direta no conjunto de suas reações um processo Renovável e Armazenado completo.

E qual seria a quantidade de Energia Armazenada nesse processo?

Vimos que, em testes, o conteúdo energético da fotossíntese é definido pelo calor obtido a partir da combustão total da glicose na produção de CO_2 e H_2O. Pode-se comparar esse número com uma medida real (ou estimada) da quantidade de irradiação recebida (área fotossintética x tempo) para se obter um número aproximado de conversão. A bibliografia relata que esse número está normalmente próximo a 1% (BLANKENSHIP et al., 2011). Esta glicose, quando disponível para produção de calor, normalmente na forma de massa seca, será inserida em algum processo de produção de eletricidade, sendo o mais comum (como já dito) o de combustão direta, que tem uma eficiência que varia entre 17% e 25% (OREGON, 2012).

Assim, a eficiência do processo fotossintético na conversão de radiação solar em MWh por meio do processo de combustão direta (ou cogeração) varia de 0,17% a 0,25%.

Esse índice ocorre quando o combustível é produzido segundo um padrão, e toda a produção de biomassa é destinada à conversão energética, como no caso de biocombustíveis, o que não é o caso da Pierp.

Na Pierp, a geração decorre de energia renovável e armazenada residual de um processo industrial anterior voltado para a produção de açúcar e/ou álcool.

Ao contrário do que acontece na conversão fotossintética, vimos que o aproveitamento da experiência acumulada de projetos fotovoltaicos não recomenda a utilização de armazenagem (em baterias) nesses processos.

Assim, para que uma comparação efetiva entre os dois processos se dê, precisamos considerar o critério renovável e armazenado (Pierp) e o apenas renovável (Tauá), concentrando-nos no balanço energético efetivo gerado pelo ciclo de vida considerado (30 anos) nas duas tecnologias. Isso só pode acontecer na análise de dados empíricos resultado de processos efetivos de geração de energia elétrica. Foi o que fizemos nos ACVEs de Tauá e Pierp.

O ponto de partida para o entendimento desses dados (e a realização desta comparação genérica) são os esquemas abaixo que definem os limites dos sistemas referentes às duas tecnologias.

Ciclo de Vida Tauá

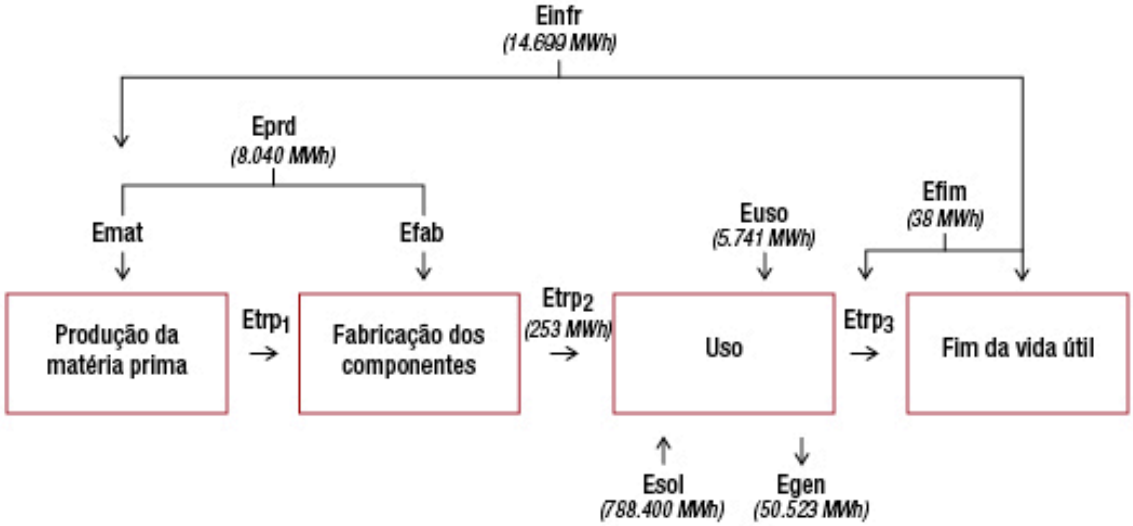


Figura 6.3 - Ciclo de Vida de Tauá

Estágios de ciclo de vida de um sistema fotovoltaico:
Emat: energia gasta na produção da matéria-prima;
Efab: energia gasta na fabricação dos módulos e dos demais componentes da usina;
Esol: irradiação solar na área da usina;
Euso: energia consumida no funcionamento da usina;
Egen: energia gerada pelos painéis fotovoltaicos;
Efim: energia gasta na desmobilização da usina, incluindo transporte;
Etrp n: energia gasta no transporte entre cada uma das etapas;
Eprod: energia total gasta na produção dos componentes = Emat+Etrp1+Efab;
Einfr: energia total gasta para a implantação e operação da infraestrurura = Eprod+Etrp2+Euso+Efim.
Fonte: Adaptado de Lewis e Keoleian, 1997

Ciclo de Vida Pierp

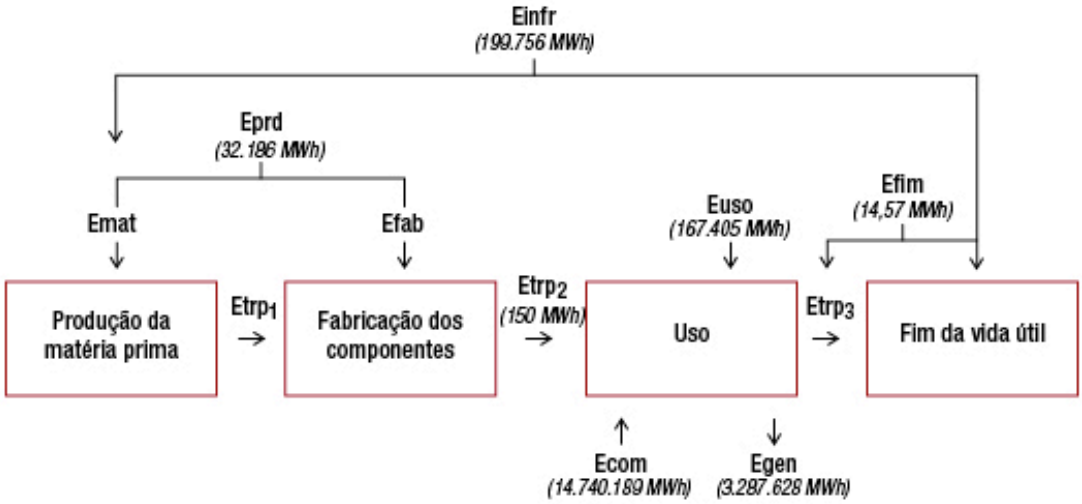


Figura 6.4 - Ciclo de Vida da PIERP

Estágios de ciclo de vida de um sistema fotossintético:
Emat: energia gasta na produção da matéria-prima;
Efab: energia gasta na fabricação dos componentes da usina;
Ecom: energia do combustível utilizado;
Euso: energia consumida no funcionamento da usina;
Egen: energia gerada pela usina;
Efim: energia gasta na desmobilização da usina, incluindo transporte;
Etrp n: energia gasta no transporte entre cada uma das etapas;
Eprod: energia total gasta na produção dos componentes = Emat+Etrp1+Efab;
Einfr: energia total gasta para implantação e operação da infraestrurura = Eprod + Etrp2 + Euso + Efim.
Fonte: Adaptado de Lewis e Keoleian, 1997

Esses esquemas que permitem a comparação absoluta entre os balanços obtidos possibilitam a realização de comparações intermediárias como, por exemplo, a eficiência do capex, verificada pela divisão da energia envolvida na obtenção e operação da infraestrutura necessária para a geração pela energia gerada pela unidade durante seu tempo de vida útil.

Assim Ecapex=Einfr/Egen.

O fator Einfr no Ciclo Fotovoltaico se apresenta com as seguintes características:

Eprod + Etrp3 + Euso + Efim = 10 MWh
Eprod + Etrp3 + Euso + Efim = 425 MWh
Eprod + Etrp3 +Euso - Egen + Efim = 14.072 MWh
Einfr = 10 MWh + 497 MWh + 10.583 MWh = 14.699 MWh, nos 30 anos de vida útil da usina.

Já Egen = 50.523 MWh.

Assim, temos que Ecapex= 14.699 MWh / 50.523 MWh = 29%, no caso de Tauá.

Fazemos o mesmo para o ciclo fotossintético, começando pelo fator Einfr:

Eprod + Etrp2 + Euso + Efim = 313 MWh
Eprod + Etrp2 + Euso + Efim = 11.866 MWh
Eprod + Etrp2 + Euso - Egen + Efim = 187.577 MWh
Einfr = 313 MWh + 11.866 MWh + 187.577 MWh = 199.756 MWh, nos 30 anos de vida útil da usina.

Já Egen = 3.287.628 MWh

Assim, temos que Ecapex= 199.756 MWh/3.287.628 MWh = 6%, no caso da PIERP.

Comparando o Ecapex de Tauá com o da Pierp, podemos observar que a Pierp tem uma melhor eficiência em relação ao capex, pois gasta o equivalente a apenas 6% de sua energia gerada na mobilização, uso e desmobilização da infraestrutura para uma determinada quantidade de energia gerada.

Outra comparação intermediária interessante é a taxa de conversão de energia das usinas (Tconv), que pode ser dada pela fórmula:

Tconv = Egen/Esol, para o caso de Tauá;
Tconv = Egen/Ecom, para o caso da Pierp.

No primeiro caso, temos:

Tconv = 50.523MWh/788.400MWh = 6%

No segundo, temos:

Tconv = 3.287.628MWh/14.740.189MWh = 22%

Retomando a questão da eficiência absoluta das usinas, no caso Tauá, a eficiência da geração fotovoltaica foi dada pela fórmula:

Eficiência = Eliq / Ecom(Esol)

Onde:
Eliq é a energia líquida gerada pela tecnologia
Ecom(Esol) é a irradiacão solar agregada

Enquanto que no caso Pierp a eficiência da geração fotossintética foi obtida pela fórmula:

Eficiência = Eliq / Ecom

Onde:
Eliq é a energia líquida gerada pela tecnologia
Ecom (energia do combustível) é a energia armazenada residual do processamento da cana.

O Eliq em Tauá é obtido subtraindo-se o total de energia gasta pela infraestrutura da Usina do total de energia gerada:

Eliq = Egen - Einfr = 50.523MWh - 14.699 MWh = 36.016 MWh

Esol em Tauá é obtido pelo cálculo da irradiação anual na área da usina. Segundo a ANEEL, na região de Tauá ela é de 2.190 KWh/m² (ANEEL, 2002). Portanto, numa área total de 12.000m^2 da usina, temos uma irradiação total de 26.280 MWh/ano. Em 30 anos, teremos um total de 788.400 MWh incidentes na área da usina.

Assim temos:

Ecom(Esol) = 788.400 MWh

Assim, para Tauá temos:

Eficiência = Eliq / Esol = 36.016 MWh / 788.400 MWh = 5%

Eliq no caso Pierp é obtido subtraindo-se o total de energia gasto pela infraestrutura da Usina do total de energia gerada.

Eliq = Egen - Einfr = 3.287.628 MWh - 199.756 MWh = 3.087.872 MWh

Ecom é basicamente a energia que sobra do processo de obtenção do bagaço. O bagaço de cana, com 50% de umidade, possui um poder calorífico inferior (PCI) de 2,09 MWh/tonelada (MACEDO, 2004). Além do bagaço, consideramos no

processo o gasto energético de seu transporte. Considerando-se um raio médio de transporte do bagaço de 80 quilômetros (cofirmar Pierp) e considerando um gasto energético para o transporte de 735 Wh por tonelada/quilômetro transportada (Center for Climate and Energy Studies), temos um gasto com transporte de 0,06 MWh por tonelada. Desse modo, a energia gasta com o combustível da usina é igual a 2,15 MWh por tonelada.

O sistema de geração da usina consome cerca de 2,08 toneladas de bagaço (com 50% de umidade) para cada MWh produzido. Logo, a usina consome 228.254 toneladas de bagaço por ano e de 6.847.620 toneladas em 30 anos.

Assim temos:

$$Ecom = 6.847.620 \times 2,15 = 14.740.189 \text{ MWh}$$

Desse modo, para a PIERP temos:

Eficiência = Eliq / Ecom = 3.087.872 MWh / 14.740.189 MWh = 21%

Comparando a taxa de conversão (Tconv) com a Eficiência das duas usinas (ver abaixo), podemos ver que os números são muito similares para as duas tecnologias (6% e 5% para Tauá e 22% e 21% para Pierp). Isso nos permite concluir que o gasto energético da infraestrutura (Einfr) acaba sendo diluído pela longa vida útil das duas usinas (30 anos), tornando-se praticamente irrelevante.

Como vimos, essa diferença em eficiências nas duas tecnologias (5% contra 21%) não aparece na bibliografia consultada. Isso se deve basicamente devido à natureza armazenada do combustível utilizado pela Pierp. Como se trata de energia já armazenada, a eficiência é totalmente transmitida ao processo. O combustível (e sua energia armazenada) é dado como existente, agregando-se a seu custo energético apenas o transporte.

Este balanço de eficiência que favorece a Pierp, no entanto, não leva em conta que, apesar de improvável, o fornecimento de combustível nas condições atuais pode cessar (em função de algum evento climático ou econômico, por exemplo), impedindo seu funcionamento ou obrigando à busca de outra solução para o combustível, o que alterará este balanço. No caso de Tauá, o sol sempre voltará a brilhar na manhã seguinte.

Questões como estas devem orientar a formulação de políticas para a adoção de uma ou outra tecnologia.

CAPÍTULO 7 – CONCLUSÃO: SUSTENTABILIDADE E SEGURANÇA ENERGÉTICA

A comparação entre a eficiência de conversão da irradiação solar fotovoltaica e a fotossintética em Energia Elétrica pedia uma análise do ciclo de vida de sua expressão em empreendimentos implantados. Neste trabalho, esta análise envolveu um exame aprofundado dos recursos (tecnologia, implantação, estrutura financeira e operativa, utilização de recursos hídricos e alocação de resíduos, além de aspectos da produção de alimentos e aquecimento global) envolvidos em todas as etapas do ciclo de vida dos empreendimentos. Isso se fazia necessário porque as eficiências propaladas em proposições acadêmicas ou comerciais tendiam a ser parciais, não dando conta da efetiva energia líquida gerada.

Outro elemento importante para viabilizar a comparação era a determinação de um período de tempo a ser considerado. Para este trabalho foi definido um ciclo de 30 anos para a vida útil dos empreendimentos.

Viu-se que, na conversão fotossintética (combustão direta), a geração decorria de energia armazenada residual de um processo industrial (anterior) voltado para a produção de produtos primários (açúcar e ou álcool).

Já na conversão fotovoltaica, o efeito convertia fótons em eletricidade através de célula. No processo, a carga era transferida para um semicondutor integrado à corrente de um circuito elétrico.

Isso explicitava a natureza desintermediada da conversão fotovoltaica, quando comparada à conversão fotossintética (combustão direta), no que diz respeito à geração de Energia Elétrica.

Esta natureza e a má experiência acumulada em projetos fotovoltaicos malsucedidos não recomendavam a utilização de energia armazenada (baterias) nesses processos (ver capítulo 2).

A comparação das eficiências reconheceu, assim, o critério renovável e armazenado natural na conversão fotossintética (Pierp) e o apenas renovável (Tauá) típico dos projetos fotovoltaicos atuais. Para isso, foi realizada a comparação da eficiência absoluta dos empreendimentos. Esta eficiência é melhor expressa pelas fórmulas:

Eficiência = Eliq / Ecom(Esol)- para a tecnologia fotossintética

Eficiência = Eliq / Ecom- para a tecnologia fotovoltaica

Onde:

Eliq é a energia líquida gerada pelos empreendimentos nas diferentes tecnologias de conversão e Ecom(Esol) é a irradiação solar disponível no caso fotovoltaico e Ecom (energia do combustível) é a energia armazenada residual do processamento da cana.

Como vimos, essas equações revelavam diferenças nas eficiências dos dois empreendimentos (5% no caso de Tauá contra 21% no caso da Pierp). Foi visto que essa diferença não apareceu na bibliografia consultada.

Pode-se considerar que isso se deu devido ao fato de a bibliografia não trabalhar com a Análise do Ciclo de Vida Energético, tal como foi aqui proposto.

Outro fator a se considerar é a natureza residual do combustível utilizado pela Pierp. Por se tratar de energia já armazenada, a eficiência residual era totalmente transmitida ao processo.

Este balanço de eficiência que favorecia a conversão fotossintética partia da premissa de que esta energia residual armazenada sempre estaria disponível. A (improvável) interrupção no fornecimento de combustível nas condições analisadas obrigatoriamente alteraria este balanço. Como dito, no caso de Tauá, o sol sempre voltaria a brilhar na manhã seguinte, garantindo uma maior perenidade nas condições observadas.

Existia, no entanto, um aspecto que poderia alterar profundamente a possibilidade de escala das condições verificadas na conversão fotovoltaica, mesmo considerando a eterna presença do sol. O exame realizado na cadeia de suprimento de Tauá e no histórico da implantação da tecnologia no Brasil mostrava uma instabilidade decorrente de sua vinculação a fornecedores (sem conteúdo local) e a programas de incentivos e subsídios externos, o que atribuía uma grande insegurança para os empreendimentos.

A inexistência de uma cadeia de suprimentos local, no caso da conversão fotovoltaica, contrastava com a situação verificada para a conversão fotossintética, onde esta cadeia local estava presente, apesar de combalida.

Assim, uma proposição regulatória de fomento não pode desconsiderar a necessária implantação de uma cadeia de suprimento confiável. Para o atendimento

de uma premissa de segurança energética, este elemento terá obrigatoriamente que estar presente na proposta de regulação.

Se o país optar prioritariamente pelo investimento numa tecnologia de conversão solar independente do domínio da cadeia de suprimento, correremos o risco de aumento da insegurança energética. Esta insegurança aparece, por exemplo, refletida no mapa abaixo.

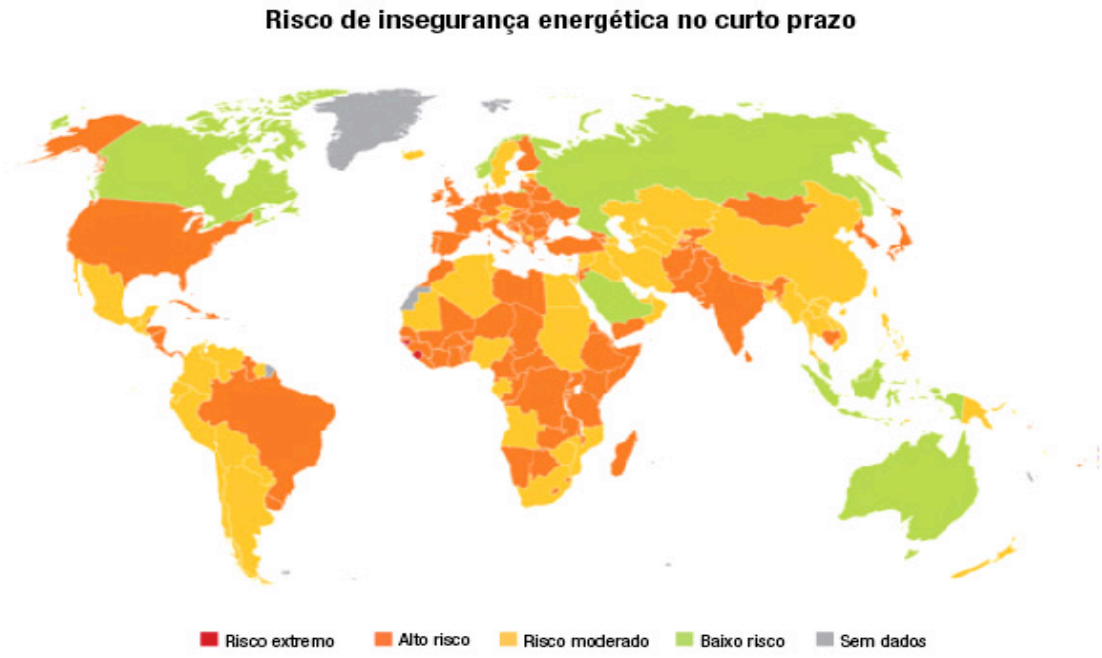


Figura 7.1 - Risco de insegurança energética no curto prazo
Fonte: MAPLECROFT, 2011

Como se pode observar, esse indicador (risco de insegurança energética) não estava necessariamente vinculado ao nível de desenvolvimento de uma determinada economia.

É interessante verificar como um país como os Estados Unidos, que apresentavam uma “coloração” (na referência) de insegurança energética igual à do Brasil, tratava este assunto em seus aspectos mais amplos e também nos mais específicos relacionados às energias limpas, renováveis.

Em 2011, a presidência dos Estados Unidos disponibilizou o documento BLUEPRINT FOR A SECURE ENERGY FUTURE (WHITE HOUSE, 2011), que tratava exaustivamente desses assuntos.

O documento previa a implantação daquilo que ele chamava de uma estratégia em três partes:

1. Desenvolvimento e garantia dos suprimentos energéticos americanos.
2. Disponibilização de opções aos consumidores que resultem em redução de custos e economia de Energia.
3. Inovação em direção a um futuro de energias limpas.

Nesta visão, a primeira etapa se responsabilizava pelo desenvolvimento local (nacional) de fontes energéticas de curto/médio prazo, de tal forma que o desenvolvimento tecnológico obtido garantiria uma posição de destaque para o país naquilo que o documento chamava de Economia da Energia Global. A segunda etapa buscava atacar a volatilidade dos preços da gasolina, permitindo aos consumidores a aquisição de veículos mais eficientes e a utilização de meios de transporte alternativos. Além disso, procedimentos de incremento da eficiência energética ajudariam nas economias das famílias e correspondente redução de custo.

Com a terceira etapa, Inovação na direção de um futuro de Energias Limpas, o governo pretendia antecipar a implantação de tecnologias em estágio de comercialização e financiar a pesquisa de novas tecnologias a partir de bases científicas recém-desenvolvidas.

Do ponto de vista do escopo deste trabalho, é a Terceira etapa a que mais interessa. É interessante observar que o termo Energias Limpas, no documento, incluía as renováveis, mas não se restringia a elas.

Constatava que 30 anos atrás os Estados Unidos possuíam 80% da base instalada de energia eólica do mundo e 90% da energia fotovoltaica, situação que sofreu alterações. Na época da publicação do documento, a China liderava em energia eólica e a Alemanha em energia solar.

Ao reconhecer a perda de liderança nos segmentos, o presidente propunha que, até 2035, 80% da eletricidade fosse produzida a partir de fontes limpas de energia, tais como eólica, solar, biomassa e hidrelétrica (renováveis); nuclear; gás natural e tecnologias de carvão limpo.

O documento reconhecia progressos na criação de empregos, expansão na produção, desenvolvimento de pesquisa de ponta (como sequestro de carbono e desenvolvimento de baterias para veículos), promoção de eletricidade renovável rural, disponibilização de áreas públicas para o desenvolvimento de projetos de energia renovável, desenvolvimento de projetos eólicos *off-shore*, expansão e

modernização da rede para integração de projetos de energia renovável, suporte criterioso ao desenvolvimento de energia nuclear e tecnologias de carvão limpo.

Além do reconhecimento dessas entregas, o governo trazia no documento as seguintes metas:

Estabelecimento de um novo padrão para energia limpa (considerada a peça fundamental na estratégia do governo Obama), incentivo a regiões menos favorecidas do ponto de vista de alternativas energéticas, promoção de novas e emergentes tecnologias em Energia Limpa, modernização e garantia de performance da rede, incentivo a projetos de energia renovável em escala, investimento em *smart-grid*, avanços em alternativas de energia nuclear e garantia da segurança do parque nuclear existente, incentivo à inovação por meio de investimentos em pesquisas de fontes de Energia Limpa, implantação de tecnologias de *smart-grid*, garantia de acesso a minerais críticos ao desenvolvimento de fontes de energia limpa e apoio à pesquisa aplicada que suporte inovações em manufatura (grifo nosso).

O cunho político do documento não deixava dúvidas e procurava ser abrangente em termos de setores envolvidos, o que, do ponto de vista de implantação de políticas, dificultava hierarquias, mas incluía o maior número de medidas possível.

Retomando o elemento grifado, ao suportar o desenvolvimento de pesquisas aplicadas que sustentassem a inovação em manufatura e implantações tecnológicas, o presidente buscava mais especificamente a diminuição do custo de implantação de energia solar, o acesso e desenvolvimento do potencial *off-shore* de energia eólica, a expansão da energia geotérmica e, principalmente, aumento da eficiência industrial na produção de suprimentos ligados à Indústria de Energia nos Estados Unidos.

O orçamento aprovado incluía investimentos no aperfeiçoamento de materiais e tecnologias relativas ao segmento de energia como circuitos impressos flexíveis para iluminação, baterias e células fotovoltaicas. Processos de manufatura relativos a carros elétricos e turbinas eólicas que identificassem melhores fontes de suprimento, reduzissem necessidades, melhorassem o design e trouxessem materiais alternativos, também foram considerados fundamentais e incentivados.

Este conjunto de medidas buscava o reforço de uma cadeia de suprimentos que garantisse efetivamente a política que se pretendia implantar, aumentando a segurança energética do país.

Baseado no exemplo americano, conclui-se este trabalho apontando-se para a necessidade de se vincular definitivamente toda proposta de incentivo a uma determinada fonte de energia solar à sua cadeia de suprimento. Esta pede uma definição de conteúdo local a ser realizada pelo BNDES. Mas somente esta definição não caracteriza condição necessária e suficiente para o sucesso do incentivo.

O incentivo à energia à base de biomassa (conversão fotossintética) na primeira década do século 21 no Brasil, apesar de contar com o apoio do BNDES, não foi precedido por um investimento na eficiência de sua cadeia de valor. Isso acabou inviabilizando o desenvolvimento e a maturação da referida tecnologia na dimensão de seu potencial, abrindo caminho para proposições menos seguras (baseadas em componentes importados e em “sobras” de políticas de incentivo estrangeiras) do ponto de vista da cadeia de suprimento (eólica e fotovoltaica, por exemplo).

A resolução anexada a este trabalho enfatiza a necessidade de fomento às cadeias de suprimento, incentivando conteúdo local por meio da realização de ACVEs que os identifique. Estes ACVEs permitirão o reconhecimento do nível de segurança e sustentabilidade dos empreendimentos por meio de uma métrica simples que verificará a eficiência dos sistemas.

Qualquer proposta que venha a favorecer uma ou outra tecnologia de conversão de irradiação solar em eletricidade deve levar em conta esses aspectos e considerar esta particularidade. Assim procedendo, estaremos agregando segurança à matriz energética do Brasil e aumentando sua capacidade de armazenamento sustentável de energia.

REFERÊNCIAS*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA ELÉTRICA E ELETRÔNICA (ABINEE). ABINEE: 2011. Disponível em: <http://www.abinee.org.br/informac/arquivos/apre1503.pdf>: Acesso em: 13 jul. 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. *Chamada n. 013/2011.* ANEEL: 2011, p. 4. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/PeD_2011-ChamadaPE13-2011.pdf>: Acesso em: 13 jul. 2013.

_____. *Atlas de energia elétrica.* 2. ed. Brasília, 2002.

_____. *Atlas de energia elétrica*. 2. ed. Brasília, 2005.

_____. *Atlas do setor elétrico brasileiro*. 3. ed. Brasília, 2008. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/visualizar_texto.cfm?idtxt=1689>: Acesso em: 4 jul. 2012.

_____. Banco de informações da geração. Brasília, 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp/>: Acesso em: 6 ago. 2012.

ALCEMA, E. et al. *Environmental impacts of crystalline silicon photovoltaic module production.* Utrecht: Copernicus Institute of Sustainable Development and Innovation, 2006.

ASSOCIAÇÃO DA INDÚSTRIA DE COGERAÇÃO DE ENERGIA (COGEN). *Origens e objetivos.* Disponível em: <http://www.cogen.com.br/origem.asp>: Acesso em: 18 jul. 2012.

BARBOSA, C. et al. Situação da geração elétrica através de sistemas híbridos no estado do Pará e perspectivas frente à universalização da energia elétrica. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 5., 2004, Campinas. *Proceedings on line…* 2004. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=MSC0000000022004000200052&lng=en&nrm=abn>: Acesso em: 13 jul. 2012.

BIELLO, D. Where did the carter white house's solar panels go? *Scientific American,* Ago. 2010. Disponível em: <http://www.scientificamerican.com/article.cfm?id=carter-white-house-solar-panel-array>: Acesso em: 13 jun. 2012.

BLANKENSHIP, R. et al. Comparing photosynthetic and photovoltaic efficiencies and recognizing the potential for improvement*. Science,* v. 332, n. 6031, p. 805-809, May 2011.

---

* De acordo com:
ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023**: informação e documentação: referências: elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. *Programa de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica.* Brasília, 2007. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/menu/programa/Energias_Renovaveis.html>: Acesso em: 16 jul. 2012.

BRASIL ENERGIA. Cenários opostos para energia solar. *Revista Brasil Energia,* set. 2001. Disponível em: <http://www.energiahoje.com/brasilenergia/noticiario/2001/09/01/362076/cenarios-opostos-para-energia-solar.html>: Acesso em: 8 mar. 2012.

BRASIL. Lei nº 11.465, de 28.3.2007. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2007/Lei/L11465.htm>: Acesso em: 6 jul. 2012.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). *Programa de incentivo às fontes alternativas de energia elétrica.* Brasília, 2009. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/proinfa/galerias/arquivos/apresentacao/PROINFA-ANEXO1-InstitucionalMME.pdf>: Acesso em: 12 jul. 2012.

BURWELL, C. Solar biomass energy: an overview of U.S. Potential. *Science,* v. 199, n. 4333, p. 1041-1048, Mar 1978. Disponível em: <http://www.sciencemag.org/content/199/4333/1041>: Acesso em: 12 jul. 2012.

CANAL ENERGIA*. MPX entra com pedido para ampliar capacidade da usina solar de Tauá.* Agência Canal Energia 23/02/2012. Disponível em <http://www.chesf.gov.br/portal/page/portal/chesf_portal/paginas/comunicacao/comunicacao_ultimas_noticias/conteiner_noticias?p_id_noticia=465609&p_pag_inicio=431&p_pag_fim=440>: Acesso em: 15 fev. 2012.

CASTRO, N.; BRANDÃO, R.; DANTAS, G. *Importância e perspectivas da bioeletricidade sucroenergética na matriz elétrica brasileira.* Disponível em: <http://www.unica.com.br/downloads/estudosmatrizenergetica/pdf/Matriz_Bioeletricidade_Castro5.pdf>: Acesso em: 16 jul. 2012.

CASTRO, N.; DANTAS, G. *A bioeletricidade sucroalcooleira e o hiato entre oferta potencial e oferta efetiva.* UFRJ, Grupo de Estudos do Setor Elétrico. Rio de Janeiro: GESEL. Disponível em: <http://ww2.ie.ufrj.br/infosucro/estudos/oferta.pdf>: Acesso em: 18 jul. 2012.

CENTER FOR CLIMATE AND ENERGY SOLUTIONS. *Freight Transportation.* Disponível em: <http://www.c2es.org/technology/factsheet/FreightTransportation>: Acesso em: 17 abr. 2012.

CENTER FOR CLIMATE AND ENERGY STUDIES (CCES). *Freight Transportation.* Table 1. Disponível em: <http://www.c2es.org/technology/factsheet/FreightTransportation>: Acesso em: 18 mar. 2012.

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY (CIA). Disponível em: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>: Acesso em: 13 jul. 2012.

CENTRO DE REFERÊNCIA PARA ENERGIA SOLAR E EÓLICA SÉRGIO DE SALVO BRITO (CRESESB). *Energia solar e eólica no Brasil – Projetos implementados.* Disponível em: <http://vsites.unb.br/fav/renova/reno/Projesoleo.pdf>: Acesso em: 13 jul. 2012.

_____. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/index.php?link=/o_cresesb.htm>: Acesso em: 13 jul. 2012.

COMPANHIA DE ELETRICIDADE DO ESTADO DA BAHIA. *Aplicação de sistemas Fotovoltaicos no Programa Luz Para Todos da COELBA.* Belém, 2010. Disponível em: <http://www.ufpa.br/inct-ereea/Coelba.pdf>: Acesso em: 13 jul. 2012.

CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENERGIA RENOVÁVEL (CIER). *Energia Solar Fotovoltaica, Estágio Atual e Perspectivas*. Disponível em: <http://www.agg.ufba.br/cier_solarfotovoltaica.pdf>: Acesso em: 13 jul. 2012.

COSTA, R.; PRATES, C. O Papel das fontes renováveis de energia no desenvolvimento do setor energético e barreiras a sua penetração no mercado. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 21, p. 5-30, 2005. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/bnset/set2102.pdf>: Acesso em: 17 abr. 2012.

CENTRAL INTELLIGENCE AGENCY (CIA). *The World Factbook.* Disponível em: <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/>: Acesso em: 13 mar. 2012.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA DE PEQUENAS CENTRAIS HIDRELÉTRICAS. *Tolmasquin defende hidrelétricas.* Disponível em: <http://www.cerpch.unifei.edu.br/noticias/tolmasquim-defende-hidreletricas-no-rio-20.html>: Acesso em: 4 jul. 2012.

DANTAS, D. *Uso da biomassa da cana-de-açúcar para geração de energia elétrica: análise energética, exergética e ambiental de sistemas de cogeração em sucroalcooleiras do interior paulista*. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2010.

DIÁRIO DO COMÉRCIO E INDÚSTRIA. *Depois da queda, Dedini prevê crescer até 40%.* 09 jun. 2010. Disponível em: <http://www.cimm.com.br/portal/noticia/exibir_noticia/6998-depois-da-queda-dedini-preve-crescer-ate-40>: Acesso em: 12 jul. 2012.

DIRKSEN, K. *Beyond photovoltaics: rebirth of the other solar power.* Disponível em: <http://www.huffingtonpost.com/kirsten-dirksen/beyond-photovoltaics-rebi_b_217588.html>: Acesso em: 13 jul. 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Balanço energético nacional (BEN) 2010*. Rio de Janeiro, 2010.

_____. *Plano decenal de expansão de energia 2020*. Rio de Janeiro: EPE, 2011.

_____. *Balanço Energético Nacional* (BEN). Rio de Janeiro: 2011.

_____. *Balanço Energético Nacional (BEN) 2010*. Rio de Janeiro, 2010.

EXCELÊNCIA ENERGÉTICA. *Leilão de energia de reserva 2010*: primeiro ato. Disponível em: <http://www.excelenciaenergetica.com.br/pdf/arquivo_89.pdf>: Acesso em: 18 jul. 2012.

EXCELÊNCIA ENERGÉTICA. *Preços teto históricos corrigidos pelo IPCA.* Disponível em: <http://www.excelenciaenergetica.com.br/>. Acesso em: 5 jul. 2012

FERRARI FILHO, F. *Desempenho de um motor diesel operando no modo bi-combustível diesel-álcool.* Rio de Janeiro: PUC, 2008.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). *Energy conversion by photosynthetic organisms.* Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/w7241e/w7241e06.htm#TopOfPage>: Acesso em: 13 jul. 2012

FOUKAL, P.; LEAN J. An empirical model of total solar irradiance: variation between 1874 and 1988. *Science,* n. 2, p. 556-558, Feb 1990.

GABRIEL FILHO, L. et al. Estudo teórico sobre cogeração de energia, seus equipamentos e ciclos. In: FÓRUM AMBIENTAL DA ALTA PAULISTA, 3., 2007, Tupã. *Anais...* Tupã, 2007. p. 1-21.

GAERTNER, R. *Germany embraces the sun*. Wired 07/09/2001. Disponível em: <http://www.wired.com/science/discoveries/news/2001/07/45056?currentPage=all>: Acesso em: 12 jul. 2012.

GALDINO, M.; LIMA, J. *PRODEEM.* The Brazilian programme for rural electrification using photovoltaics. In: RIO 02 - WORLD CLIMATE & ENERGY EVENT, 2002, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro, 2002. Disponível em: <http://www.rio02.com/proceedings/pdf/077_Galdino.pdf>: Acesso em: 11 fev. 2012.

HANNON, B. et al. Energy and labor in the construction sector. *Science*, v. 110, p. 837-847, Nov 1978.

HIRSCH, R. Impending United States energy crisis. *Science,* v. 235, p. 1467-1473, Mar 1987.

IBRAHIM, H.; ILINCA, A.; PERRON, J. Energy storage systems: characteristics and comparisons. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Cambridge, v. 12, n. 5, p. 1221-1250, 2008.

INGECON. *Ingecon sun 100 y 100 TL información técnica de producto.* Ingecon, 2012. Disponível em: <http://www.ritrinsa.com/ingecon_sun_100-100TL.pdf>: Acesso em: 13 jul. 2012.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *World Energy Outlook 2010*. Paris: EIA, 2010.

_____. *World energy outlook 2010*. Paris: 2010.

_____. *Key world energy statistics 2010*. 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO 4040: Environmental management*: Life assessment – Principles and Escopo. Genebra: ISO, 2006.

_____. *World Energy Outlook 2010*. Paris: 2010. p. 5, 10. Figura 1.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO 4040:* Environmental management: Life assessment – Principles and framework. Genebra, 2006

JAIN, M. C. *Textbook of engineering physics* (Part I). New Delhi: PHI Learning Pvt. Ltd., 2009.

JANK, M. S. A relação do setor sucroalcooleiro com o meio ambiente. In: FÓRUM INTERNACIONAL SOBRE O FUTURO DO ÁLCOOL, 2007, Sertãozinho. *Anais...* Sertãozinho: ÚNICA, 2007. Disponível em: <http://www.riosvivos.org.br/dowloads/jank_unica.pdf>: Acesso em: 16 jul. 2012.

JORNAL DA ENERGIA. *MPX recebe painéis fotovoltaicos para a usina solar de Tauá.* São Paulo, 2011. Disponível em: <http://jornaldaenergia.com.br/ler_noticia.php?id_noticia=5605&id_tipo=3&id_secao=8&id_pai=2&titulo_info=MPX%20recebe%20pain%26eacute%3Bis%20fotovoltaicos%20para%20a%20usina%20solar%20de%20Tau%26aacute%3B>: Acesso em: 20 fev. 2012.

_____. *MPX de olho em um possível leilão solar.* São Paulo, 2012. Disponível em: <http://www.jornaldaenergia.com.br/ler_noticia.php?id_noticia=9110&id_tipo=3&id_secao=8&id_pai=2>. Acesso em: 20 fev. 2013.

KEOLEIAN, G.; LEWIS, G. Application of life-cycle energy analysis to photovoltaic module design. Progress. In: _____. *Photovoltaics research and applications*. Michigan: John Wiley & Sons, 1997. v. 5. p. 287-300.

KPMG INTERNATIONAL. *Taxes and incentives for renewable energy.* Disponível em:<http://www.kpmg.com/Global/en/IssuesAndInsights/ArticlesPublications/Documents/taxes-incentives-renewable-energy-2012.pdf>: Acesso em: 13 jul. 2012.

KITAYAMA, O. *Tecnologia e operação de unidades de bioeletricidade a partir de biomassa de cana-de-açúcar*: condições operacionais. São Paulo: UNICA, 2007. Disponível em: <http://www.saneamento.sp.gov.br/bio_apresen/On%C3%B3rio.pdf>: Acesso em: 20 maio 2012.

KYOCERA. *Catálogo painel fotovoltaico KD-215.* Disponível em: <http://www.wholesalesolar.com/pdf.folder/module%20pdf%20folder/KD215GX-LPU.pdf>: Acesso em: 20 fev. 2012.

LAMONICA, H. *Produção de vapor e eletricidade – evolução do setor sucroalcooleiro.* II GERA: Workshop de Gestão de Energia e Resíduos na Agroindústria Sucroalcooleira. CTC: Pirassununga, 2007. Disponível em: <http://www.fzea.usp.br/green/GERA/Helcio%20M.%20Lamonica.pdf>: Acesso em: 16 jul. 2012.

LESLIE, M. On the origin of Photosynthesis. *Science,* v. 323, n. 5919, p. 1286-1287, Mar. 2009. Disponível em: <http://www.sciencemag.org/content/323/5919/1286.short>: Acesso em: 12 jul. 2012.

LEWIS, G.; KEOLEIAN, G. *Application of life-cycle energy analysis to photovoltaic module.* Progress in Photovoltaics: Research and Applications, 1997.

LEWIS, S.; NOCERA, D. *Powering the planet*: chemical challenges in solar energy utilization. Proceedings of the National Academy of Sciences. PNAS, 2006.

LOGUS ENGENHARIA. *Energia emergencial PIE-RP.* Disponível em: <http://www.logoseng.com.br/logos/pt-br/servicos/ProjectPage.asp?s=0000%0233%CURM_BOX&p=/logos/pt-br/servicos/ProjectPage.asp&i=3&tsc=14&ith=>: Acesso em: 16 jul. 2012.

LOSTER M. *Total primary energy supply from sunlight.* 2010. Disponível em: <http://www.ez2c.de/ml/solar_land_area/index.html>: Acesso em: 13 jul. 2012.

MACEDO, I. et al. *Assessment of greenhouse gas emissions in the production and use of fuel ethanol in Brazil*. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, 2004.

MAPLECROFT. *France, Germany, Italy, Japan, UK and USA rated 'high risk' for short-term energy security.* Canada most secure. Maplecroft report 02/06/2011. Disponível em: <http://maplecroft.com/about/news/energy_security_2011.html>: Acesso em: 13 ago. 2012.

MBFagribusiness. *A venda da Usina Santa Lydia foi um péssimo negócio.* Disponível em: <http://www.mbfagribusiness.com/materias/santalidia.htm>: Acesso em: 18 abr. 2013.

MCDONOUGH, W.; BRAUMGART, M. *Cradle to cradle*: remaking the way we make things. New York: North Point Press, 2002.

MITCH, L. On the origin of photosynthesis. *Science,* v. 323, n. 5919, p. 1286-1287, Mar 2009.

MORTON, O. *Eating the sun*: how plants power the planet. London: Harper: 2008.

MOSZKOWICZ, M. *Workshop inovação para o estabelecimento do setor de energia solar fotovoltaica no Brasil*. Rio de Janeiro: MPX Energia, 2011.

MPX. *Solar Tauá.* Disponível em <http://www.mpx.com.br/pt/nossos-negocios/geracao-de-energia/usinas-em-operacao/Paginas/solar-taua.aspx>: Acesso em: 13 jul. 2012.

_____. *Solar Tauá*: engenharia básica. Disponível em: <http://www.mpx.com.br/pt/nossos-negocios/geracao-de-energia/usinas-em-operacao/solar-taua/Paginas/engenharia-basica.aspx>: Acesso em: 13 jul. 2012.

_____. **Solar Tauá: Parcerias**. Disponível em: <http://www.mpx.com.br/pt/nossos-negocios/geracao-de-energia/usinas-em-operacao/solar-taua/Paginas/parcerias.aspx>: Acesso em: 13 jul. 2012.

NEW YORK TIMES (NYT). *Vast power of the sun is tapped by battery using sand ingredient*. Apr 1954. Disponível em: <http://www.nytimes.com/packages/pdf/science/TOPICS_SOLAR_TIMELINE/solar1954.pdf>: Acesso em: 18 jul. 2012.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). Quadrimestral da Carga PEN. 2ª Revisão. Rio de Janeiro, 2011.

_____. *BEN 2011*. Rio de Janeiro, 2011. p. 20. Obs.: Slide apresentado por Hermes Chipp em palestra no Enase 2011.

_____. *BEN 2011*. Rio de Janeiro: 2011.p. 22. Obs.: Slide apresentado por Hermes Chipp em palestra no Enase 2011, Figura 3.

_____. *BEN 2011*. Rio de Janeiro: 2011. Obs.: Slide apresentado por Abeolica em palestra no Enase 2011

_____. *PEN 2011*. Rio de Janeiro: 2011. p. 20. Obs.: Slide apresentado por Hermes Chipp em palestra no Enase 2011.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). *Our common future.* p. 57, 1987.

OREGON. **Biomass energy technology**. Disponível em: <http://www.oregon.gov/ENERGY/RENEW/Biomass/bioenergy.shtml#combustion)>: Acesso em: 13 jul. 2012.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNDAS (ONU). *Our commom future*. Oxford: Oxford University Press, 1987. p. 57.

OWENSBORO COMMUNITY COLLEGE (OCC). *Bio notes.* Disponível em: <http://legacy.owensboro.kctcs.edu/gcaplan/bio/notes/BIO%20Notes%20E%20Photosynthesis.htm>: Acesso em: 27 mar. 2012.

_____. *Bio notes.* Disponível em: <http://legacy.owensboro.kctcs.edu/gcaplan/bio/notes/BIO%20Notes%20E%20Photosynthesis.htm>: Acesso em: 13 jul. 2012.

PAULA, L. de. *Análise termoeconômica do processo de produção de cimento portland com co-processamento de misturas de resíduos.* Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2009.

POTOCNIK, J. Renewable energy sources and the realities of setting an energy agenda. *Science,* v.315, Feb 2007.

PS-15 The 15th International Congress on Photosynthesis Research. Saint Louis-EUA (PS 15). Disponível em: <http://biology4.wustl.edu/ps2013/scipro.htm>. Acesso em: 13 jul. 2012.

RIBEIRO, F. et al. *O setor elétrico brasileiro no enfrentamento dos desafios climáticos*: oportunidades ocultas no aproveitamento de desperdícios. In: Mitigação de gases de efeito estufa: A experiência setorial e regional no Brasil. São Paulo: USP, 2009 (Brochura).

SAKAKURA, S. *Sunshine project of the Japanese Government*. In: Energy technology II; Proceedings of the Second Conference, Washington, D. C., May 12-14, 1975. Washington, D. C., Government Institutes, Inc., 1975, p. 105-121.

SANDIA NATIONAL LABORATORIES (SNL). *The photovoltaic effect*. Disponível em: <http://photovoltaics.sandia.gov/docs/PVFEffIntroduction.htm>. Acesso em: 10 abr. 2012.

SCARPINELLA, G. et al. Cana-de-açúcar no Estado de São Paulo, seus impactos ambientais e influência na demanda e disponibilidade de água. In: SEREA – SEMINÁRIO IBEROAMERICANO SOBRE PLANIFICACIÓN, PROYECTO Y OPERACIÓN DE SISTEMAS DE ABASTECIMENTO DE ÁGUA, 9., 2009, Valencia. *Anais...* Valencia, 2009.

SCHIEMER, F. *Comparação de indicadores de eficiência energética e exergética em duas indústrias do setor sucroalcooleiro*. Cascavel: Universidade Estadual do Oeste do Paraná, 2006.

SELF ENERGY. *Co-Geração*. 2008. Disponível em: <http:\www.selfenergy.eu>. Acesso em: 16 jul. 2012.

SHAH, A. et al. Photovoltaic technology: the case for thin-film solar cells. *Science*, v. 285, n. 5428, p. 692-698, Jul 1999.

SMIL, V. *Energy at the crossroads.* Bruxelas: Organisation for Economic Co-operation and Development, 2006.

_____. *General energetics:* energy in the biosphere and civilization. New York: Wiley, 1991. 240 p.

SILVESTRIN, C. Bioeletricidade 2011-2020: agenda para expansão de oferta planejada. In: FÓRUM CONDIÇÕES E COMPETITIVIDADE PARA O LEILÃO DE FONTES ALTERNATIVAS - COGEN, 2010, Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.cogen.com.br/workshop/2010/Bioeletricidade_2011_2020_27052010.pdf > Slide 6. Acesso em: 18 jul. 2012.

SINCOPETRO. *Manual de testes*. Disponível em: <http://www.sincopetro.org.br/conteudo.asp?xmenu=121>. Acesso em: 9 abr. 2012.

SOKOLOV, A. et al. *Integrated global system model*. Cambridge: MIT, 2007.

SOLAR FEEDS. Chinese PV market just getting started. Disponível em: <http://www.solarfeeds.com/chinese-pv-market-just-getting-started/>. Acesso em: 13 abr. 2012.

SOUZA, Z.; AZEVEDO, P. *Energia elétrica excedente no setor sucroalcooleiro*: um estudo a partir de usinas paulistas. Revista de Economia e Sociologia Rural, v. 44, n. 2, Brasília: 2006, p. 20-35.

STEWART, D.; WILCZEWSKI, W. How Japan became an efficiency superpower. *Policy innovations*. Feb 2009. Disponível em: http://www.policyinnovations.org/ideas/briefings/data/000102. Acesso em: 30 mar. 2012**.**

TAVARES, L. *Avaliação da retração autógena em concretos de alto desempenho com diferentes adições*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

TOLMASQUIM, M. *Estatal finaliza estudo sobre a fonte e as formas de entrada na matriz energética do Brasil*. Jornal da Energia, 28.12.2011 Disponível em: <http://www.canalenergia.com.br/zpublisher/materias.asp?secao=R%E1dio&id=87036>. Acesso em: 13 jul. 2012.

TOPEL, B. New enegy sources and technologies experiences and perspectives: photovoltaics. In: UNESCO WORLD SOLAR SUMMIT PARIS, 1993, Paris. *Anais...* Paris, 1993. Disponível em: <http://unesdoc.unesco.org/images/0009/000948/094876eb.pdf>.
Acesso em: 10 abr. 2012.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA). *Quem somos*: histórico e missão. Disponível em: <http://www.unica.com.br/quemSomos/texto/show.asp?txtCode={A888C6A1-9315-4050-B6B9-FC40D6320DF1}>. Acesso em: 18 jul. 2012.

_____. *Usina virtual*. Disponível em: <http://www.unica.com.br/usina-virtual/>. Acesso em: 15 mar. 2012.

_____. *Complementaridade bagaço/hidrelétrica.* Disponível em: <http://www.unica.com.br/downloads/estudosmatrizenergetica/pdf/Matriz_Bioeletricidade_Castro5.pdf>, página 9. Acesso em: 5 jul. 2012.

US DEPARTMENT OF ENERGY (USDE). *The history of solar*. Disponível em: <http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2012.

_____. *The history of solar*. Disponível em: <http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/solar_timeline.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2012.

US ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (EIA). *World Total Net Electricity Consumption, 1980-2005*. Disponível em: <http://www.eia.gov/countries/>. Acesso em: 27 mar 2012.

VALENTINI, J. *Metodologia para Elaboração de Orçamentos para Obras Civis*. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

VIEIRA, S. O. J. *Estudo de sistemas de cogeração e geração termoelétrica através da análise termoeconômica*. In: BRAZILIAN CONGRESS OF ENGINEERING AND THERMAL SCIENCES – ENCIT, 7., 1998, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: PUC, 1998. p. 381-386.

THE WHITE HOUSE. *Blueprint for a secure energy future*. Washington, 2011. Disponível em: <http://www.whitehouse.gov/sites/default/files/blueprint_secure_energy_future.pdf>. Acesso em: 8 ago. 2012.

WIKIPEDIA. *1973 oil crisis*. Disponível em: <http://en.wikipedia.org/wiki/1973_oil_crisis>. Acesso em: 10 abr. 2012.

WILSON, A. Cement and concrete: environmental consideration. *Environmental Building News*, 1993.

WORLD ENERGY COUNCIL (WEC). *Comparison of energy systems using life cycle assessment.* London: WEC, 2004.

ANEXO – Proposta de resolução para a ANEEL: identificação de vantagem para o país na realização de análise do ciclo de vida energético para geração de energia solar fotossintética

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL
RESOLUÇÃO NORMATIVA Nº XXX, DE XX DE XXXX DE XXXX

Estabelece as condições gerais para:

1- A realização de Análise de Ciclos de Vida Energéticos (ACVE) de diferentes tecnologias.
2- Comparação entre a eficiência da conversão fotossintética e conversão fotovoltaica na geração de energia através das respectivas ACVEs a título de exemplo.
3- Elementos para o desenvolvimento de cadeias produtivas de uso intensivo de conteúdo local baseado em eficiência das tecnologias verificadas em seus respectivos ACVEs.

O DIRETOR-GERAL DA AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, no uso de suas atribuições regimentais, de acordo com deliberação da Diretoria, tendo em vista o disposto na Lei nº 9.427, de 26 de dezembro de 1996, no art. 4º, inciso XX, Anexo I, do Decreto nº 2.335, de 6 de outubro de 1997, na Lei nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, na Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004, no Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004, o que consta no Processo nº XXXXXXX e considerando:

As contribuições recebidas na Consulta Pública nº XX/2014, realizada por intercâmbio documental no período de XX de XXXX a X de XXXXXX de 2014 e as contribuições recebidas na Audiência Pública nº XX/2014, realizadas no período de XX de xxxxx a XX de xxxxxxxx de 2014, resolve:

CAPÍTULO I – DAS DISPOSIÇÕES PRELIMINARES

Art. 1º – Para efeitos desta Resolução, ficam adotadas as seguintes definições:

I – ACVE: Análise do Ciclo de Vida Energético. Processo de obtenção do balanço de energia a partir da análise da energia agregada x energia gerada pelos diferentes processos.

II – Conversão Fotossintética: processo em que a irradiação solar, o gás carbônico e a água são transformados em açúcares por meio da fotossíntese. Do ponto de vista da produção de energia elétrica, estes açúcares podem ser oxidados ou fermentados, gerando calor que pode ser utilizado na produção de energia elétrica por meio de uma série de processos. O processo mais utilizado é o da oxidação total, através de combustão direta, que é realizada a partir da energia armazenada nas ligações químicas incluídas nas moléculas resultantes.

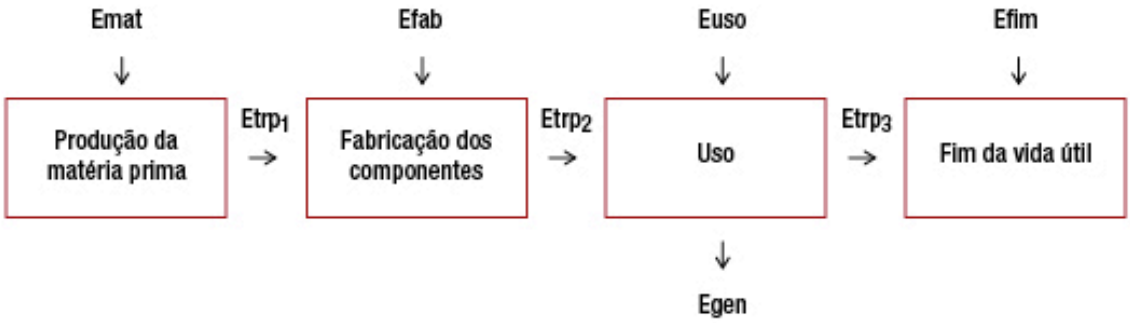
III – Conversão Fotovoltaica: Processo no qual uma célula fotovoltaica

fabricada a partir de material semicondutor absorve os fótons irradiados pelo sol em quantidade suficiente para que os elétrons saiam da banda de valência para a banda de condução, criando um gradiente de transporte de elétrons, ou seja, uma corrente elétrica.

IV – Sistema de comparação entre Conversão Fotossintética e Fotovoltaica na geração de Energia Solar: sistema no qual a análise dos ciclos de vida energéticos das duas diferentes formas de conversão cria condições para que se faça uma comparação efetiva pelos agentes com vistas à distribuição isonômica de eventuais incentivos.

CAPÍTULO II – DA METODOLOGIA PARA A ANÁLISE DO CICLO DE VIDA ENERGÉTICO

Proposição de Escopo dos ACVEs:



Estágios de ciclo de vida de uma usina de geração de energia Emat: energia gasta na produção da matéria-prima; Efab: energia gasta na fabricação dos componentes da usina; Euso: energia consumida no funcionamento da usina; Egen: energia gerada pela usina; Efim: energia gasta na desmobilização da usina. Etrp n: energia gasta no transporte entre cada uma das etapas.

Figura II.2 – Escopo de um ACVE para o segmento de eletricidade r
Fonte: adaptado de KEOLEIAN; LEWIS, 1997

Todos os recursos (insumos) utilizados no ACVE conhecerão uma redução para um denominador (balanço de MWh) que leve em conta consumo detalhado de energia em sua elaboração. A definição dos limites do sistema se dará em função de MWh agregados e MWh produzidos. Isso especifica a unidade MWh como unidade funcional de relação entre os fluxos (HANNON, 1978).

No escopo, o sistema se limita a MWh gerados, prontos para alimentar o grid. Desta forma, perdas características relativas à distribuição e transmissão não serão consideradas.

As categorias do Escopo ganham finalmente a descrição abaixo, que encerra a apresentação da escolha metodológica realizada.

(A) Emat: Extração, tratamento básico dos materiais e posterior transporte: processo que resultará na obtenção da matéria-prima necessária para a produção dos componentes dos equipamentos.

Inputs: materiais, MWh consumido.

(B) Efab: Construção da unidade geradora e posterior transporte: a matéria-prima obtida em A passa por este processo para ser adequada à produção de equipamentos e componentes para ligação à rede.

Inputs: materiais de A e outros materiais, MWh consumido.

(C) Euso: Operação da usina e geração de energia.

Inputs: MWh consumido.

(D) Egen: Energia gerada.

Outputs: MWh gerado.

(E) Efim: Desativação/Desmontagem/Reciclagem: Inclui máquinas para desmontagem dos equipamentos; alguns materiais utilizados são parcialmente reciclados e outros, triturados.

Inputs: MWh consumido

(F) $Etrp_n$: inclui o transporte dos equipamentos nas diversas etapas do ciclo de vida da usina. Após a desativação, inclui transporte dos resíduos para o depósito ou para o local de reciclagem.

Inputs: MWh consumido

Essas categorias levam em consideração que um sistema de geração de eletricidade é a soma de um conjunto de processos unitários que podem sobreviver de certa forma desconectados, mas que só ganham sentido quando arranjados de forma estruturada. Assim, a resultante do sistema esperada é o delta MWh resultado da equação MWh out - MWh in.

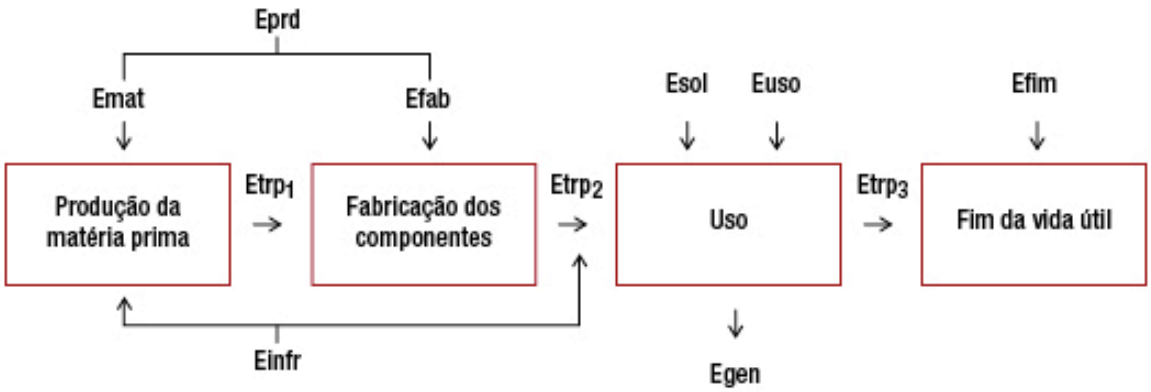
Essa função caracterizará, portanto, a propriedade essencial de um sistema de geração, sua sustentabilidade, e não mais o fornecimento de energia elétrica propriamente dito. Interessa, por isso, o balanço energético resultante.

Mwhs in e Mwhs out serão identificados por meio da análise de processos de energia, materiais básicos e auxiliares. Acredita-se que o balanço energético será aqui suficiente para a comparação entre as tecnologias, visto que, sob nossa perspectiva, o delta resultante representa o resultado da energia gerada menos a energia consumida na aplicação do conjunto de recursos. Enfim, Energia Líquida gerada.

CAPÍTULO III – DOS ELEMENTOS ENVOLVIDOS NA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DA CONVERSÃO FOTOVOLTAICA

Art. 1º – Os limites do sistema fotovoltaico são determinados com vistas a se determinar o superávit energético (em MWh) produzido pela unidade em seu ciclo de vida.

Estágios de ciclo de vida de um sistema fotovoltaico:



§1º – Os estágios de ciclo de vida de um sistema fotovoltaico ficam assim definidos:

Emat: energia gasta na produção da matéria-prima; Efab: energia gasta na fabricação dos módulos e demais componentes, Esol: irradiação solar na área da usina; Euso: energia consumida no funcionamento da usina; Egen: energia gerada pelos painéis fotovoltáicos; Efim: energia gasta na desmobilização da usina. Etrp n: energia gasta no transporte entre cada uma das etapas; Eprd: energia total gasta na produção dos componentes = Emat + Etrp1 + Efab; Einfr: energia total gasta para a implantação de toda a infraestrurura = Eprd + Etrp2.

§2º – O conjunto de equações que compõem esta proposta de resolução tem por objetivo a obtenção da eficiência da tecnologia. A eficiência da unidade é calculada somando-se todo o gasto energético com a construção, operação e desmobilização da usina e dividindo-o pela energia proveniente da radiação solar incidente na área da usina durante a sua vida útil.

§3º – Equações e definições.

Energia gasta na produção da matéria-prima e fabricação dos componentes da usina:

$$Eprd = Emat + Etrp1 + Efab$$

Onde:

Emat: energia gasta na produção da matéria-prima.

Etrp1: energia gasta no transporte da matéria-prima para o local onde os componentes são fabricados.

Efab: energia gasta na fabricação dos componentes da usina (inclui energia gasta na montagem da usina).

Energia total gasta para a implantação e operação de toda a infraestrurura:

$$Einfr = Eprd + Etrp2 + Euso$$

Onde:

Eprd: Energia gasta na produção da matéria-prima e fabricação dos componentes.

Etrp2: Energia gasta no transporte dos componentes da usina para o local de construção da usina.

Euso: Energia consumida no funcionamento da usina.

Energia líquida gerada pela usina durante seu ciclo de vida:

$$Eliq = Egen – Einfr$$

Onde:

Egen: Energia gerada pela usina.

Einfr: Energia total gasta para a implantação e operação de toda a infraestrurura.

Eficiência da conversão fotovoltaica:

$$Eficiência = Eliq / Esol$$

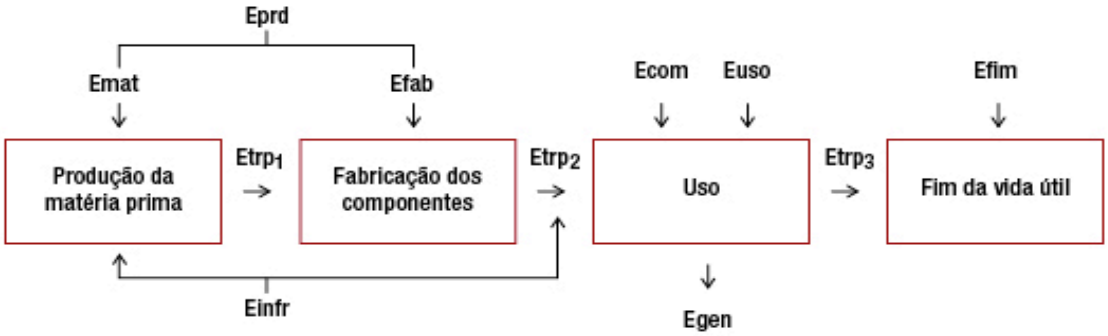
Onde:

Eliq: Energia líquida gerada pela usina durante seu ciclo de vida.

Esol: Irradiação solar na área da usina durante sua vida útil.

CAPÍTULO IV – DOS ELEMENTOS ENVOLVIDOS NA ANÁLISE DO CICLO DE VIDA DA CONVERSÃO FOTOSSINTÉTICA

Art. 1º – Os limites do sistema fotossintético são determinados com vistas a se determinar o superávit energético (em MWh) produzido pela unidade em seu ciclo de vida.



§1º – Os estágios de ciclo de vida de um sistema fotovoltaico ficam assim definidos:

Emat: energia gasta na produção da matéria-prima; Efab: energia gasta na fabricação dos componentes da usina, Ecom: energia do combustível utilizado; Euso: energia consumida no funcionamento da usina; Egen: energia gerada pela usina; Efim: energia gasta na desmobilização da usina. Etrp n: energia gasta no transporte entre cada uma das etapas Eprd: energia total gasta na produção dos componentes = Emat + Etrp1 + Efab; Einfr: energia total gasta para a implantação de toda a infraestrurura = Eprd + Etrp2.

§2º – O conjunto de equações que compõem esta proposta de resolução tem

por objetivo a obtenção da eficiência da tecnologia. A eficiência da unidade é calculada somando-se todo o gasto energético com a construção, operação e desmobilização da usina e dividindo-o pela energia proveniente do combustível utilizado pela usina durante a sua vida útil.

§3º – Equações e definições.

Energia gasta na produção da matéria-prima e fabricação dos componentes:

$$Eprd = Emat + Etrp1 + Efab$$

Onde:

Emat: energia gasta na produção da matéria-prima.

Etrp1: energia gasta no transporte da matéria-prima para o local onde os componentes são fabricados.

Efab: energia gasta na fabricação dos componentes da usina (inclui energia gasta na montagem da usina).

Energia total gasta para a implantação e operação de toda a infraestrurura:

$$Einfr = Eprd + Etrp2 + Euso.$$

Onde:

Eprd: Energia gasta na produção da matéria-prima e fabricação dos componentes.

Etrp2: Energia gasta no transporte dos componentes da usina para o local de construção da usina.

Euso: Energia consumida no funcionamento da usina.

Energia líquida gerada pela usina durante seu ciclo de vida:

$$Eliq = Egen – Einfr$$

Onde:

Egen: Energia gerada pela usina durante toda a sua vida útil.

Einfr: Energia total gasta para a implantação e operação de toda a infraestrurura.

Eficiência da conversão fotossintética:

$$Eficiência = Eliq / Ecom$$

Onde:

Eliq: Energia líquida gerada pela usina durante seu ciclo de vida.

Ecom: Energia do combustível utilizado pela usina durante sua vida útil.

CAPÍTULO V – DA METODOLOGIA PARA COMPARAÇÃO ENTRE CONVERSÃO FOTOSSINTÉTICA E CONVERSÃO FOTOVOLTAICA NA GERAÇÃO DE ENERGIA SOLAR. ORIENTAÇÃO PARA A ADOÇÃO DE POLÍTICAS DE INCENTIVO A CONTEÚDO LOCAL

I – A Eficiência do Capex é verificada pela divisão da energia envolvida na obtenção e operação da infraestrutura necessária para a geração pela energia

gerada pela unidade durante seu tempo de vida útil. Esse índice mede a relação de quanta energia é gasta na mobilização, no uso e na desmobilização da infraestrutura da usina em relação a quanto de energia que ela produz duranta a sua vida útil.

A eficiência do Capex é dada pela seguinte fórmula:

$$Ecapex=Einfr/Egen$$

Onde:

Einfr: Energia total gasta para a implantação e operação de toda a infraestrurura.

Egen: Energia gerada pela usina durante toda a sua vida útil.

II – A Taxa de Conversão de Energia: a eficiência de conversão da tecnologia utilizada em casa usina. Usada em conjunto com a Eficiência de conversão de cada usina, ela nos permite inferir o impacto que a mobilização, utilização e mobilização da infraestrutura tem no ciclo de vida de cada usina.

A Taxa de conversão de energia é dada pelas seguintes fórmulas:

$$Tconv = Egen/Esol, \text{ para o caso da conversão fotovoltaica;}$$
$$Tconv = Egen/Ecom, \text{ para o caso da conversão fotossintética.}$$

Onde:

Egen: Energia gerada pela usina durante toda a sua vida útil.

Esol: Irradiação solar na área da usina durante sua vida útil.

Ecom: Energia do combustível utilizado pela usina durante sua vida útil.

III – Recomenda-se que as tecnologias que apresentarem uma melhor eficiência sejam incentivadas, no que diz respeito ao desenvolvimento de conteúdo local.

Nesta visão, o governo se responsabilizaria pelo desenvolvimento local (nacional) de fontes energéticas de curto/médio prazo, de tal forma que o desenvolvimento tecnológico obtido garantiria uma posição de destaque para o país na Economia da Energia Global. Assim, buscar-se-ia atacar a volatilidade dos preços de insumos e tecnologias energéticas, permitindo aos consumidores o acesso a meios mais eficientes, ajudando na economia e correspondente redução de custo.

Incentivando a inovação nas cadeias produtivas e na direção de um futuro de Energias Limpas, o governo pode antecipar a implantação de tecnologias em estágio de comercialização e financiar a pesquisa de novas tecnologias a partir de bases científicas recém-desenvolvidas.

CAPÍTULO VI – DAS DISPOSIÇÕES GERAIS

Art.8. A verificação será realizada por auditores independentes.

Art. 9. A ANEEL irá revisar esta Resolução em até cinco anos após sua

publicação.

Art. 10. Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.

Diretor Aneel