

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

VANESSA LUCAS GONÇALVES

**A BIOELETRICIDADE DA BIOMASSA RESIDUAL DA CANA-DE-AÇÚCAR E A
MUDANÇA DE PARADIGMA TECNOLÓGICO NO SEGMENTO DE GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**

CURITIBA

2016

VANESSA LUCAS GONÇALVES

**A BIOELETRICIDADE DA BIOMASSA RESIDUAL DA CANA-DE-AÇÚCAR E A
MUDANÇA DE PARADIGMA TECNOLÓGICO NO SEGMENTO DE GERAÇÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Desenvolvimento Econômico, no Curso de Pós-Graduação em Desenvolvimento Econômico, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, da Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Profa. Dra. Adriana Sbicca Fernandes

CURITIBA

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ. SISTEMA DE BIBLIOTECAS.
CATALOGAÇÃO NA FONTE

Gonçalves, Vanessa Lucas

A bioeletricidade da biomassa residual da cana-de-açúcar e a mudança de paradigma tecnológico no segmento de geração de energia elétrica no Brasil / Vanessa Lucas Gonçalves. - 2016.

95 f.

Orientador: Adriana Sbicca Fernandes.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Sociais Aplicadas, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Econômico.

Defesa: Curitiba, 2016.

1. Biocombustíveis. 2. Energia - Fontes alternativas. 3. Cana-de-açúcar – Aspectos econômicos. I. Fernandes, Adriana Sbicca, 1969-. II. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Sociais Aplicadas. Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Econômico. III. Título.

CDD 333.9539



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
Setor CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
Programa de Pós Graduação em DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO
Código CAPES: 40001016051P7

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **VANESSA LUCAS GONCALVES**, intitulada: "

A bioeletricidade da biomassa residual da cana-de-açúcar e a mudança de paradigma tecnológico no segmento de geração de energia elétrica no Brasil

", após terem inquirido a aluna e realizado a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua

APROVAÇÃO.

Curitiba, 26 de Abril de 2016.

Prof ADRIANA SBICCA FERNANDES (UFPR)
(Presidente da Banca Examinadora)

Prof ARMANDO JOÃO DALLA COSTA (UFPR)

Prof EDUARDO GELINSKI JUNIOR

RESUMO

O segmento de geração de energia elétrica no Brasil sempre foi caracterizado pela exploração do potencial hidroelétrico do país. No entanto, os dados da geração demonstram uma queda gradativa da participação da hidroeletricidade na matriz de energia elétrica brasileira, principalmente porque a exploração do potencial hídrico remanescente implica em impactos ambientais locais irreversíveis à região Amazônica. Diante dos indícios de uma mudança no modelo e padrão de geração de energia elétrica no país, o objetivo geral da pesquisa foi analisar o segmento de geração de energia elétrica brasileiro, identificando as principais barreiras ao estabelecimento de um novo paradigma tecnológico, mais adequado aos princípios de sustentabilidade econômico-ambiental. Ou seja, baseado no uso de fontes de energias alternativas renováveis. A análise foi baseada na teoria de paradigma tecnológico e trajetória tecnológica e em dados secundários do setor elétrico brasileiro. Os objetivos específicos da pesquisa foram: apresentar a evolução do paradigma tecnológico hidroelétrico no Brasil, com destaque para as dificuldades enfrentadas pela trajetória tecnológica hidroelétrica; analisar um possível processo de mudança de paradigma tecnológico no segmento de geração de energia elétrica brasileiro; identificar as principais barreiras ao aumento da participação da bioeletricidade da biomassa residual da cana-de-açúcar na matriz de energia elétrica brasileira. Por meio da pesquisa foi possível constatar que, por volta da década de 1990, se iniciou um processo gradativo de esgotamento do paradigma tecnológico hidroelétrico no Brasil, que levou ao aumento do consumo de outras fontes de energia elétrica, alterando o padrão e modelo de geração. Apesar dessa mudança, ainda não é possível determinar qual o novo paradigma tecnológico do segmento de geração de energia elétrica brasileiro. As barreiras à bioeletricidade, apresentadas na pesquisa, demonstram algumas medidas e políticas públicas que precisam ser criadas para incentivar as fontes de energia renováveis alternativas e para incentivar a indução de um novo paradigma tecnológico sustentável, do ponto de vista econômico e ambiental.

Palavras-chave: Paradigma. Hidroeletricidade. Energias Renováveis. Biomassa. Bioeletricidade. Cana-de-açúcar.

ABSTRACT

The power generation sector in Brazil has always been characterized by the exploitation of the hydroelectric potential of the country. However, generation of data show a gradual drop in the share of hydroelectricity in the Brazilian energy matrix, mainly because the exploitation of the remaining hydro potential implies irreversible local environmental impacts on the Amazon region. Faced with the evidence of a change in the model and pattern of electricity generation in the country, the overall objective of the research was to analyze the Brazilian electricity generation segment, identifying the main barriers to the establishment of a new technological paradigm, more suitable to the principles economic and environmental sustainability. That is, based on the use of renewable alternative energy sources. The analysis was based on the technological paradigm theory and technological trajectory and secondary data from the Brazilian electric sector. The specific objectives of the research were: to present the evolution of the technological paradigm hydropower in Brazil, highlighting the difficulties faced by hydroelectric technological trajectory; analyze a possible process of changing technological paradigm in the Brazilian electric power generation segment; identify the main barriers to increased participation of bioelectricity residual biomass sugarcane in the Brazilian energy matrix. Through research it was established that by the 1990s, began a gradual process of exhaustion of technological paradigm hydropower in Brazil, which led to increased use of other sources of electricity, changing the default and generation model . Despite this change, it is still not possible to determine which new technological paradigm in the Brazilian electric power generation segment. Barriers to bioelectricity, presented research demonstrate some measures and policies that need to be created to encourage alternative renewable energy sources and to encourage the induction of a new sustainable paradigm technological, economic and environmental point of view.

Keywords: Paradigm. Hydroelectricity. Renewable energy. Biomass. Bioelectricity. Sugar cane.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	—	O SETOR ELÉTRICO E O PRADIGMA TECNOLÓGICO HIDROELÉTRICO	31
GRÁFICO 1	—	ENERGIA NATURAL AFLUENTE: MÉDIA HISTÓRICA ANUAL NO BRASIL.....	33
FIGURA 2	—	MAPA DA INTERLIGAÇÃO ENTRE SUBSISTEMAS NO BRASIL EM 2015	34
GRÁFICO 2	—	PARTICIPAÇÃO PERCENTUAL DA ENERGIA HIDROELÉTRICA NA CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO ELÉTRICA NO BRASIL, DE 2005 A 2015.....	37
GRÁFICO 3	—	PARTICIPAÇÃO DA HIDROELETRICIDADE NA OFERTA INTERNA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL, DE 2009 A 2014	38
GRÁFICO 4	—	EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE DE REGULARIZAÇÃO PLURIANUAL DOS RESERVATÓRIOS BRASILEIROS, EM ENERGIA ARMAZENADA MÁXIMA/CARGA, DE 2001 A 2019	39
GRÁFICO 5	—	ENERGIA NATURAL AFLUENTE: COMPARAÇÃO DA MÉDIA DE LONGO TERMO ENTRE BRASIL E REGIÃO NORTE (EM % DA MÉDIA ANUAL)	40
GRÁFICO 6	—	PRODUÇÃO DE ENERGIA HIDROELÉTRICA NO BRASIL, EM GWh, DE 1970 A 2014	41
GRÁFICO 7	—	MATRIZ DE CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	44
GRÁFICO 8	—	MATRIZ ELÉTRICA MUNDIAL NO ANO 2013.....	44
GRÁFICO 9	—	PARTICIPAÇÃO PERCENTUAL DAS DIFERENTES FONTES PRIMÁRIAS DE ENERGIA ELÉTRICA NA CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO NO BRASIL, DE 2005 A 2015.....	45
GRÁFICO 10	—	PARTICIPAÇÃO DE DIFERENTES FONTES PRIMÁRIAS DE ENERGIA NA OFERTA INTERNA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL, DE 2009 A 2014.....	45
QUADRO 1	—	EMISSÕES DE CO2 POR DIFERENTES TIPOS DE FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA	52

GRÁFICO 11 –	EVOLUÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DA BIOMASSA NA CAPACIDADE INSTALADA TOTAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL, DE 2005 A 2015	67
GRÁFICO 12 –	EVOLUÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DA BIOMASSA NA OFERTA INTERNA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL, DE 2009 A 2014	67
GRÁFICO 13 –	EVOLUÇÃO DA MOAGEM DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL, EM MIL TONELADAS, SAFRA 1980–1981 À 2014–2015.....	70
GRÁFICO 14 –	GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE NO BRASIL, EM TWh, DE 2005 A 2014	72
GRÁFICO 15 –	COMPLEMENTARIEDADE ENTRE A BIOELETRICIDADE E A GERAÇÃO HÍDRICA NO BRASIL (PERCENTUAL DO MÊS COM MAIOR OFERTA)	76
GRÁFICO 16 –	BIOELETRICIDADE COMERCIALIZADA NOS LEILÕES REGULADOS, EM MW MÉDIOS E PROJETOS CONTRATADOS, DE 2004 A 2015	81

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 –	PERCENTUAL DE ENERGIA ELÉTRICA CONTRATADA NOS LEILÕES REALIZADOS ENTRE 2010 E 2015.....	47
TABELA 2 –	LEILÕES DE ENERGIA ELÉTRICA REALIZADOS EM 2015	48
TABELA 3 –	MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA: BIOMASSA ...	68
TABELA 4 –	TECNOLOGIAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SETOR SUCROALCOOLEIRO	73
TABELA 5 –	POTÊNCIA INSTALADA CONTRATADA NOS LEILÕES DE FONTES ALTERNATIVAS	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACR	—	Ambiente de contratação regulada
ANEEL	—	Agência nacional de energia elétrica
BIG	—	Banco de informações de geração
BNDES	—	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
CCC	—	Conta de consumo de combustíveis
CCEE	—	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CGH	—	Central geradora hidrelétrica
CNPE	—	Conselho Nacional de Pesquisa Energética
CO ₂	—	Gás carbônico
ENA	—	Energia natural afluenta
EPE	—	Empresa de Pesquisa Energética
GEE	—	Gás de efeito estufa
GW	—	Gigawatts
GWh	—	Gigawatts/hora
ICMS	—	Imposto sobre circulação de mercadorias e serviços
IPCA	—	Índice de preços ao consumidor amplo
KW/h	—	Quilowatts hora
LFA	—	Leilão de fontes alternativas
MAPA	—	Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento
MME	—	Ministério de Minas e Energia
MtCO	—	Dióxido de carbono
MW	—	Megawatts
NO _x	—	Óxido nítrico
ONG	—	Organização não governamental
ONS	—	Operador Nacional do Sistema
PCH	—	Pequena central hidrelétrica
PCI	—	Poder calorífico inferior
PDE	—	Plano Decenal de Expansão de Energia
PROINFA	—	Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica
SIN	—	Sistema interligado nacional

- UHE — Usina hidrelétrica de energia
- UNICA — União da indústria de cana-de-açúcar
- TWh — Terawatts/hora

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REVISÃO DA LITERATURA	14
2.1	O CONCEITO DE PARADIGMAS TECNOLÓGICOS E TRAJETÓRIAS TECNOLÓGICAS	14
3	O PARADIGMA TECNOLÓGICO HIDROELÉTRICO NO BRASIL	28
3.1	A ORIGEM E ESTABELECIMENTO DO PARADIGMA TECNOLÓGICO HIDROELÉTRICO NO BRASIL	28
3.2	AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO PARADIGMA TECNOLÓGICO HIDROELÉTRICO NO BRASIL	31
3.3	AS DIFICULDADES PARA CONTINUIDADE DA TRAJETÓRIA TECNOLÓGICA HIDROELÉTRICA.....	34
4	A TRANSIÇÃO PARA UM NOVO PARADIGMA TECNOLÓGICO NO SEGMENTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	43
4.1	AS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA E O FUTURO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL	43
4.1.1	Os combustíveis fósseis.....	50
4.1.2	As fontes renováveis de energia	55
4.2	A MUDANÇA DE PARADIGMA TECNOLÓGICO E OS FATORES ENVOLVIDOS.....	59
5	BIOELETRICIDADE DA BIOMASSA RESIDUAL DA CANA-DE-AÇÚCAR	66
5.1	A BIOMASSA E O POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOELETRICIDADE PELO SETOR SUCROALCOOLEIRO	66
5.2	AS TECNOLOGIAS PARA A PRODUÇÃO	73
5.3	AS VANTAGENS E AS OPORTUNIDADES DE EXPANSÃO DA PRODUÇÃO	76
5.4	AS BARREIRAS E ENTRAVES.....	80
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
	REFERÊNCIAS	90

1 INTRODUÇÃO

Desde o início do século XX até o início da década de 1990, o segmento de geração de energia elétrica brasileiro foi baseado no uso extensivo da hidroeletricidade. A construção de usinas hidrelétricas de grande porte (UHE) com grandes reservatórios, com capacidade de regularização plurianual da oferta de energia elétrica era predominante no país. No entanto, tem ocorrido uma gradativa e contínua queda da participação da hidroeletricidade na matriz de energia elétrica brasileira, assim como uma queda gradativa da capacidade de regularização dos reservatórios do Sistema Interligado Nacional (SIN). Essa situação deve-se, principalmente, a concentração do potencial hidroelétrico remanescente na região Amazônica e as limitações sociais, ambientais, técnicas e econômicas para o aproveitamento desse potencial com a construção de novas UHE. Para atender ao crescimento da demanda por energia elétrica no país, tem ocorrido o aumento da participação de fontes de energias alternativas na matriz de energia elétrica brasileira, incluindo o aumento da participação de combustíveis fósseis. Ressalta-se que, o Brasil possui grande potencial para geração de energia elétrica por meio de fontes alternativas de energia renovável, como a energia eólica, energia solar e diversos tipos de biomassa, além do potencial para a construção de pequenas centrais hidroelétricas (PCH). Diferentemente dos combustíveis fósseis, essas fontes podem garantir o fornecimento de energia elétrica de forma econômica (com preços competitivos) e ambientalmente sustentável, ou seja, sem degradar o meio ambiente. No entanto, ainda existem muitas barreiras à expansão da produção de energia elétrica por meio dessas fontes, como a necessidade de um maior desenvolvimento tecnológico para a redução dos custos, em alguns casos.

Com a expectativa de uma queda contínua da participação da hidroeletricidade na oferta interna de energia elétrica, torna-se imprescindível o estabelecimento de um novo modelo e padrão para a geração e para a expansão da geração de energia elétrica no país. Não obstante, tem se observado uma ineficácia das políticas públicas para a indução de um novo modelo de geração e a ausência de metas de longo prazo com o objetivo de preservar o perfil renovável e sustentável da matriz de energia elétrica brasileira. Fato que é evidenciado pelo acionamento constante de usinas termelétrica movidas a combustíveis fósseis para garantir o suprimento de energia elétrica no país, por exemplo.

Diante desse cenário, o objetivo geral da pesquisa foi analisar o segmento de geração de energia elétrica no Brasil, identificando as principais barreiras ao estabelecimento de um novo paradigma tecnológico, mais adequado aos princípios de sustentabilidade econômico-ambiental. Ou seja, baseado no uso de fontes alternativas de energia renovável.

A análise do segmento de geração de energia elétrica foi realizada com base na teoria de paradigma tecnológico e trajetória tecnológica e em dados secundários do setor elétrico brasileiro. Como existem diversas fontes alternativas de energia renovável, cada qual com características, desempenhos, potenciais, barreiras e tecnologias de conversão muito diferentes, a pesquisa se aprofundou na análise da bioeletricidade da biomassa residual da cana-de-açúcar para exemplificar os desafios e as oportunidades ao aumento da participação das fontes alternativas de energia renovável na matriz de energia elétrica brasileira.

Para atender ao objetivo geral da pesquisa, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Apresentar a evolução do paradigma tecnológico hidroelétrico no Brasil, com destaque para as dificuldades atualmente enfrentadas pela trajetória tecnológica hidroelétrica;
- Analisar um possível processo de mudança de paradigma tecnológico no segmento de geração de energia elétrica brasileiro;
- Identificar as principais barreiras ao aumento da participação da bioeletricidade da biomassa residual da cana-de-açúcar na matriz de energia elétrica brasileira.

Além desta introdução, o trabalho está dividido em mais cinco capítulos. O segundo capítulo apresenta o conceito de paradigma tecnológico e trajetória tecnológica e os conceitos correlatos da abordagem neoschumpeteriana, que servem de base para a análise do segmento de geração de energia elétrica brasileiro. O terceiro capítulo apresenta a evolução do paradigma tecnológico hidroelétrica no Brasil. O quarto capítulo apresenta as fontes alternativas disponíveis para a geração de energia elétrica no Brasil e também os aspectos relacionados ao processo de mudança de paradigma tecnológico no segmento de geração de energia elétrica brasileiro. O quinto capítulo apresenta a bioeletricidade da biomassa residual da cana-de-açúcar, suas potencialidades e as principais barreiras ao

aumento de sua participação na matriz de energia elétrica brasileira. Por fim, o sexto capítulo apresenta as considerações finais da pesquisa.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta o conceito de paradigma tecnológico e trajetória tecnológica de Giovanni Dosi, elaborados em 1982, e conceitos correlatos da abordagem neoschumpeteriana. Entende-se que tais conceitos são de grande valia para analisar o segmento de geração de energia elétrica brasileiro e interpretar os fenômenos nele ocorridos.

2.1 O CONCEITO DE PARADIGMAS TECNOLÓGICOS E TRAJETÓRIAS TECNOLÓGICAS

Segundo Perez (2009), Schumpeter foi um dos poucos economistas modernos a colocar a mudança técnica e o empreendedorismo na raiz do crescimento econômico. Para Schumpeter (1982), o elemento motriz da evolução do capitalismo é a inovação, seja ela a introdução de novos bens ou técnicas de produção, ou mesmo novos mercados, fontes de oferta de matérias primas ou composições industriais. O indivíduo que implementa essas novas combinações, inserindo as inovações no sistema produtivo, é o inovador, podendo esse ser ou não o inventor.

De acordo com Perez (2009), são os neoschumpeterianos que têm se esforçado para analisar a mudança técnica e a inovação, com suas regularidades e evolução, investigando suas características, sua dinâmica e inter-relações.

A abordagem neoschumpeteriana, também chamada de evolucionária, defende que a inovação constitui o determinante fundamental do processo dinâmico da economia, apresentando contraposição ao conceito de análise estática e de equilíbrio otimizado da firma, difundido pela escola neoclássica. Para os autores neoschumpeterianos, o progresso técnico resulta do desenvolvimento de inovações e depende não apenas da natureza do setor em que as inovações são geradas, como também de fatores institucionais (VIEIRA, 2010).

A abordagem evolucionária reconhece que a mudança técnica prossegue em certas direções de forma independente às condições de demanda e custos, não sendo um processo aleatório. Nessa abordagem, um papel de destaque é dado ao “ambiente de seleção”, termo introduzido na literatura econômica por Nelson e Winter (1977) para enfatizar as instituições envolvidas no processo de inovação e os

mecanismos por trás de sua seleção, destacando a importância do contexto socioeconômico (KEMP, 1994).

O trabalho “*Technological paradigms and technological trajectories*” de Giovanni Dosi, publicado em 1982, discute principalmente os determinantes e as direções da mudança técnica. Suas ideias podem ser incluídas no domínio da corrente de pensamento neoschumpeteriano, na medida em que destacam o papel da inovação tecnológica, como principal determinante dos saltos de produtividade que vêm caracterizando o desenvolvimento do sistema econômico, e atribuem à ação das empresas privadas, em sua busca por lucros, a função de principal agente propulsor dessa inovação (SICSÚ; ROSENTHAL, 2006).

Para Dosi (1988), a inovação diz respeito à busca, descoberta, experimentação, desenvolvimento, imitação e adoção de novos produtos, novos processos e novos *setups* organizacionais¹. O conceito de paradigma tecnológico de Dosi (1982) está relacionado com a produção de conhecimento e inovações tecnológicas introduzidas no sistema econômico.

Para entender o conceito de paradigma tecnológico de Dosi é importante destacar seu entendimento sobre o que é a tecnologia. Para Dosi (1982), a tecnologia é entendida de uma forma ampla, como um conjunto de parcelas de conhecimento (teórico e prático), de *know-how*, métodos, procedimentos, expertise, experiências de sucesso e insucesso de soluções tecnológicas passadas, o conhecimento do atual “estado-da-arte” e os dispositivos físicos e equipamentos que incorporam as realizações do desenvolvimento de uma tecnologia. Dessa forma, inclui não apenas a tecnologia embutida em equipamentos físicos, mas também o conhecimento específico (tácito e explícito) das pessoas envolvidas em um determinado processo de resolução de problema específico ou de uma “necessidade”. Segundo o autor, essa visão mais ampla da tecnologia é útil para a investigação dos padrões da mudança técnica.

Para Dosi (1988), a inovação tecnológica envolve a solução de problemas (por exemplo, a transformação de calor em movimento, água em eletricidade etc.) reunindo ao mesmo tempo certos custos e negociabilidade. Os problemas são tipicamente mal estruturados e as informações disponíveis não fornecem por si só a

¹ O termo *setup* é utilizado para se referir ao período de tempo em que o processo produtivo é interrompido para a realização de ajuste nos equipamentos utilizados. O *setup* está relacionado às variações nos produtos ou nos lotes de produtos. O planejamento da produção e a quantidade e duração dos *setups* determinam a eficiência do processo produtivo e os períodos ociosos.

solução para o problema. Assim, as “soluções inovadoras” para certo problema envolvem descoberta e criação. A “solução” de problemas tecnológicos envolve ainda o uso de informações extraídas de experiências anteriores e do conhecimento formal (por exemplo, das ciências naturais), assim como capacidades específicas e não codificadas por parte dos inventores, o conhecimento tácito. Diante disso, Dosi (1988) observou que a busca de soluções para determinados problemas tecnológicos tende, normalmente, a concentrar-se nos entornos das soluções já conhecidas e nos esforços para aperfeiçoamento dos conhecimentos relevantes para essas soluções.

Dosi (1988) denomina “base de conhecimento” o conjunto de entradas de informações, conhecimentos e capacidades que os inovadores empregam na procura de soluções inovadoras. Para ele, as tecnologias podem ser diferenciadas de acordo com o grau de universalidade de sua base de conhecimento, ou seja, quão público ou quão tácito (mal definido, não codificado, não publicado) é o conhecimento base. Entretanto, qualquer que seja a base de conhecimento, cada atividade de solução de problemas implica o desenvolvimento e aperfeiçoamento de “modelos” e procedimentos específicos. O conjunto de conhecimentos relevantes e os modelos de procedimentos específicos são denominados de paradigma tecnológico (DOSI, 1988).

O conceito de paradigmas tecnológicos, criado por Dosi (1982), surgiu de uma analogia ao conceito de paradigmas científicos de Kuhn (1962). Segundo Dosi (1988), ambos os paradigmas, científico e tecnológico, incorporam uma perspectiva, uma definição de problemas relevantes e um padrão de investigação. O paradigma científico de Kuhn (1962) refere-se a uma perspectiva que define problemas relevantes e um “modelo” e um “padrão” de investigação ou pesquisa, que, inicialmente, constitui-se uma grande promessa de sucesso que é alcançado pela ciência por meio da extensão do conhecimento dos fatores expostos pelo paradigma. Em analogia a esse conceito, Dosi (1982, p. 22) define paradigma tecnológico como: “um ‘modelo’ e um ‘padrão’ de solução de problemas tecnológicos selecionados, baseados em princípios selecionados, derivados das ciências naturais, e em tecnologias materiais selecionadas”. Segundo o autor (1988), o conjunto de regras específicas de um paradigma também objetiva a aquisição de novos conhecimentos e a proteção dos mesmos, sempre que possível, contra a rápida difusão pelos concorrentes.

Segundo Dosi (1982), a definição de um paradigma tecnológico refere-se a uma tarefa genérica a qual o paradigma é aplicado (por exemplo, geração de energia elétrica), para o material tecnológico selecionado (hidroeletricidade, resultante de equipamentos técnicos como, por exemplo, barragens, turbinas), para as propriedades físico-químicas que serão exploradas (a energia natural afluyente de um curso d'água), para a dimensão tecnológico-econômica e seus *trade-offs* (capacidade instalada ou potencial de geração em KW/h (quilowatts hora) e o tamanho da área alagada, tamanho do reservatório e a capacidade de regularização da oferta ao longo do ano, custos econômicos, custos ambientais e sociais, custo da transmissão da energia gerada etc.).

Os paradigmas implicam em heurísticas e visões específicas sobre “como fazer as coisas” e como melhorá-las, compartilhadas pelos agentes de cada atividade (engenheiros, empresas, técnicos etc.). Portanto, dada à existência de algum problema ou necessidade como, por exemplo, a geração de energia elétrica, certa tecnologia específica surge, tal como as usinas hidrelétricas, com suas próprias soluções para aqueles problemas e a exclusão de outras possibilidades de soluções. Os paradigmas também definem modelos básicos de artefatos e sistemas, que são progressivamente modificados e melhorados ao longo do tempo (DOSI 1988; CIMOLI; DOSI, 1995).

De acordo com Dosi e Nelson (2013), o estabelecimento de um dado paradigma tecnológico é muitas vezes associado com o surgimento de algum projeto ou *design* dominante, justificando uma forte semelhança entre uma gama de produtos fabricados e componentes fundamentais relativamente invariáveis. Segundo os autores, quando isso ocorre, as trajetórias parecem ser conduzidas por "ciclos tecnológicos hierarquicamente alinhados" e os gargalos e "desequilíbrios tecnológicos" são melhorados ao longo do tempo.

De acordo com Dosi (1988), ao se observar os padrões de mudança técnica é possível identificar a existência de paradigmas (com diferentes níveis de generalidade) em vários setores industriais. Alguns exemplos citados pelo autor são: os semicondutores, o motor de combustão interna e a química sintética à base de óleo. Portanto, o conceito de paradigma tecnológico centra-se no ambiente microeconômico, podendo ser aplicado na análise de vários setores produtivos, de forma individual.

Com uma lógica semelhante, Freeman e Perez (1988) criaram o conceito de paradigma técnico-econômico, o qual está intimamente ligado à propagação de “revoluções tecnológicas” na economia. As revoluções tecnológicas são definidas como um conjunto de inovações radicais interligadas. De acordo com Perez (2009), o que vale para tecnologias individuais em termos de regularidades no dinamismo e direção da mudança técnica — como evidenciado por Dosi (1982) — ocorre também no nível mesoeconômico, em relação à evolução de todos os produtos em uma indústria e aos conjuntos inteiros de indústrias inter-relacionadas, originando as revoluções tecnológicas. Para Perez (2009), os processos de difusão de cada revolução tecnológica constituem sucessivas “grandes ondas de desenvolvimento”.

Voltando ao conceito de paradigma tecnológico, Dosi (1982) destaca que um paradigma tecnológico inclui fortes prescrições na direção da mudança técnica a seguir ou aquelas a negligenciar. E, assim como a ciência constitui a “efetivação de uma promessa” contida num paradigma científico, o “progresso técnico” é definido por meio de certo “paradigma tecnológico”. Os paradigmas tecnológicos têm um poderoso efeito de exclusão: “os esforços e a imaginação tecnológica de engenheiros e de organizações são focados em uma direção específica enquanto estão cegos a respeito de outras possibilidades tecnológicas” (DOSI, 1982, p. 23). Segundo Cimoli e Dosi (1995), cada paradigma molda e restringe a taxa e a direção da mudança tecnológica, independente dos incentivos de mercado.

De forma semelhante, Nelson e Winter (1977) já haviam utilizado o termo “regime tecnológico²” para explicar a concentração da atenção de engenheiros em determinadas direções de possível progresso. Para os autores, um regime tecnológico define limites e trajetórias. As trajetórias e estratégias para o avanço tecnológico promissores, dentro de um determinado regime, estariam associadas a melhorias dos componentes. Malerba e Orsenigo (1995, p. 47) definem que os regimes tecnológicos “[...] são uma combinação de oportunidades, condições de apropriabilidade, grau de cumulatividade do conhecimento tecnológico e característica da base de conhecimentos relevantes”.

² Castellacci (2007) e Uriona Maldonado (2012) sintetizam que um regime tecnológico é formado por quatro condições: 1ª) a natureza da base de conhecimento do setor em estudo (se é mais tácita ou mais explícita, mais formal ou mais prática); 2ª) o nível de oportunidade tecnológica (oportunidades de entrada ao setor para novos atores); 3) condições de apropriabilidade (a capacidade de manter as inovações protegidas da imitação, ou seja, por mecanismos legais ou pela complexidade dos conhecimentos produzidos); e, 4ª) as condições de cumulatividade (a capacidade de dependência das inovações atuais em conhecimentos prévios), efeito conhecido como path dependency).

Para Kemp (1994), uma característica importante de um paradigma tecnológico e do conceito de regime tecnológico é a existência de uma estrutura tecnológica “núcleo”, partilhada por toda a comunidade de atores econômicos e tecnológicos, a qual é base para melhorias de eficiência do processo e desempenho dos produtos.

De acordo com Dosi (1988), uma implicação crucial da forma paradigmática geral do conhecimento tecnológico é que as atividades inovativas são fortemente seletivas, resultando em direções bastante precisas. A aquisição de capacidades de resolução de problemas é cumulativa, o que explica os padrões, relativamente ordenados, de inovação que se observam ao nível das tecnologias individuais e que, segundo o autor, é evidenciado por vários estudos de "previsão tecnológica".

A ideia de paradigmas e trajetórias explica o fenômeno da cumulatividade dos avanços técnicos dentro de uma trajetória estabelecida. Os paradigmas tecnológicos orientam o avanço tecnológico sustentado pelo volume de conhecimento internalizado, formal e tacitamente, na organização e em suas rotinas. E, as trajetórias orientam as direções segundo as quais a mudança técnica se efetiva no tempo. As decisões tecnológicas em um determinado ponto da trajetória estão condicionadas ao conhecimento científico e tecnológico acumulados (DOSI, 1988).

Dosi (2006) acredita que a não aleatoriedade do avanço tecnológico e o aprendizado por meio da execução (*learning by doing*) podem levar a efeitos cumulativos significativos no âmbito de uma empresa e/ou ramo industrial de um país. O autor alerta para o fato de que diferentes tecnologias e diferentes ramos industriais apresentam graus diversos de cumulatividade que levam a diferentes perfis de tempo com relação às inovações (ou velocidade das mesmas).

Segundo Dosi (2006), as oportunidades tecnológicas também divergem entre as estruturas produtivas, por exemplo, no ramo eletrônico elas são muito maiores do que no setor de vestuário. Para o autor (2006), os estímulos que instigam o setor empresarial a inovação ou imitação vincula-se ao benefício econômico resultante do processo, ou seja, ao seguro contra as perdas econômicas incorridas quando alguma outra empresa se apropria da inovação. As oportunidades tecnológicas e a apropriabilidade privada representam as condições para a atividade de inovação, no entanto, o autor ressalta que “a oportunidade tecnológica pode ser considerada uma condição necessária, mas de modo algum suficiente” (DOSI, 2006,

p. 131), assim como a apropriabilidade, que apenas define o grau de compromisso das empresas com as atividades de inovação.

Os conceitos de paradigma e trajetória tecnológica ressaltam a distinção entre dois tipos de inovação, as inovações incrementais e as inovações radicais. Segundo Dosi (1988), as trajetórias são formadas por inovações incrementais relativas às adaptações inovadoras em uma tecnologia existente, ou seja, as melhorias e aperfeiçoamentos de uma determinada tecnologia. A trajetória tecnológica é definida por Dosi (1982; 1988) como o padrão da atividade “normal” de resolução do problema com base num paradigma tecnológico ou avanços ocorridos ao longo de uma dada trajetória (independentemente de quão grandes e quão rápido são). A trajetória é representada pelo movimento de *trade-offs* multidimensionais entre as variações tecnológicas que o paradigma definiu como relevantes e o progresso pode ser definido como um aperfeiçoamento ou melhoramento desses *trade-offs*, “[...] dessa forma, a trajetória tecnológica é um aglomerado de possíveis direções tecnológicas cujos limites exteriores são definidos pela natureza do próprio paradigma [...]” (DOSI, 1982, p. 24). Segundo Cimoli e Dosi (1995), o conceito de trajetórias está associado à realização progressiva das oportunidades inovadoras associadas ao paradigma. Enquanto as “inovações radicais” estão relacionadas com as mudanças de paradigma tecnológico, um novo “modelo” e “padrão” que se estabelece, na maioria das vezes, por meio de uma nova trajetória (DOSI; NELSON, 2013). O paradigma tecnológico representa um corpo particular de conhecimento, portanto, segundo Cimoli e Dosi (1995), o surgimento de novos paradigmas está relacionado à geração de uma inovação radical, implicando em novas bases de conhecimento, novas heurísticas de busca e novos *designs* dominantes.

Para Kemp (1994), muitas vezes inovações radicais são produzidas por empresas recentemente criadas ou por indústrias que diversificam em um novo mercado. Segundo o autor, isso ocorre, pois uma inovação radical pode necessitar de uma base de conhecimento diferente. Além disso, inovações radicais muitas vezes desqualificam trabalhadores, engenheiros e gerentes, acabam com aplicações financeiras e, geralmente, estimulam a ansiedade em grandes organizações, sendo rejeitadas. No entanto, a inovação é cada vez mais importante para a sobrevivência de uma empresa.

Segundo Perez (2009), as noções de trajetória e paradigma destacam a importância de inovações incrementais no caminho do crescimento a seguir a cada

inovação radical. Embora seja verdade que grandes inovações têm um papel central na determinação de novos investimentos e crescimento econômico, a expansão depende da inovação incremental. As inúmeras inovações menores na melhoria de produtos e melhoria de processos que se seguem à introdução de qualquer novo produto tem um impacto importante no aumento da produtividade e crescimento do mercado.

Para Dosi (1982), a questão crucial refere-se à como um paradigma tecnológico (ou inovação radical) surge e se estabelece, sendo preferido ou escolhido frente a outras possibilidades. Segundo o autor (DOSI, 1982; 1988; 2006), as teorias "*demand pull*" ("indução pela demanda") e "*technology push*" ("impulso pela tecnologia"), não são capazes de explicar de forma eficiente o progresso técnico e a dinâmica da inovação na economia. A primeira teoria indica as forças de mercado (função utilidade da demanda, preços relativos etc.) como principais determinantes da mudança técnica, e a segunda, define a tecnologia como um fator autônomo e desconsidera que os fatores econômicos afetam a direção da atividade inovativa.

Cimoli e Dosi (1995) acreditam que a inovação é por definição a geração de algo novo e, até certo ponto, inesperado. Dessa forma, o surgimento de novos paradigmas é mais afetado por condições institucionais e organizacionais do que por modelos de escolhas alocativas racionais (como sugere a teoria "*demand pull*"). Por outro lado, os autores sugerem que as evidências históricas também excluem a aplicabilidade geral dos modelos lineares de inovação (ciência-tecnologia-produção), na qual a teoria "*technology push*" se baseia. Alguns exemplos que refutam tais modelos foram citados pelos autores: a defasagem entre avanços científicos e sua aplicação tecnológica (ex.: transístores), a inovação tecnológica precedendo a descoberta científica do princípio geral da tecnologia (ex.: lâmpadas elétricas), e os avanços científicos baseados em invenções de novos equipamentos (ex.: microscópio eletrônico e descobertas científicas em biologia).

Dosi (1988) reforça que parece enganoso considerar a inovação como um processo simplesmente reativo (aos preços relativos e demanda, em um caso, a novas oportunidades exógenas, no outro). Pelo contrário, o progresso técnico é em grande parte endogenamente impulsionado por um processo competitivo em que as empresas continuamente tentam melhorar as suas tecnologias básicas e artefatos. As firmas tentam aperfeiçoar seus produtos e processos, por meio de mecanismos

de tentativa e erro e de busca e imitação dos resultados já alcançados por outras empresas, motivadas pela vantagem competitiva que as inovações proporcionam. Assim, de acordo com essa interpretação, cada paradigma restringe as oportunidades de progresso técnico e os limites dentro dos quais os "efeitos de persuasão" podem ser exercidos pelo mercado, enquanto as condições de apropriabilidade motivam os agentes econômicos a explorar essas oportunidades tecnológicas como um dispositivo competitivo. Por fim, a evolução da conjuntura econômica, no longo prazo, é fundamental na seleção de novos paradigmas tecnológicos, e, assim, na seleção das instruções e procedimentos de busca inovativa fundamentais. Para Dosi (2006, p. 36): “a percepção de um mercado potencial faz parte das condições necessárias para a inovação, mas não constitui de modo algum a condição suficiente”.

Dosi (1988) se utiliza da diferenciação entre o progresso técnico “normal” (processo de inovação dentro dos limites de um dado paradigma tecnológico) e o progresso técnico “extraordinário” (associado com o desenvolvimento de novos paradigmas e inovações radicais) para esclarecer alguns pontos sobre a influência do mercado sobre as inovações.

De acordo com Dosi (1982; 1988), frequentemente, as mudanças no ambiente econômico estimulam o simples progresso técnico ao longo de uma trajetória tecnológica, ou seja, a atividade tecnológica “normal”, cujo conjunto de possíveis trajetórias é bastante limitado, restrito às regras, aos imperativos técnicos e ao âmbito específico de cada tecnologia. Somente no longo prazo, as condições de mercado exercem uma poderosa influência sobre a conduta da busca tecnológica, mas o fazem principalmente estimulando, impedindo e focalizando a busca de novos paradigmas tecnológicos. Quando estabelecido, no entanto, cada paradigma permanece bastante “apegado” aos seus imperativos técnicos básicos, regras de pesquisa, e combinações de entrada (DOSI, 1988).

Já os esforços tecnológicos “extraordinários” (relacionados à busca de novas direções tecnológicas) surgem quer em relação a novas oportunidades abertas por desenvolvimentos científicos, quer a crescentes dificuldades de seguir adiante numa dada direção tecnológica (por razões tecnológicas ou econômicas, ou ambas) (DOSI, 1982). O autor (1988) argumenta que a evidência histórica sugere fortemente que um grande impulso para a inovação (e para o estabelecimento de um novo paradigma) tem derivado de desequilíbrios entre as dimensões técnicas

(relacionadas aos *trade-offs*) que caracterizam uma trajetória, resultando na impossibilidade de se seguir em uma determinada direção.

Para Kemp (1994), as pressões por necessidades tecnológicas que não puderam ser satisfeitas com as tecnologias disponíveis são um fator de indução para a inovação, um exemplo citado pelo autor é a crescente necessidade por tecnologias que respeitem o meio ambiente e detenham a degradação ambiental. A percepção de limites técnicos para o avanço também pode induzir as empresas e tecnólogos a mudarem para um regime tecnológico diferente, isso ocorre quando novos avanços ao longo da mesma trajetória aumentam os custos marginais de produção, por exemplo.

Segundo Cimoli e Dosi (1995), a existência de algumas oportunidades tecnológicas inexploradas juntamente com a base do conhecimento relevante e algumas condições de apropriabilidade, definem apenas os limites do conjunto de potenciais novos paradigmas. Já as diversas instituições (desde empresas já estabelecidas a agências governamentais), os grupos sociais e os agentes individuais (inovadores individuais e empresários) atuam como seletores *ex-ante* dos caminhos de pesquisa a serem perseguidos, das dimensões técnicas e econômicas sobre as quais a pesquisa deve se concentrar e o conhecimento base requerido.

Kemp (1994) também acredita que há uma dimensão socioeconômica clara envolvida na estabilidade das atividades de busca e os padrões de mudança tecnológica, assim como evidenciado por Dosi (1982; 1988). Para Kemp (1994), uma das principais razões pela qual o progresso tecnológico muitas vezes prossegue ao longo de certas trajetórias (definidas por um regime ou paradigma tecnológico) é que a tecnologia predominante já se beneficiou de todos os tipos de melhorias evolutivas, em termos de custos e características de desempenho e se encontra adaptada ao ambiente socioeconômico por meio do conhecimento acumulado. O autor cita como exemplo o domínio do motor de combustão interna em veículos que, assim como outros produtos, está fortemente relacionado: às melhorias de desempenho do produto (velocidade, durabilidade e consumo de combustível); às adaptações organizacionais para melhorar a eficiência do processo produtivo; à economia nos custos de fabricação devido à produção em larga escala; aos avanços na tecnologia dos materiais, máquinas e equipamentos; ao baixo preço do combustível; além de toda a rede e infraestrutura em torno do produto, como a distribuição da gasolina, infraestrutura rodoviária, treinamento de mecânicos etc.

Para Kemp (1994), as novas tecnologias que podem ser facilmente incorporadas no sistema de produção e modo de vida das pessoas se difundirão mais depressa do que as tecnologias que requerem a substituição de bens de capital, de infraestrutura e de habilidades ou ainda novas ideias sobre a produção e o consumo, e mudanças regulatórias. Para o autor, as empresas, os consumidores e o governo estão acostumados aos antigos regimes. Assim, as normas ambientais e de segurança geralmente são baseados nesses regimes tecnológicos, o que dificulta a adoção e desenvolvimento de tecnologias mais avançadas, determinando em um novo paradigma tecnológico.

Segundo Kemp (1994), apesar dos elementos de auto sustentação envolvidos no desenvolvimento de paradigmas tecnológicos e regimes, observa-se que em determinados momentos paradigmas e sistemas tecnológicos tornaram-se obsoletos e foram substituídos por novos. Em certos momentos, inovações radicais são produzidas e desafiam o velho paradigma, substituindo-o gradualmente (embora os dois possam coexistir por um longo tempo). O autor acredita que apesar da importância de tais eventos, o conhecimento sobre como as inovações radicais surgem e substituem um antigo regime é bastante limitado.

Para explicar a questão de como um paradigma tecnológico surge e se estabelece, sendo escolhido entre outras possibilidades, Dosi (1982) faz uma simplificação (que não considera a influência dos ambientes econômico e tecnológico e da própria ciência no longo prazo). Essa simplificação baseia-se na hipótese de que ao longo do curso ciência-tecnologia-produção, as forças econômicas aliadas aos fatores institucionais e sociais operam como um “dispositivo seletivo”. Alguns exemplos dos “dispositivos seletivos” citados por Dosi (1982) são: os interesses econômicos das organizações envolvidas em P&D nas novas áreas tecnológicas, a história tecnológica das mesmas, órgãos públicos, setor militar etc.

Dosi (1982) explica que da ciência até a produção os determinantes de seleção aumentam, pois, na ciência tem-se a resolução de uma espécie de “quebra-cabeça” definido pelo paradigma científico e, na produção, tem-se uma tecnologia totalmente incorporada a dispositivos e equipamentos. Nesse processo, os critérios econômicos atuam como seletores e definem um percurso a ser seguido dentro de um conjunto maior de possibilidades. “Uma vez o caminho selecionado e estabelecido, ele mostra uma dinâmica própria, que contribui para definir a direção para a qual a ‘resolução do problema’ move-se” (DOSI, 1982, p. 23–24).

Dosi (1982) destaca que o poder público por meio de suas políticas tem grande poder para interferir no estabelecimento de uma trajetória tecnológica específica. Apesar de não ser uma regra geral (pois mesmo quando ocorre uma “focalização institucional”, sempre haverá diversas possibilidades tecnológicas, diversas organizações, firmas ou indivíduos “apostando” em diferentes soluções tecnológicas, assim como, diversos paradigmas tecnológicos concorrentes), Dosi (1982) acredita que esse fato denota a fragilidade dos mecanismos de mercado na seleção *ex-ante* das direções tecnológicas, especialmente no estágio inicial da história de um ramo industrial.

Kemp (1994) também acredita que o governo é um importante ator no ambiente de seleção das inovações, pois está envolvido no fornecimento de infraestrutura (estradas, telecomunicações etc.) que são importantes para o crescimento de novas tecnologias. A política fiscal, a política industrial e a regulação também afetam o processo da seleção de inovações.

Dosi (1982) acredita que apenas na etapa final da sequência ciência-tecnologia-produção, que possui uma característica diferente das etapas anteriores, os mercados voltam a funcionar como ambiente seletivo. Para o autor, o mercado funciona *ex-post* como dispositivo seletor, geralmente entre um conjunto de produtos já determinados pelos amplos padrões tecnológicos.

Dosi (1982) argumenta que as condições de mudança econômica interagem com o processo de seleção das novas tecnologias, seu desenvolvimento, obsolescência e substituição, pois os produtores reagem às mudanças no ambiente econômico, procurando se adaptar por meio de avanços técnicos. Quando isso não é possível dentro dos limites de determinada trajetória tecnológica, é gerada uma pressão em outros campos tecnológicos para a resolução do problema por meio de outras trajetórias tecnológicas.

No entanto, a mudança tecnológica não se trata de um processo revolucionário, mas sim gradual e cumulativo, que segue em direções bastante específicas. Os elementos de custos de transição das tecnologias e os efeitos da aprendizagem podem explicar por que o processo de difusão de uma inovação radical é lento. Kemp (1994) acredita que as melhorias evolutivas nas características de desempenho de uma tecnologia, que geram a economia dos custos de fabricação (ganhos de escala) em função dos efeitos da curva de aprendizagem, e as “externalidades de redes” — termo utilizado pelo autor para a rede de apoio que se

origina em torno de uma tecnologia (infraestrutura, normas, fornecedores, mão-de-obra qualificada, usuários etc.) — reforçam a consolidação de determinado padrão tecnológico e aumenta o custo da adoção de novos padrões em função de sua não compatibilidade.

Para Kemp (1994), uma tecnologia precisa ser incorporada em um ambiente técnico e socioeconômico maior e que evoluiu no processo de desenvolvimento, as inter-relações técnicas e a rigidez institucional provocam dificuldades para as mudanças tecnológicas. Por isso a compatibilidade é o problema-chave para as novas tecnologias serem incorporadas ao sistema socioeconômico. Novas tecnologias podem exigir a substituição de grande parte do sistema de produção, podem exigir novas habilidades de trabalho e estilo de gestão e outros tipos de mudanças institucionais, como uma nova legislação, por exemplo. Para o autor, cada novo paradigma exige uma modificação da infraestrutura que só pode ocorrer como resultado de mudanças institucionais e regulatórias.

Em resumo, os esforços tecnológicos “extraordinários”, relacionados à busca de novas direções tecnológicas e inovações radicais, que culminam com o surgimento de um novo paradigma tecnológico, surgem principalmente em função de crescentes dificuldades de seguir adiante numa dada direção tecnológica (por razões tecnológicas ou econômicas, ou ambas).

O surgimento de novos paradigmas é mais afetado por condições institucionais e organizacionais do que por modelos de escolhas alocativas racionais. São as forças econômicas aliadas aos fatores institucionais e sociais (empresas, agências governamentais, grupos sociais, empreendedores) que operam como um “dispositivo seletivo”, selecionando *ex-ante* os caminhos de pesquisa a serem perseguidos.

Dentre esses atores, Dosi (1982) destaca que o poder público por meio de suas políticas tem grande poder para interferir no estabelecimento de uma trajetória tecnológica específica. Kemp (1994) também acredita que o governo é um dos atores mais importantes dentro no ambiente de seleção das inovações, pois está envolvido no fornecimento de infraestrutura (estradas, telecomunicações etc.) para o crescimento de novas tecnologias, além de ser o responsável pela política fiscal, pela política industrial e pela regulação.

Além disso, é importante destacar que as novas tecnologias podem exigir grandes mudanças, como a substituição de grande parte do sistema de produção,

novas habilidades de trabalho, uma nova legislação etc. Cada novo paradigma exige uma modificação da infraestrutura que só pode ocorrer como resultado de mudanças institucionais e regulatórias.

3 O PARADIGMA TECNOLÓGICO HIDROELÉTRICO NO BRASIL

A tecnologia hidroelétrica surgiu no mundo no final do século XIX e se estabeleceu no início do século XX como um padrão e modelo para a geração de energia elétrica no Brasil. A hidroeletricidade implicou no acúmulo de um conjunto de conhecimentos e regras específicas que determinaram a evolução do sistema elétrico nacional. Assim, a trajetória tecnológica hidroelétrica determinou a direção da mudança técnica no segmento de geração de energia elétrica no país. No entanto, desde meados da década de 1990, alguns fatores têm levado a dificuldades em se seguir na trajetória tecnológica hidroelétrica, resultando em uma queda gradativa e contínua da participação dessa fonte no total de energia elétrica produzida no país.

Este capítulo aborda a evolução do paradigma tecnológico hidroelétrico no Brasil. A primeira seção apresenta sua origem e estabelecimento. A segunda seção apresenta as principais características desse paradigma tecnológico. Já a terceira seção apresenta os fatores que têm impedido a continuidade da trajetória tecnológica hidroelétrica no Brasil, acarretando um processo de esgotamento do paradigma tecnológico hidroelétrico.

3.1 A ORIGEM E ESTABELECIMENTO DO PARADIGMA TECNOLÓGICO HIDROELÉTRICO NO BRASIL

A hidroeletricidade começou a ser utilizada no país no final do século XIX para atender as demandas das atividades econômicas desenvolvidas na época pela iniciativa privada, como a mineração, as fábricas de tecidos, serrarias e beneficiamento de produtos agrícolas, ou outras atividades que dependiam da geração de eletricidade. A primeira usina hidrelétrica brasileira foi construída no ano de 1883, no município de Diamantina (MG) (GOMES *et al.*, 2002).

A hidroeletricidade apresentava custo inferior ao da energia termoelétrica a carvão importado, outra fonte de energia disponível na época. Além disso, os recursos hídricos a serem explorados no país eram abundantes e não havia barreiras legais para sua exploração, pelo menos até a década de 1930. A entrada de empresas estrangeiras que dominavam a tecnologia hidroelétrica no mercado nacional reforçou a adoção desta tecnologia como padrão para a expansão da

geração de energia elétrica no país. Esses fatores levaram a seleção da hidroeletricidade como um modelo e padrão para resolução do “problema” da geração de energia elétrica.

Em 1930, o parque gerador brasileiro tornou-se predominantemente hidráulico (GOMES *et al.*, 2002). Segundo Leite (1997, p. 49):

Consolidava-se a primazia da hidroeletricidade em quase 80% do total, o que mais uma vez diferenciava a evolução da economia da energia no Brasil da verificada nos países da vanguarda industrial, onde predominava a termoeletricidade com base no carvão mineral.

A partir de meados da década de 1940, o Governo passou a intervir no setor elétrico, regulando os serviços de energia e assumindo a expansão do sistema elétrico brasileiro, baseada na construção de usinas hidrelétricas de grande porte, com reservatórios de regularização, e fornecendo toda a infraestrutura necessária para geração, transmissão e distribuição da energia (GOMES *et al.*, 2002).

Segundo Tolmasquim (2005, p. 31–32):

A expansão do parque elétrico brasileiro se deu então nestes moldes: concentrando a produção em grandes usinas e suprimindo de energia os sistemas distribuidores regionais que ficaram a cargo dos governos estaduais. [...] O planejamento do setor optou pela implantação das grandes usinas hidrelétricas e pelo desenvolvimento de uma rede de transmissão que possibilitasse a integração dos grandes sistemas locais. [...] As pequenas centrais hidrelétricas saíram do rol de opções mais viáveis para o atendimento de blocos de demanda cada vez mais crescentes no país.

Nota-se, portanto, que em um primeiro momento o paradigma tecnológico hidroelétrico foi selecionado pelo mercado como uma fonte mais adequada para a geração de energia elétrica, em função do baixo custo, da abundância dos recursos e de fatores institucionais, organizacionais e regulatórios, que favoreciam essa fonte de energia. Posteriormente, o Estado teve um papel fundamental no estabelecimento do paradigma tecnológico hidroelétrico, pois foi responsável pela adoção da hidroeletricidade como padrão e modelo para a expansão do sistema elétrico nacional. O Governo investiu para o desenvolvimento e aperfeiçoamento da tecnologia hidroelétrica, além de planejar e fornecer toda a infraestrutura necessária para a expansão e interligação do sistema elétrico nacional baseado na exploração dos recursos hídricos do país.

A partir do final da década de 1970, no entanto, o modelo Estatal do setor elétrico brasileiro começou a perder força. O Estado foi assolado por uma crise econômica e fiscal e tornou-se incapaz de financiar a expansão do sistema, o que atingiu os investimentos em novas usinas para a geração de energia elétrica (TOLMASQUIM, 2011).

Na segunda metade dos anos 1990, foi construído um complexo arcabouço regulatório para sustentar o funcionamento de um novo padrão de concorrência no setor elétrico e realizar a transição do modelo estatal para um modelo de participação mista (estatal/privado) (GOMES *et al.*, 2002).

Segundo Tolmasquim (2005), a indefinição no marco regulatório setorial inibiu os novos investimentos necessários para a expansão adequada da geração. Por isso, antes mesmo de concluída a reestruturação do setor elétrico brasileiro, surgiu em 2001 uma grave crise de abastecimento em decorrência de defasagem entre a evolução da capacidade instalada e o crescimento da demanda de energia elétrica no SIN, iniciada em 1999.

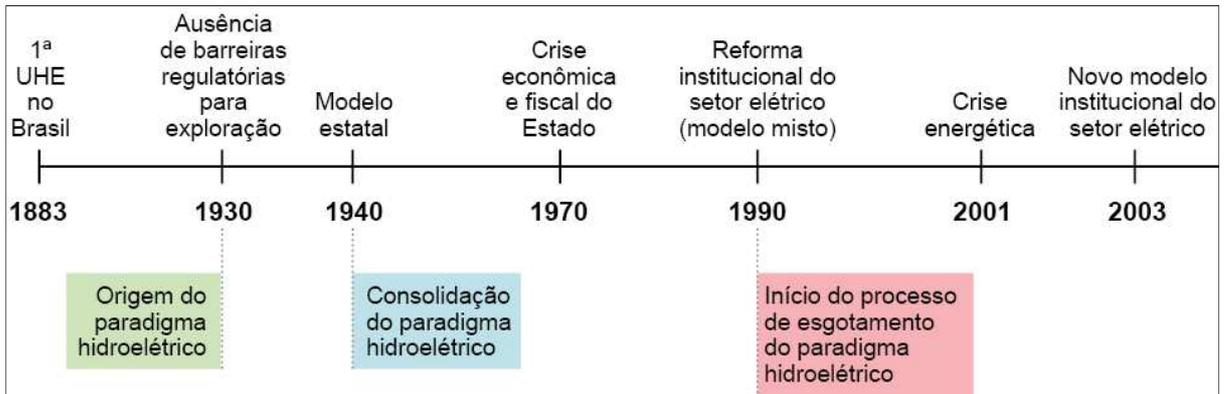
As lições da crise e o diagnóstico de suas causas levaram a construção de um novo modelo institucional no setor elétrico a partir de 2003, que em síntese promoveu (TOLMASQUIM, 2011):

- Profundas modificações na comercialização de energia no Sistema Interligado Nacional (SIN) com a criação do Ambiente de Contratação Regulada (ACR) e do Ambiente de Contratação Livre (ACL);
- Modificações institucionais, com a reorganização das competências e a criação da Câmara de Comercialização de Energia (CCEE);
- Retomada do planejamento setorial, a partir da contratação regulada por meio de leilões e com a criação da Empresa de Pesquisa Energética (EPE);
- Retomada dos programas de universalização do acesso à energia elétrica;

Segundo Tolmasquim (2011), com o novo modelo foi retomada a estabilidade necessária para atrair novos investimentos.

A (FIGURA 1) apresenta um resumo cronológico dos principais eventos ocorridos, entre 1883 e 2003, no setor elétrico brasileiro com a evolução do paradigma tecnológico hidroelétrico.

FIGURA 1 – O SETOR ELÉTRICO E O PRADIGMA TECNOLÓGICO HIDROELÉTRICO



FONTE: O autor (2016).

3.2 AS PRINCIPAIS CARACTERÍSTICAS DO PARADIGMA TECNOLÓGICO HIDROELÉTRICO NO BRASIL

O paradigma tecnológico hidroelétrico no Brasil se caracterizou pela predominância de usinas hidrelétricas de grande porte com grandes reservatórios com capacidade de regularização da oferta de energia elétrica por longos períodos de tempo (em média quatro ou cinco anos). Outra característica desse modelo de geração era a produção de energia em grande escala de forma centralizada, demandando extensas linhas de transmissão. Como o sistema elétrico nacional foi quase que totalmente interligado, hoje é possível o uso coordenado dos recursos hídricos e o intercâmbio de energia elétrica entre as diferentes regiões do país.

A energia hidroelétrica é produzida a partir do potencial hidráulico de um curso d'água, combinando a vazão do rio com os seus desníveis, sejam naturalmente formados ou criados com a construção de barragens. A potência instalada de uma usina determina seu porte, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) adota três classificações: Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGH) – com até 1 megawatts de potência instalada – Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCH) – entre 1,1 megawatts (MW) e 30 MW de potência instalada – e Usina Hidrelétrica de Energia (UHE) – com mais de 30 MW (BRASIL, 2008).

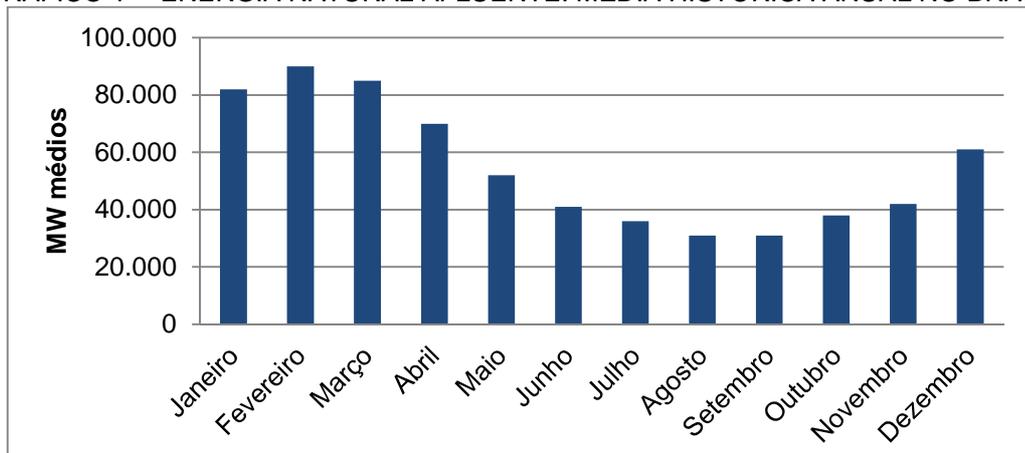
O porte da usina determina a dimensão da rede de transmissão que será necessária para levar a energia até o centro de consumo. Quanto maior a usina, mais distante ela tende a estar dos grandes centros, exigindo a construção de grandes linhas de transmissão que, muitas vezes, atravessam o território de vários Estados. Já as PCHs e CGHs são instaladas junto a pequenas quedas d'águas, no geral abastecem pequenos centros consumidores – inclusive unidades industriais e

comerciais — e não necessitam de instalações tão sofisticadas para o transporte da energia (BRASIL, 2008).

No Brasil foi priorizada a construção de grandes UHE que, atualmente, representam 61,33% da capacidade instalada de geração, enquanto as PCH e CGH correspondem a 3,38% e 0,29% da capacidade instalada de geração no país, respectivamente, de acordo com o Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL (BRASIL, 2016a). As grandes linhas de transmissão que as UHE demandam têm como aspecto negativo as perdas de energia. De acordo com Brasil, Ministério de Minas e Energia (MME) (2015c), entre junho de 2014 e maio de 2015, as perdas de energia no sistema elétrico brasileiro corresponderam a 17,4% da energia elétrica consumida no período.

Uma característica importante da base hídrica do parque gerador brasileiro é a sazonalidade do regime fluvial (GRÁFICO 1), que é caracterizada por um período úmido, de dezembro a março, e um período seco que se inicia entre abril e maio e vai até novembro. A energia natural afluenta (ENA), energia hídrica que corre dos rios com aproveitamento energético, é maior do que a carga durante a estação úmida, mas o inverso ocorre na estação seca. A capacidade de geração hidroelétrica no país está sujeita a um alto grau de incerteza e intermitência devido a não previsibilidade das chuvas (CASTRO; BRANDÃO; DANTAS, 2010). A construção de reservatórios de regularização capazes de estocar água no período úmido do ano para conversão em energia elétrica no período seco é o que viabiliza a regularização da oferta de energia elétrica, representando uma importante peculiaridade do sistema de geração de energia elétrica brasileiro do ponto de vista estratégico.

GRÁFICO 1 – ENERGIA NATURAL AFLUENTE: MÉDIA HISTÓRICA ANUAL NO BRASIL



FONTE: Castro; Brandão; Dantas (2010).

A diversidade hidrológica e a continentalidade do país se refletem em regimes pluviométricos diversos, ou seja, os períodos de estiagem de uma região correspondem ao período chuvoso de outra. A integração do sistema permite que a localidade em que os reservatórios estão mais cheios envie energia elétrica para a outra, em que os lagos estão mais vazios (BRASIL, 2008). Assim, de acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (BRASIL, 2007), a capacidade energética do sistema interligado no Brasil é aumentada com o uso dos reservatórios de regularização e a transferência de energia oferecida pelo sistema de transmissão. Segundo o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2024 da EPE (BRASIL, 2015g), no início de 2015, os reservatórios instalados na região Sudeste e Centro-Oeste representavam, aproximadamente, 70% do SIN, enquanto as regiões Nordeste, Sul e Norte, possuíam, respectivamente, 18%, 7% e 5% da capacidade de energia armazenável máxima do país.

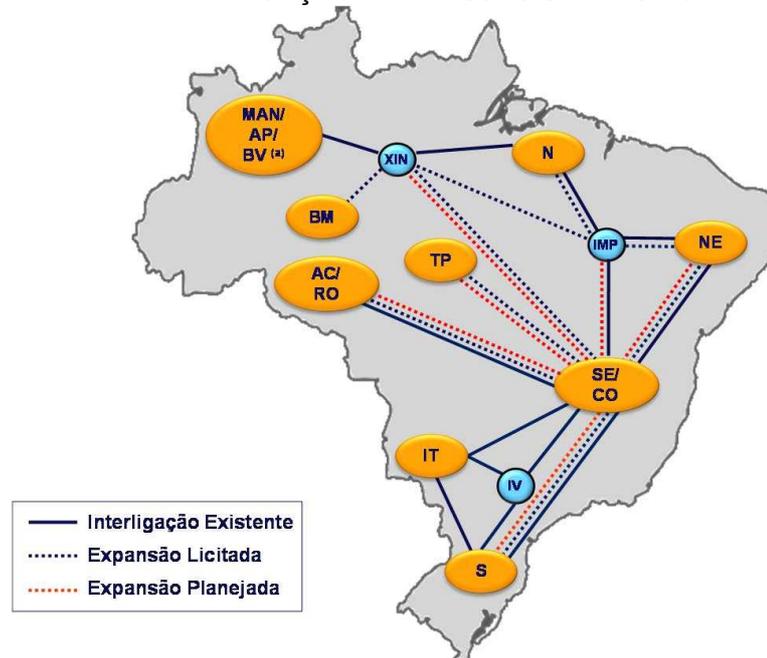
De acordo com a EPE (BRASIL, 2007), grande parte do sistema elétrico brasileiro, 98% em termos de geração e carga, encontram-se eletricamente interligado, compondo o SIN. O SIN é dividido em quatro subsistemas elétricos: Sudeste/Centro-Oeste, que corresponde a mais de 60% da carga; Sul, que representa 16% da carga; Nordeste, que concentra 15% da carga; Norte, que representa 8% da carga.

Além do SIN, de acordo com a EPE (BRASIL, 2007) existe ainda um grande número de sistemas isolados, principalmente na região Norte do país. São assim denominados por não estarem interligados ao SIN e por não permitirem o intercâmbio de energia elétrica com outras regiões, em função das peculiaridades

geográficas da região em que estão instaladas (BRASIL, 2008). Os sistemas isolados são predominantemente térmicos (basicamente a óleo diesel) e atendem quase 3% da população nacional. Os maiores sistemas isolados, cerca de 90% do consumo, correspondem às regiões de Manaus, Acre-Rondônia e Amapá.

A (FIGURA 2) apresenta o mapa das interligações entre subsistema no Brasil no ano de 2015 com a interligação existente, a expansão licitada e expansão planejada.

FIGURA 2 – MAPA DA INTERLIGAÇÃO ENTRE SUBSISTEMAS NO BRASIL EM 2015



FONTE: Brasil (2015g).

NOTA: Foi licitada a interligação entre Manaus e Boa Vista, que será integrada a região Norte, e está em estudo a expansão do sistema de geração de Roraima através da construção de usinas hidrelétricas nessa região.

3.3 AS DIFICULDADES PARA CONTINUIDADE DA TRAJETÓRIA TECNOLÓGICA HIDROELÉTRICA

A hidroeletricidade tem sido a principal fonte de energia elétrica no Brasil desde o início do século XX. Apesar disso, recentemente, a trajetória tecnológica hidroelétrica tem enfrentado dificuldades (técnicas, econômicas, ambientais e regulatórias) para sua continuidade.

Essas dificuldades se iniciaram por volta da década de 1990, com o gradativo esgotamento dos recursos hídricos a serem explorados nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, e a concentração do potencial hidroelétrico remanescente na

região Amazônica. Esse potencial remanescente apresenta muitos conflitos, de ordem ambiental, social e legal, para o seu aproveitamento. Além desses fatores, na região Amazônica não é adequada a construção de usinas com grandes reservatórios, o que acarreta em uma perda da capacidade de regularização do sistema elétrico como um todo. Essas dificuldades têm limitado, de forma gradativa, a continuidade da trajetória tecnológica hidroelétrica, levando a um processo de esgotamento do paradigma tecnológico até então vigente. Essa seção apresenta alguns fatos e dados que corroboram o esgotamento do paradigma tecnológico hidroelétrico no Brasil.

De acordo com o Plano Nacional de Energia 2030, da EPE (BRASIL, 2007), o potencial hidroelétrico remanescente no Brasil é de cerca de 126.000 MW. Desse total, mais de 70% estão nas bacias dos rios Amazonas e do Tocantins/Araguaia. A bacia do Tocantins/Araguaia possui potencial de 28.000 MW, dos quais quase 12.200 MW já estão aproveitados pela UHE Serra da Mesa e UHE Tucuruí. Do potencial restante a ser aproveitado, 90%, porém, sofrem alguma restrição ambiental (BRASIL, 2008).

Segundo Castro *et al.* (2012), na região Norte do país prevalecem áreas de preservação, florestas e reservas indígenas, onde a exploração dos recursos naturais vem ocorrendo de forma predatória. Além disso, dada a distância entre o potencial gerador e o centro de carga (região Sudeste, principalmente) há necessidade de construção de extensas linhas de transmissão. Para o autor, a expansão da hidroeletricidade deveria ocorrer apenas nos casos em que seus benefícios energéticos para o país sejam superiores aos seus impactos socioambientais, adotando todas as medidas necessárias para a mitigação e compensação dos eventuais impactos.

Segundo a EPE (BRASIL, 2007), por estar concentrado na Amazônia e no Centro-Oeste, o potencial hidrelétrico remanescente também apresenta desafios técnicos e ambientais em razão das distâncias a serem vencidas, incluindo travessias de rios e áreas de reserva, e de questões ligadas à preservação da biodiversidade e das terras indígenas.

Somam-se as dificuldades já citadas para a construção de novas usinas hidrelétricas na região da Amazônia: a inexperiência dos investidores e dos órgãos ambientais; a atuação muitas vezes errática do Ministério Público e das intervenções de organizações não governamentais (ONGs); e, a sobreposição,

constitucionalmente instituída, de instâncias nas competências de matéria ambiental. Tudo isso contribui para a morosidade dos processos de licenciamento ambiental na Amazônia (LEITE, 2011).

Para Leite (2009), o centenário domínio da hidroeletricidade no Brasil está sendo posto à prova. Os debates ambientais aumentaram após a construção da usina hidrelétrica de Balbina, em 1989, para atender a região de Manaus. Segundo o autor (LEITE, 2009, p. 5): “se cometeu o erro exemplar de projeto na desproporção entre o pequeno benefício oriundo da capacidade de geração de energia e o dano causado pela extensa área inundada”. Hoje, felizmente, se requer muito mais atenção com o meio ambiente. Os estudos buscam priorizar projetos que geram mais MW por Km² de área alagada.

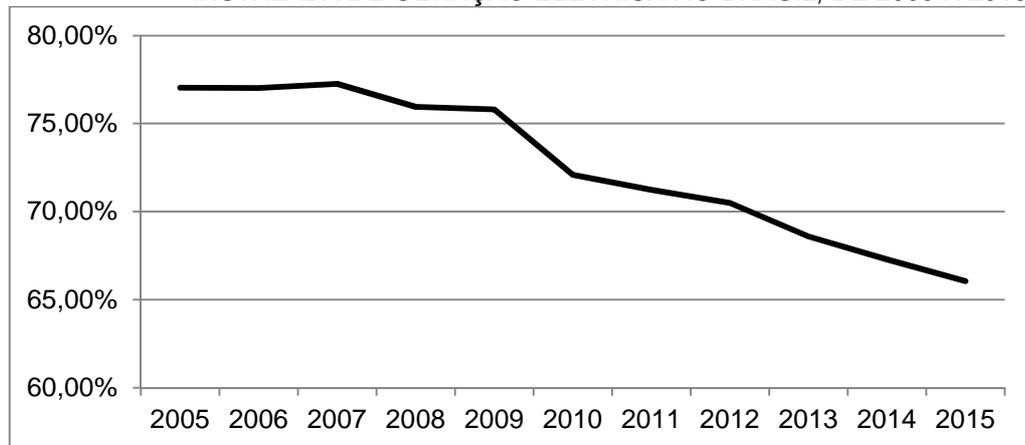
Para Castro *et al.* (2010), a matriz elétrica brasileira encontra-se em transição, evoluindo de uma configuração onde os recursos hídricos eram responsáveis pela quase totalidade da oferta de energia ao longo do ano, para uma configuração onde será necessária a diversificação do parque gerador brasileiro, sobretudo com uma complementação à geração hídrica no período seco do ano, uma vez que a expansão da geração por meio da construção de novas usinas hidrelétricas no Brasil já não poderá acompanhar o aumento da demanda por energia elétrica.

O PDE 2024 (BRASIL, 2015g) prevê que até 2024 a hidroeletricidade ampliará³ sua capacidade de geração em 27GW (gigawatts), totalizando 117 GW, ou 56,8% da capacidade total de geração do país. Apesar do aumento significativo da capacidade instalada total de geração, aproximadamente 73 GW (um aumento de 54,9%) até 2024, a participação de usinas hidrelétricas de grande porte sofrerá uma redução de 8,8% na capacidade de geração no país no mesmo período.

No passado, o parque hidrelétrico chegou a representar 90% da capacidade instalada de geração. De acordo com o MME (BRASIL, 2015c), em junho de 2015, essa participação recuou para cerca de 65,7%. O (GRÁFICO 2) apresenta a evolução da participação percentual da energia hidroelétrica na capacidade instalada de 2005 a 2015, onde evidencia-se acentuada queda a partir de 2007.

³ A despeito das dificuldades para obtenção de licenciamento ambiental, a maior parte da expansão hidroelétrica nesse período se dará na região Norte do país. As maiores usinas em construção são a Belo Monte, a São Luiz do Tapajós e a Jatobá, todas localizadas no Estado do Pará. Juntas correspondem a 76,2% da expansão prevista no período.

GRÁFICO 2 – PARTICIPAÇÃO PERCENTUAL DA ENERGIA HIDROELÉTRICA NA CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO ELÉTRICA NO BRASIL, DE 2005 A 2015



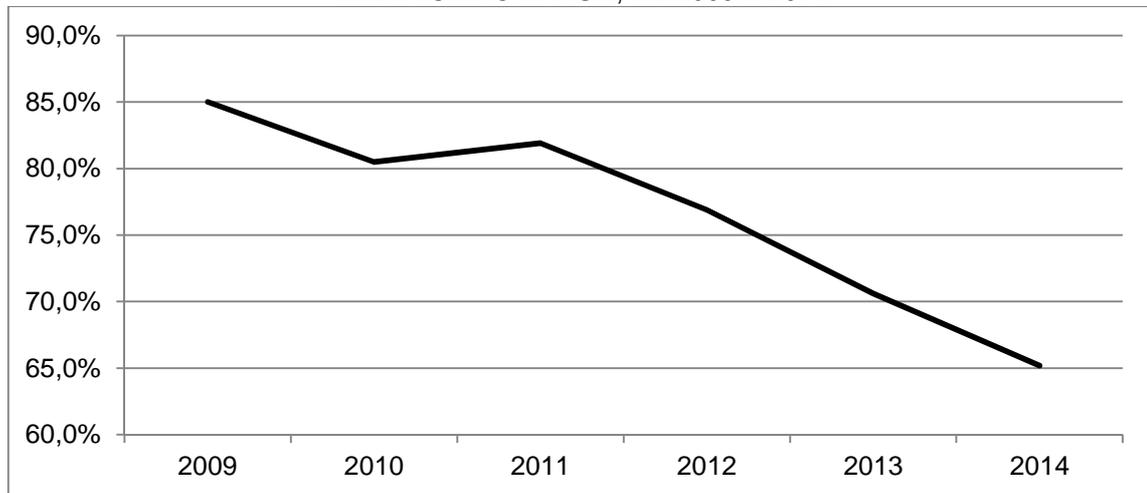
FONTE: Adaptado de Brasil (2010–2015; 2015c).

Segundo a ANEEL (BRASIL, 2008), a redução da participação da hidroeletricidade na capacidade instalada tem três razões. Primeira, a necessidade de diversificação da matriz elétrica prevista no planejamento do setor elétrico de forma a aumentar a segurança do abastecimento. Segunda, a dificuldade em ofertar novos empreendimentos hidráulicos pela ausência da oferta de estudos e inventários. E, terceira, o aumento de entraves jurídicos que protelam o licenciamento ambiental⁴ de usinas de fonte hídrica e provocam o aumento constante da contratação em leilões de energia de usinas de fonte térmica, a maioria movidas a derivados de petróleo ou carvão.

O (GRÁFICO 3) apresenta a participação da hidroeletricidade na oferta interna de energia elétrica no Brasil, de 2009 a 2014 nota-se a queda da participação da hidroeletricidade, principalmente a partir de 2011, também motivada por um período hidrológico desfavorável.

⁴ Procedimento administrativo pelo qual o órgão ambiental competente licencia a localização, instalação, ampliação e a operação de empreendimentos e atividades utilizadoras de recursos ambientais, consideradas efetiva ou potencialmente poluidoras ou daquelas que, sob qualquer forma, possam causar degradação ambiental, considerando as disposições legais e regulamentares e as normas técnicas aplicáveis ao caso. A licença ambiental dependerá de prévio estudo de impacto ambiental e respectivo relatório de impacto sobre o meio ambiente (EIA/RIMA) (CONAMA, 2016).

GRÁFICO 3 — PARTICIPAÇÃO DA HIDROELETRICIDADE NA OFERTA INTERNA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL, DE 2009 A 2014

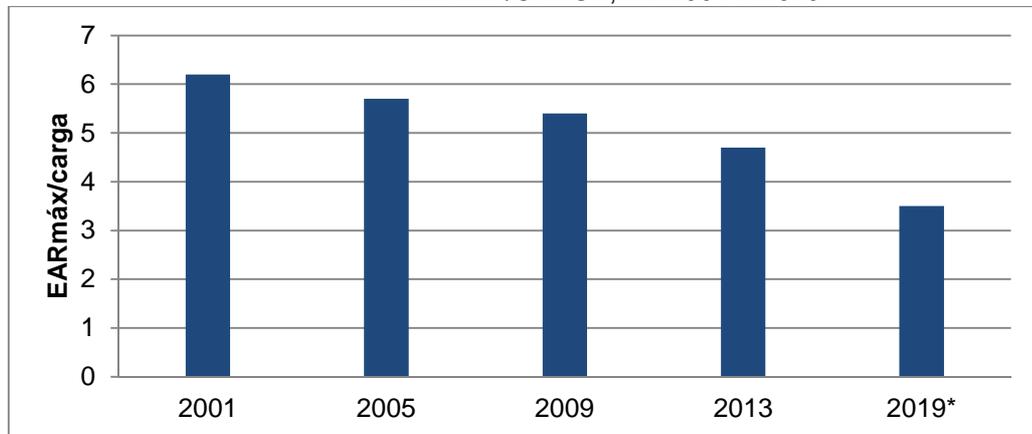


FONTE: Adaptado de Brasil (2010–2015).

Outra evidência do esgotamento do paradigma tecnológico hidroelétrico diz respeito aos reservatórios de regularização. De acordo com a EPE (BRASIL, 2015g), apesar do aumento de 54,9% previsto para a capacidade instalada total no país até o final de 2024, o aumento da capacidade de armazenamento dos reservatórios previsto para o mesmo período é de apenas 1%. O crescimento do mercado de energia estimado para o mesmo período, por outro lado, é de 45%, ou seja, bem superior ao acréscimo da energia armazenável⁵. A redução da capacidade de regularização dos reservatórios do SIN ocorrerá porque a maioria das usinas viáveis nesse período está localizada em bacias ainda inexploradas, para as quais não há previsão de instalação de usinas com reservatórios de regularização das vazões afluentes. Devido às dificuldades na obtenção de licenças ambientais, há indicação de apenas três usinas hidrelétricas com reservatórios de acumulação a montante. De acordo com o Operador Nacional do Sistema (ONS) (BRASIL, 2014c), desde o final da década de 1990 não ingressam em operação usinas hidrelétricas com reservatórios de regularização plurianual. O (GRÁFICO 4) apresenta a redução gradativa da capacidade de regularização plurianual dos reservatórios do SIN.

⁵ O Plano Decenal 2024 da EPE (BRASIL, 2015g) afirma que o suprimento do mercado será garantido, dentro do período do plano, com a expansão de outras fontes de energia elétrica complementando a expansão hidroelétrica.

GRÁFICO 4 – EVOLUÇÃO DA CAPACIDADE DE REGULARIZAÇÃO PLURIANUAL DOS RESERVATÓRIOS BRASILEIROS, EM ENERGIA ARMAZENADA MÁXIMA/CARGA, DE 2001 A 2019



FONTE: Arteiro (2012).

NOTA: * valor projetado de acordo o Plano Decenal de Energia 2019 da EPE.

Segundo a EPE (BRASIL, 2014b), grande parte das usinas viabilizadas recentemente é enquadrada na categoria “fio d’água”, ou seja, com reservatórios capazes de armazenar água por apenas algumas horas ou dias. Esta configuração do sistema gera consequências diversas, dentre as quais: a impossibilidade do controle de cheias; maior exigência das atuais usinas do sistema com capacidade de regularização, gerando grandes alterações de nível dos reservatórios ao longo de curtos ciclos hidrológicos (o que muitas vezes não é possível em função de restrições operativas hidráulicas); e maior despacho térmico para atender às exigências de carga, que não poderão ser atendidas pelo armazenamento hidráulico.

Outro fator que restringe a construção de usinas com reservatórios de regularização na região Amazônica é o seu relevo de topografia suave com quedas pouco pronunciadas nas partes mais caudalosas dos rios. Essa característica implica na geração de pouca energia, como no caso da usina UHE de Balbina (CASTRO; BRANDÃO; DANTAS, 2012b).

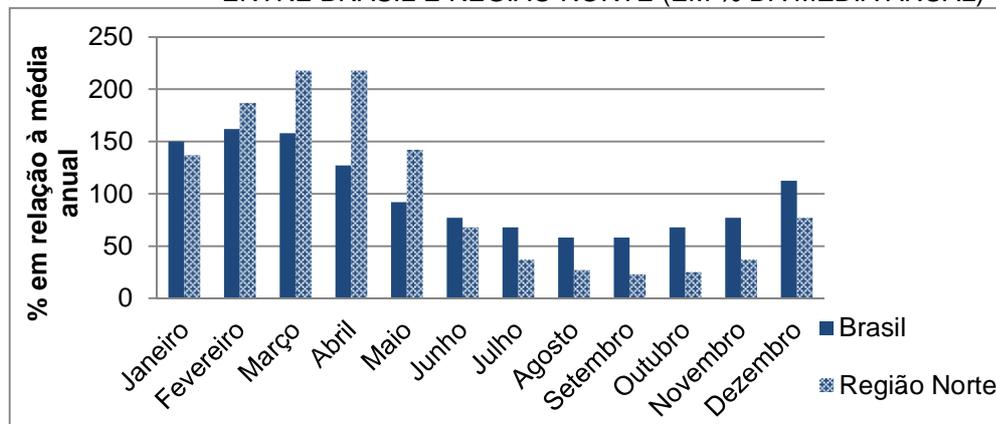
Segundo Leite (2009), as usinas sem reservatórios de regularização (fio d’água) implicam na redução da capacidade de regularização da oferta de energia ao longo do ano, ou seja, pouca geração efetiva no período seco.

Não se pode perder de vista, no entanto, que a redução da área [alagada] se faz à custa da redução da capacidade de regularização e que esta, por sua vez, implica a necessidade de

mais usinas térmicas no sistema integrado. Ambientalmente ganha-se de um lado e perde-se de outro (LEITE, 2009, p. 5).

A incorporação das hidrelétricas da região Norte, sem reservatórios capazes de compensar a sazonalidade das vazões naturais, trará ao sistema hídrico um aumento do contraste entre a energia disponível no período úmido e no período seco do ano (GRÁFICO 5).

GRÁFICO 5 – ENERGIA NATURAL AFLUENTE: COMPARAÇÃO DA MÉDIA DE LONGO TERMO ENTRE BRASIL E REGIÃO NORTE (EM % DA MÉDIA ANUAL)



FONTE: Castro; Brandão; Dantas (2010).

Segundo o ONS (BRASIL, 2014c), um exemplo claro da constatação da perda de regularização do SIN é a situação hidroenergética, entre 2012 e 2014, onde as condições climáticas desfavoráveis impediram a retomada dos estoques armazenados nos reservatórios dos subsistemas Sudeste/Centro-Oeste e Nordeste, apesar da plena utilização do parque térmico.

O (GRÁFICO 6) apresenta a evolução da produção de energia elétrica de origem hidráulica, em GWh, de 1970 a 2014. Observa-se uma queda na produção a partir de 2011, devido ao período hidrológico desfavorável, ao crescimento moderado da capacidade instalada de geração hidroelétrica e da perda da capacidade de regularização dos reservatórios.

GRÁFICO 6 – PRODUÇÃO DE ENERGIA HIDROELÉTRICA NO BRASIL, EM GWh, DE 1970 A 2014



FONTE: Adaptado de Brasil (2015f).

Castro *et al.* (2012) acreditam que a construção de usinas do tipo fio d'água irá determinar importantes implicações sobre o paradigma operativo do sistema elétrico brasileiro, pois quando uma expressiva parte da capacidade hídrica estiver vinculada a usinas fio d'água haverá necessidade de um controle mais "agressivo" dos reservatórios concomitante ao maior intercâmbio de energia entre os subsistemas e à uma complementação do parque hídrico. Os autores alertam que a intermitência e a frequência da geração são questões que precisam ser examinadas com a devida atenção porque podem trazer consequências nocivas e restritivas à segurança do suprimento caso não sejam geridas de forma correta.

[...] não se pode deixar de lado as peculiaridades do setor elétrico porque a eletricidade é um recurso de fluxo homogêneo não estocável que exige equilíbrio instantâneo entre oferta e demanda e está organizado sob a forma de indústria de rede. Neste sentido, é preciso parametrização de questões técnicas e operativas e a sua inserção na modelagem da expansão da oferta de energia elétrica de forma que a mesma garanta a segurança do suprimento em bases competitivas (CASTRO *et al.*, 2012, p. 27).

Em função do contínuo crescimento da demanda por energia e da impossibilidade de estocar água (devido as novas usinas não possuírem reservatórios de regularização), Castro *et al.* (2010, p. 8;12) argumentam que:

[...] Chegará o dia em que a geração hidrelétrica não terá capacidade de atender sozinha a carga no período seco do ano [...] torna-se nítida e imprescindível a necessidade de diversificação da matriz elétrica brasileira, sobretudo de geração complementar à hidrelétrica no período seco do ano.

Felizmente, o Brasil dispõe de diferentes fontes de energia elétrica, inclusive renováveis para ampliar a geração de energia elétrica no país. Para Castro *et al.* (2012), a questão central é a definição de quais dentre as várias fontes primárias de energia disponíveis devem ser priorizadas na expansão da geração de energia elétrica. Para os autores, é primordial garantir que o suprimento da demanda por energia seja associado à manutenção do caráter renovável e sustentável da matriz elétrica brasileira em bases competitivas de custos.

4 A TRANSIÇÃO PARA UM NOVO PARADIGMA TECNOLÓGICO NO SEGMENTO DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

Este capítulo apresenta as principais fontes alternativas de energia utilizadas no Brasil, bem como os indícios de uma mudança de paradigma tecnológico no segmento de geração, iniciada com o esgotamento do paradigma tecnológico hidroelétrico. A primeira seção apresenta as fontes alternativas de energia e a segunda seção aborda os aspectos relacionados à mudança de paradigma tecnológico.

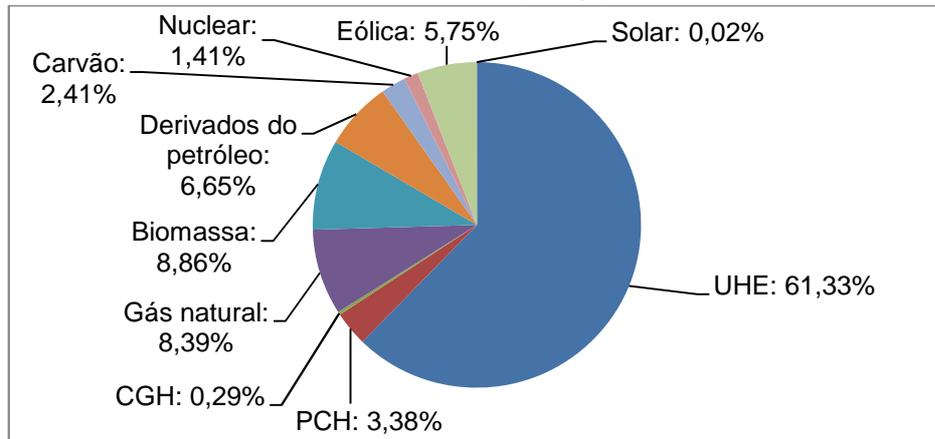
4.1 AS FONTES ALTERNATIVAS DE ENERGIA E O FUTURO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL

Com as dificuldades para continuidade da trajetória tecnológica hidroelétrica no Brasil, outras fontes de energia elétrica são acionadas para complementar a geração e garantir o atendimento da demanda por energia elétrica no país. Essa seção apresenta alguns dados sobre a geração e expansão da geração de energia elétrica por meio dessas fontes.

As fontes de energia elétrica alternativas mais utilizadas no Brasil, de acordo com o Banco de Informações de Geração (BIG) da ANEEL (2016a), são: a biomassa⁶, com 8,86% da capacidade instalada; o gás natural, com 8,39% da capacidade instalada; os derivados do petróleo, com 6,65% da capacidade instalada; a energia eólica, com 5,75% da capacidade instalada; as PCHs, com 3,38% da capacidade instalada; e, o carvão mineral, com 2,41% da capacidade instalada. O (GRÁFICO 7) apresenta a atual matriz de capacidade instalada de geração de energia elétrica brasileira.

⁶ A biomassa residual da cana-de-açúcar corresponde a 80% da capacidade instalada total de geração por biomassa no Brasil.

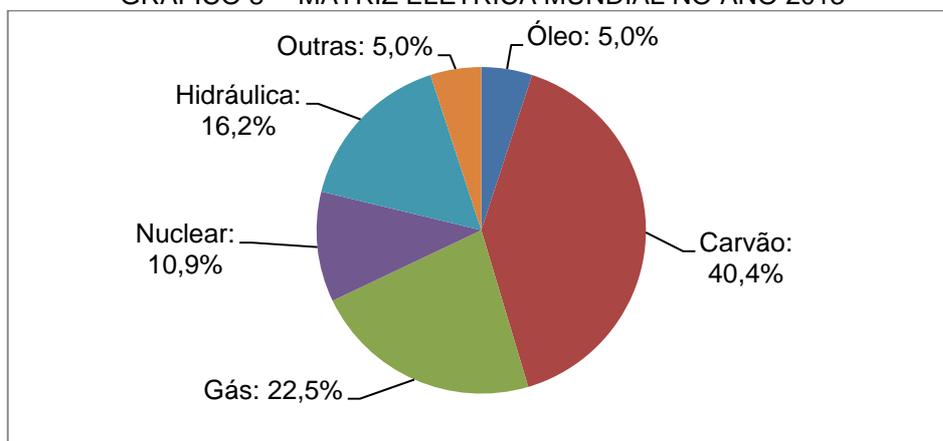
GRÁFICO 7 – MATRIZ DE CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL



FONTE: Brasil (2016a).

De acordo com os dados do BIG (BRASIL, 2016a), no início de 2016, a participação das fontes renováveis na capacidade instalada de geração no país era de 79,63% e a participação dos combustíveis fósseis era de 17,5%. O Brasil ainda possui uma matriz elétrica bem mais “limpa” que a matriz elétrica mundial⁷ (GRÁFICO 8) que é composta por, aproximadamente, 70% de insumos fósseis. No Brasil, com a expectativa de redução da capacidade instalada hidroelétrica, pode ocorrer um aumento do consumo de combustíveis fósseis para complementar a geração de energia elétrica no Brasil. O Brasil e demais países do mundo, portanto, precisam traçar estratégias para a redução do consumo de combustíveis fósseis na geração de energia elétrica.

GRÁFICO 8 – MATRIZ ELÉTRICA MUNDIAL NO ANO 2013

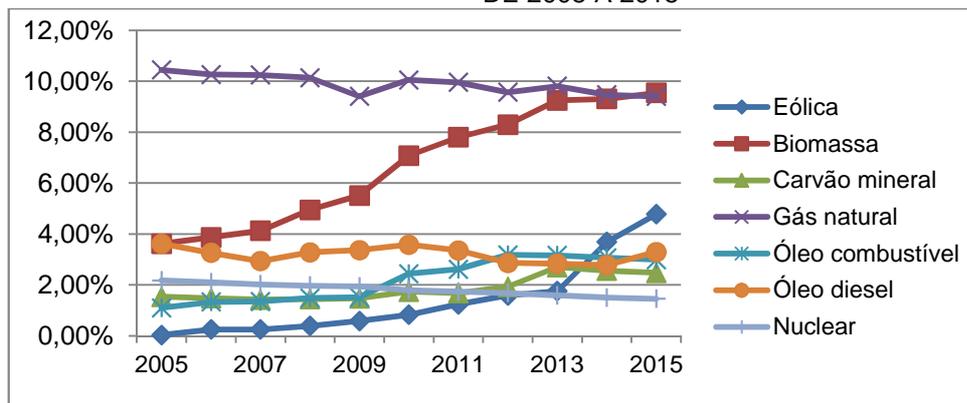


FONTE: Brasil (2014a).

⁷ Percentual da energia elétrica consumida por fonte no mundo.

O (GRÁFICO 9) apresenta a evolução da participação percentual das fontes alternativas de energia na capacidade instalada de geração de energia elétrica no país, de 2005 a 2015. Observa-se, principalmente a partir de 2009, uma expansão na capacidade instalada de geração das seguintes fontes: biomassa, energia eólica, óleo combustível e carvão mineral.

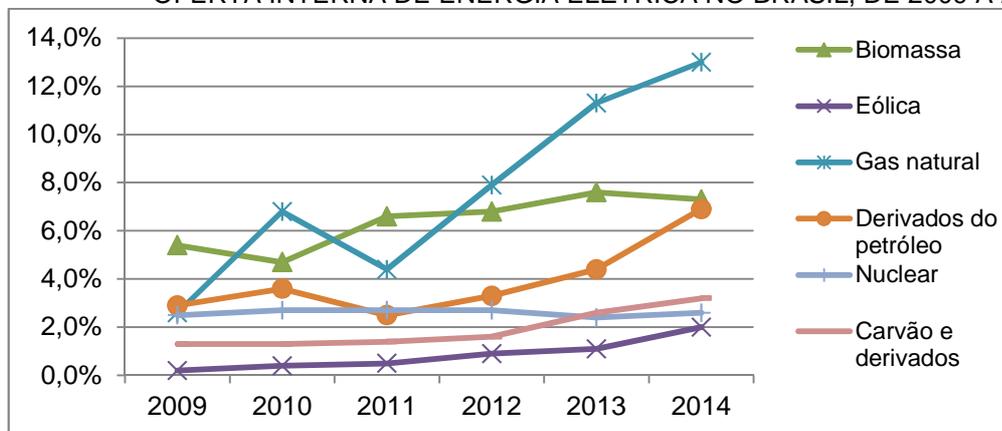
GRÁFICO 9 – PARTICIPAÇÃO PERCENTUAL DAS DIFERENTES FONTES PRIMÁRIAS DE ENERGIA ELÉTRICA NA CAPACIDADE INSTALADA DE GERAÇÃO NO BRASIL, DE 2005 A 2015



FONTE: Adaptado de Brasil (2010–2015; 2015a).

O (GRÁFICO 10) apresenta a participação dessas fontes na oferta interna de energia elétrica no Brasil, de 2009 a 2014. As fontes que mais aumentaram sua participação na oferta interna de energia elétrica no período foram o gás natural e os derivados do petróleo (ambos utilizados em usinas termelétricas), seguidos pela biomassa, energia eólica e o carvão mineral.

GRÁFICO 10 – PARTICIPAÇÃO DE DIFERENTES FONTES PRIMÁRIAS DE ENERGIA NA OFERTA INTERNA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL, DE 2009 A 2014



FONTE: Adaptado de Brasil (2010–2015).

Observar que, apesar do aumento da participação da biomassa e da energia eólica na capacidade instalada de geração do país (GRÁFICO 09), tem ocorrido um aumento da participação dos combustíveis fósseis, principalmente o gás natural e os derivados do petróleo, na oferta interna de energia elétrica (GRÁFICO 10). Esse fato deve-se ao período hidrológico desfavorável e a política de acionamento de usinas termelétricas para atender a demanda por energia elétrica no país nesses períodos.

Quanto à oferta futura de energia elétrica por meio das fontes alternativas de energia, pode-se ter uma previsão por meio da análise dos resultados leilões de energia elétrica realizados e pelos planos decenais de expansão de energia.

Os leilões são as principais formas de comercialização de energia elétrica no Brasil. Cerca de 75% da energia elétrica consumida no país é proveniente da contratação realizada nos leilões dentro do Ambiente de Contratação Regulada (ACR)⁸ (TEIXEIRA, 2014). Os leilões são processos licitatórios realizados com o objetivo de contratar a energia elétrica necessária para assegurar o pleno atendimento da demanda futura. O critério de menor tarifa é utilizado para definir os vencedores do certame, visando a eficiência na contratação de energia. Os leilões são realizados todos os anos, com data de entrega e comercialização de energia em 1, 3 ou 5 anos, após a data de sua realização. Os vencedores recebem contratos de comercialização de energia com prazo de 15 a 30 anos. Podem concorrer empreendimentos novos ou já existentes de energia e diferentes fontes de energia, de acordo com a modalidade de cada leilão.

A (TABELA 1) apresenta os valores percentuais de contratação de energia elétrica por fonte nos leilões realizados nos anos de 2010 a 2015.

⁸ O restante é comercializado no Ambiente de Contratação Livre (ACL), do qual participam geradoras, comercializadoras, importadores, exportadores e consumidores livres. O ACR é exclusivo para geradoras e distribuidoras.

TABELA 1 – PERCENTUAL DE ENERGIA ELÉTRICA CONTRATADA NOS LEILÕES REALIZADOS ENTRE 2010 E 2015

FONTE	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Gás natural	0,0%	31,4%	0,0%	0,0%	49,8%	38,9%
Eólica	29,1%	47,2%	40,2%	52,8%	21,7%	18,6%
Solar	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,3%	16,7%
UHE	60,9%	17,1%	59,8%	32,3%	13,1%	14,5%
PCH	5,3%	0,0%	0,0%	7,9%	0,8%	6,6%
Bagaço de cana	4,7%	3,7%	0,0%	6,9%	2,4%	4,7%
Carvão mineral	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	7,9%	0,0%
Outros*	0,0%	0,6%	0,0%	0,0%	5,6%	2,0%

FONTE: Adaptado de Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) (2015).

NOTA: *biomassa de cavaco de madeira e casca de arroz.

Por meio dos resultados dos leilões de energia elétrica até o ano de 2015 é possível ter uma perspectiva de quais fontes serão responsáveis pela oferta de energia elétrica a partir do ano de 2016. O percentual de energia elétrica contratada por fonte entre 2010 e 2015 nos leilões (TABELA 1), apresentou grande oscilação. No entanto, destacam-se no período: o aumento da contratação de gás natural nos últimos dois anos, 2014 e 2015; o crescimento da contratação de energia eólica entre 2010 e 2012 e posterior decréscimo entre 2014 e 2015; o aumento significativo da contratação de energia solar em 2014 e 2015; a grande oscilação na contratação de energia de UHE e também da biomassa de cana-de-açúcar; a ausência de contratação de energia elétrica gerada a partir dos derivados do petróleo (óleo diesel e óleo combustível); e, a contratação de energia produzida por carvão mineral apenas no ano de 2014 (7,9% do montante de energia contratada nesse ano).

A (TABELA 2) apresenta o valor médio da energia elétrica comercializada nos leilões realizados no ano de 2015 e o valor médio do investimento inicial dos empreendimentos novos de energia contratados no mesmo ano. Os valores demonstram que já existem projetos de fontes alternativas de energia renovável com custos bastante competitivos. No entanto, esses valores refletem apenas as médias dos investimentos e preços da energia de empreendimentos que venceram os leilões.

TABELA 2 – LEILÕES DE ENERGIA ELÉTRICA REALIZADOS EM 2015

FONTE	MÉDIA DE INVESTIMENTO INICIAL POR MW DE POTÊNCIA	PREÇO MÉDIO DE COMERCIALIZAÇÃO R\$/MWh
UHE	R\$ 6.313.075,30	R\$ 164,51
Eólica	R\$ 4.325.087,16	R\$ 187,29
PCH	R\$ 6.304.209,63	R\$ 204,65
Bagaço de cana	R\$ 2.969.936,50	R\$ 214,45
Gás natural	R\$ 2.751.645,65	R\$220,08
Solar	R\$ 4.938.249,77	R\$ 299,51

FONTE: Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) (2015).

NOTA: o carvão mineral contratado no ano de 2014 teve investimento inicial de R\$ 6.054.429,88/MW e preço médio de comercialização de R\$ 201,98/MWh.

De acordo com Sant'Ana (2012):

- os custos para produção de energia por meio de UHE tendem a aumentar devido à localização dos empreendimentos, que estão em locais mais distantes do centro de consumo e menos acessíveis;
- os custos da geração de energia eólica tendem a diminuir com o desenvolvimento e a inserção dessa tecnologia no mercado (efeito aprendido tecnológico e ganhos de capacidade de geração por unidade);
- os custos de PCHs tendem a se estabilizar, pois a tecnologia já está madura e os locais ainda estão acessíveis;
- os custos da geração de energia com bagaço da cana-de-açúcar tendem a diminuir, com o desenvolvimento e a inserção de novas tecnologias de combustão de bagaço no mercado (efeito aprendido tecnológico);
- os custos da geração de energia com gás natural tendem a diminuir, pois a tecnologia é madura e o preço do combustível tende a cair devido ao fornecimento pela Petrobrás e às grandes reservas existentes no país;
- os custos da geração de energia solar também tendem a diminuir com o efeito aprendido tecnológico e ganhos de capacidade de geração por unidade;

- e, os custos da geração de energia elétrica com carvão mineral tendem a se estabilizar em função da tecnologia ser madura, por outro lado, o custo do combustível é uma incerteza.

O Estado Brasileiro exerce, na forma da lei, as funções de planejamento do setor energético. O planejamento da expansão do setor elétrico no Brasil é realizado de forma conjunta pela EPE, empresa pública vinculada ao MME, e pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no SIN, sob a fiscalização e regulação da ANEEL. Os Planos Decenais da EPE constituem um dos principais instrumentos de planejamento energético no país, apresentando as políticas e diretrizes do Conselho Nacional de Política Energética (CNPE). Os Planos Decenais também são responsáveis pelo plano setorial de mitigação e adaptação às mudanças do clima, perseguindo as metas de emissão de gases de efeito estufa (GEE) estabelecidas na Política Nacional sobre Mudança do Clima e acordos internacionais sobre o clima (BRASIL, 2015g).

De acordo com o PDE 2024 (BRASIL, 2015g), as emissões de GEE no SIN foram altas em 2014, atingindo quase 70 milhões de toneladas de dióxido de carbono (MtCO). “Esse fato reflete as condições hidrológicas desfavoráveis verificadas nos últimos dois anos, o que obriga o sistema a acionar mais energia termelétrica com base fóssil” (BRASIL, 2015g, p. 390). A EPE espera reduzir as emissões para 30 MtCO até 2020, apontando como principal estratégia para mitigação das mudanças climáticas a manutenção da elevada participação de fontes renováveis na matriz (BRASIL, 2015g).

Após assinatura do Acordo de Paris, em 2015, o Brasil comprometeu-se a reduzir as emissões de GEE em 37% abaixo dos níveis de 2005, em 2025, e 43% abaixo dos níveis de 2005, em 2030. Para isso, o país se comprometeu a aumentar a participação de bioenergia sustentável na sua matriz energética para aproximadamente 18% até 2030, e para 45% em 2030 (BRASIL, 2016b).

Segundo a EPE, a expansão da oferta energia elétrica no período 2014–2024 deve ser realizada com custos adequados, em bases técnicas e ambientalmente sustentáveis, atendendo aos critérios econômicos e de segurança de suprimento para o sistema. O PDE 2024, publicado no final de 2015, apresenta como principal diretriz para o setor elétrico a diversificação da matriz elétrica com a

priorização da participação das fontes alternativas de energia renovável, reforçando o compromisso de manter uma matriz energética limpa, ressaltando os preços competitivos apresentados por essas fontes nos últimos leilões de energia (BRASIL, 2015g).

As próximas duas seções apresentarão as principais fontes alternativas de energia e as perspectivas de expansão de cada uma delas.

4.1.1 Os combustíveis fósseis

Os principais combustíveis fósseis utilizados na geração de energia elétrica no Brasil são: o gás natural, os derivados do petróleo (óleo diesel e óleo combustível) e o carvão mineral.

Entre os combustíveis fósseis, o gás natural é a fonte de energia que mais aumentou sua participação na oferta interna de energia elétrica e a fonte que teve o maior montante de energia elétrica contratada nos últimos leilões realizados, demonstrando um crescimento da oferta futura.

De acordo com a EPE (BRASIL, 2015g), o gás natural possui baixa presença de contaminantes em sua composição e seu processo de geração de energia possui elevada eficiência. Quando comparado aos demais combustíveis fósseis (carvão mineral e óleo combustível) é considerado menos impactante ao meio ambiente.

A expansão acelerada do consumo do gás natural no Brasil se iniciou com as importações da Bolívia (país com uma das maiores reservas da América Latina), principalmente após a entrada em operação do gasoduto Brasil/Bolívia em 1999 (BRASIL, 2008). Com a descoberta das reservas de gás natural do pré-sal, acredita-se que o país terá um considerável aumento da disponibilidade de gás natural no médio prazo, com expectativa de produção significativa a partir de 2017, podendo lhe conferir no médio prazo a autossuficiência (CASTRO *et al.*, 2010; BRASIL, 2008). De acordo com o Balanço Energético Nacional 2015 da EPE (BRASIL, 2010–2015), no ano de 2014 a média diária de produção de gás natural foi de 87,4 milhões de m³/dia e o volume de gás importado foi de 52,9 milhões de m³/dia, sendo que do total de gás natural, nacional e importado, 43% destinou-se a geração de energia elétrica. A Petrobrás (2016) prevê para o período 2020–2030 uma capacidade de oferta média estimada em 168 milhões de m³/dia de gás natural, cujo

crescimento será impulsionado pelo gás natural produzido no país. Para isso, a empresa investirá na eficiência das operações e centralização de esforços no escoamento do gás produzido no pré-sal. Segundo o PDE 2024 (BRASIL, 2015g), espera-se que até 2024 as reservas provadas e a produção nacional de petróleo e gás natural sejam duplicadas, principalmente com a contribuição dos recursos descobertos na área do pré-sal.

Quanto aos derivados do petróleo, as usinas abastecidas por óleo diesel no Brasil estão instaladas principalmente na região Norte para atender os Sistemas Isolados – que ainda não estão conectados ao SIN. Os custos do óleo utilizado são repassados a todos os consumidores de energia elétrica do país por meio do encargo Conta de Consumo de Combustíveis (CCC) embutido na tarifa final. Segundo a ANEEL, futuramente, com a expansão do SIN e interligação dessas regiões há expectativa de que essas termelétricas possam vir a ser desativadas, principalmente as de menor porte ou de baixa eficiência (BRASIL, 2008). A maior parte das demais usinas movidas com derivados de petróleo opera com óleo combustível ou gás de refinaria e está distribuída por todo o território nacional, com ênfase para a região Sudeste. Todas são colocadas em operação para garantir o atendimento em momentos de pico de demanda ou para complementar a oferta proveniente das hidrelétricas em períodos de estiagem (BRASIL, 2008).

Para Castro *et al.* (2010), as usinas termelétricas movidas a óleo combustível caracterizam-se por um elevado custo do combustível, incompatível com a geração na base do sistema no período seco ou mesmo para operarem na ponta do sistema (picos de despacho de energia). Segundo Tolmasquim (2005), a tecnologia utilizada nessas termelétricas possui uma eficiência bastante baixa (25 a 30%) em relação aos padrões atuais o que compromete significativamente o preço da energia. Além disso, o óleo combustível utilizado tem um alto preço no mercado brasileiro, ficando sujeito inclusive, as variações do preço do barril do petróleo comercializado nos mercados mundiais. Essas usinas, ainda apresentam taxas significativas de emissão de gases poluente, implicando na formação de chuva ácida e no agravamento do efeito estufa. Em função desses aspectos negativos, as usinas termelétricas movidas a óleo diesel e óleo combustível não estão contempladas no último Plano de Expansão de Energia 2024 (BRASIL, 2015g). Essas fontes também não foram contratadas nos leilões de energia realizados nos últimos cinco anos. No

entanto, existem usinas desse tipo em operação, uma vez que os contratos de comercialização de energia elétrica variam ente 15 e 30 anos.

As usinas termelétricas movidas a carvão mineral apresentam custo variável inferior àquele verificado em térmicas movidas a outros combustíveis fósseis (CASTRO *et al.*, 2010). No entanto, a utilização do carvão mineral possui forte impacto socioambiental provocado em todas as etapas do processo de produção e também no consumo, pois o carvão é uma das formas de produção de energia mais agressivas ao meio ambiente e que mais emitem gás carbônico (CO₂). A extração, por exemplo, provoca a degradação das áreas de mineração e a combustão é responsável por emissões do CO₂ (BRASIL, 2008). A utilização do carvão provoca ainda impactos ambientais locais, entre os quais, a emissão de material particulado como o SO_x (dióxido de enxofre e anidrido sulfídrico) e NO_x (óxido nítrico) (CASTRO *et al.*, 2010). A EPE (BRASIL, 2015g) destaca ainda, como um dos principais aspectos negativos desse combustível, o uso e a possibilidade de contaminação de recursos hídricos.

As usinas térmicas movidas a combustíveis fósseis, de modo geral, possuem um alto custo econômico e ambiental por emitirem grande quantidade de CO₂, principal gás causador do efeito estufa. O (QUADRO 1) apresenta a quantidade de CO₂ emitido por fonte de energia elétrica.

QUADRO 1 – EMISSÕES DE CO₂ POR DIFERENTES TIPOS DE FONTES DE ENERGIA ELÉTRICA

FONTE DE ENERGIA	EMIÇÃO DE CO ₂ (EM KG POR MWh)
Gás natural (ciclo aberto)	440
Gás natural (ciclo combinado)	400
Óleo	550
Carvão	800
Hidrelétrica	25
Eólica	28

FONTE: Castro; Brandão; Dantas (2009).

O PDE 2024 (BRASIL, 2015g) prevê uma expansão de 10.500 MW em usinas termelétrica até 2024. Em termos percentuais, o plano prevê que a participação dos combustíveis fósseis na capacidade instalada de geração passará

de 14,2%, em dezembro de 2014, para 14,4% em dezembro de 2024. No entanto, no início de 2016, de acordo com os dados do BIG (BRASIL, 2016a), os combustíveis fósseis representavam 17,5% da capacidade instalada de geração no país.

Segundo a EPE (BRASIL, 2015g), a expansão termelétrica planejada está atrelada à disponibilidade e competitividade dos projetos, preferencialmente de usinas movidas a gás natural. Em caso de inviabilidade, a alternativa utilizada será o carvão mineral. O óleo diesel e o óleo combustível não serão alternativas para a expansão da geração de energia elétrica no país.

De acordo com o PDE 2024, diante da pequena expansão da capacidade hidroelétrica, com maior predominância de usinas fio d'água (há previsão de apenas 3 usinas com reservatórios de regularização), redução gradativa da relação estoque/mercado⁹, aumento da sazonalidade ao longo dos meses e aumento de entraves ambientais para licenciamento, as usinas termelétricas serão de suma importância para prover a garantia necessária ao atendimento do mercado. Além disso, as usinas termelétricas apresentam características técnicas desejáveis ao SIN, principalmente por não estarem sujeitas à vulnerabilidade climática, conferindo maior segurança energética ao país (BRASIL, 2015g).

Segundo o ONS (BRASIL, 2014c), em decorrência da perda de regularização do SIN, o uso de geração termelétrica tem sido mais intenso nos últimos anos, mesmo para anos hidrológicos próximos à média de longo termo¹⁰. A geração termelétrica também vem sendo necessária para complementação do atendimento à demanda máxima ao final de cada estação seca, em função da perda de potência por deplecionamento dos reservatórios, bem como no verão, em função da elevação da temperatura.

Castro e Brandão (2013) chegaram a afirmar que o contínuo acionamento de usinas termelétricas (a combustíveis fósseis) ao longo do ano de 2013, configuraria o advento de um novo padrão de geração elétrica no país, o paradigma hidrotérmico. Para os autores, essa mudança de paradigma tecnológico se iniciou a

9 A razão estoque/mercado representa a capacidade de regularização, onde o numerador, estoque, é a capacidade de armazenamento máxima dos reservatórios do SIN, e o denominador, mercado, é o mercado total de energia abatido das parcelas de geração relativas à contribuição das demais fontes de geração.

10 Média aritmética das vazões naturais médias, correspondentes a um mesmo período, verificadas durante a série histórica de observações. A vazão média a longo termo é normalmente determinada para cada mês do ano, podendo, também, ser calculada para outros intervalos de tempo (Associação Nacional dos Consumidores de Energia Elétrica, 2015).

partir de 2007–2008 com o início do período hidrológico desfavorável que resultou na diminuição da relação entre a energia armazenada nos reservatórios das hidrelétricas e o consumo de eletricidade no país. As usinas termelétricas teriam sido eleitas como melhor fonte de energia complementar por serem mais “seguras”, uma vez que podem ser acionadas quando se precisa, diferentemente dos parques eólicos e de bioeletricidade, que estão sujeitos à vontade da “mãe natureza”. Segundo os autores:

O acionamento das UTE durante todo o ano de 2013 indica que o novo paradigma hidrotérmico veio para ficar, o que exigirá um esforço muito grande da política e do planejamento energético, que terá que alterar práticas, ações, métodos e modelos computacionais (CASTRO; BRANDÃO, 2013, p. 1).

Para o ONS (BRASIL, 2014c), é importante o aumento da participação termelétrica convencional (carvão mineral e gás natural) no médio prazo, para complementação da geração hidroelétrica e para mitigar as intermitências das fontes não convencionais como as usinas eólicas e, futuramente, as usinas solares.

De acordo com Castro e Brandão (2013), o ONS adotou nova metodologia, que persegue, desde abril de 2013, um determinado nível (meta) dos reservatórios em novembro, para garantir o suprimento no ano seguinte. Como resultado, as UTE passaram a ser acionadas de forma mais intensa ao longo do ano.

Criticamente, Leite (2014) alerta que nos últimos anos o Brasil está entrando na contramão de sua própria história, aumentando indiscriminadamente, na capacidade instalada no país, a participação relativa das termelétricas a combustíveis fósseis.

Para Sant’Ana (2012), a geração de energia termoelétrica é cara e poluidora e não deveria receber subsídios do governo. Segundo o autor, é preciso traçar uma política de transição para fontes mais sustentáveis e reorientar os subsídios das termelétricas para as fontes renováveis alternativas.

Segundo Castro *et al.* (2010), a expansão ótima da oferta brasileira de energia elétrica requer análise das diferentes possibilidades disponíveis e pleno conhecimento da transição e evolução da matriz elétrica brasileira. Os autores defendem que a expansão deve ser a mais adequada do ponto de vista da sustentabilidade econômica e ambiental e criticam o considerável peso dos combustíveis fósseis na matriz elétrica brasileira.

De acordo com Leite (2009), o papel das usinas térmicas deveria ser estritamente complementar, visando firmar a geração hidráulica nos meses de seca, com perspectiva plurianual, operando com baixo fator de capacidade e reduzido consumo médio de combustível.

Para Sant'Ana (2012), as fontes alternativas renováveis poderiam exercer o mesmo papel complementar das termelétricas, com custos mais baixos e com menores impactos sobre o meio ambiente e os subsídios concedidos às termelétricas poderiam ser revertidos para as fontes alternativas renováveis.

4.1.2 As fontes renováveis de energia

O Brasil possui grande potencial de energia eólica, solar e biomassa, condições que, segundo Castro, Brandão e Dantas (2012b), permitem manter durante muitos anos uma matriz sustentável. Segundo os autores, a exploração de fontes de energia renováveis no Brasil sempre representa a melhor alternativa, pois possui custos competitivos em termos internacionais, um caso único dentre os países de maior porte.

Segundo Leite (2009), fugindo da continuidade que se vai estabelecendo na construção de termelétricas a combustíveis fósseis, apresentam-se como potencialmente viáveis, além da expansão da própria hidroeletricidade, a biomassa da cana-de-açúcar, em particular na região sudeste, e a energia eólica, principalmente no nordeste. Segundo o autor, essas fontes podem contribuir para a redução do ímpeto da expansão indiscriminada no uso de combustíveis fósseis.

Sant'Ana (2012) considera que apesar de renovável a geração por médias e grandes usinas hidrelétricas possuem um significativo impacto ambiental, principalmente na região Amazônica, onde se concentram os atuais projetos de expansão da matriz hidrelétrica brasileira. Por isso, defende como principais alternativas para a matriz de energia elétrica a energia eólica, a biomassa, a energia solar fotovoltaica e as pequenas centrais hidrelétricas, que podem contribuir para a expansão da geração elétrica com menores impactos ambientais e sociais e poderiam reduzir as emissões de gases do efeito estufa.

Quanto à energia eólica, o Brasil é favorecido em termos de ventos, que se caracterizam por uma presença duas vezes superior à média mundial e pela volatilidade de 5% (oscilação da velocidade), o que dá maior previsibilidade ao

volume a ser produzido. Além disso, como a velocidade costuma ser maior em períodos de estiagem, é possível operar as usinas eólicas em sistema complementar com as usinas hidrelétricas, de forma a preservar a água dos reservatórios em períodos de poucas chuvas (BRASIL, 2008). Segundo Castro *et al.* (2012), o potencial eólico brasileiro auferido a 100 metros de altura está estimado em valor superior a 300 GW. Segundo o MME (BRASIL, 2015d), no ano de 2014, o estado do Ceará detinha a maior proporção de geração eólica 30,9%, seguido do Rio Grande do Norte, com 30,8%.

De acordo com o PDE 2024 (BRASIL, 2015g), a participação da energia eólica na matriz de energia elétrica brasileira será de 8% em 2024, devido à expansão de quase 20 GW no período, nas regiões Nordeste e Sul. As contratações nos últimos leilões demonstram que a energia eólica atingiu preços bastante competitivos e impulsionaram a instalação de uma indústria nacional de equipamentos para o atendimento desse mercado. Para a EPE, essa fonte ainda apresenta grande potencial a ser explorado, consolidando-se como um dos principais componentes da expansão da matriz elétrica brasileira (BRASIL, 2015g).

As PCHs se caracterizam por apresentar potência instalada entre 1 e 30 MW e área de reservatório inferior a 3 Km². Os impactos ambientais locais referentes a esse tipo de empreendimento é relativamente menor do que aqueles provocados por UHEs e suas emissões de GEE podem ser consideradas desprezíveis. A relação área alagada e potência instalada das PCHs em operação é de 0,14 Km²/MW, enquanto que para as UHEs esse índice é de 0,46 Km²/MW. Entretanto, os processos de licenciamento das PCHs frequentemente seguem o mesmo trâmite de UHEs. Essa complexidade, junto aos preços da construção civil, se reflete no custo para a produção de energia, um dos maiores entraves para a competitividade dessa fonte e sua expansão (EPE, 2015). O PDE 2024 defende a expansão da geração por meio dessa fonte, pois as PCHs possuem tecnologia de geração madura, custos unitários estáveis e colaboram para o atendimento da demanda de energia e de ponta de forma limpa e eficiente. De acordo com a EPE, a implantação de um conjunto de pequenas centrais hidrelétricas em uma mesma bacia hidrográfica pode causar efeitos cumulativos e sinérgicos significativos, principalmente sobre os ecossistemas aquáticos. Além disso, as PCHs estão próximas aos grandes centros de carga, uma vantagem para o SIN. A previsão do PDE 2024 é de expansão de PCHs principalmente nas regiões Sul e Sudeste (BRASIL, 2015g).

Segundo a ANEEL (BRASIL, 2008), a biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Segundo o PDE 2024 (BRASIL, 2015g), existe significativa folga para ampliação da geração de bioeletricidade, a partir da biomassa residual da cana-de-açúcar. Sua produção poderia variar entre 1,8 GW médios e 7,1 GM médios, segundo estudo do potencial técnico de produção. As principais vantagens da bioeletricidade é sua complementariedade com a hidroeletricidade (pois o período de safra da cana-de-açúcar coincide com o período seco do ano) e a proximidade das usinas aos maiores centros consumidores. Além disso, a bioeletricidade possui balanço neutro de emissões de CO₂ já que o carbono resultante da queima é o mesmo que foi absorvido no processo de fotossíntese. O PDE 2024 aponta como fatores de limitação a essa fonte de energia o fato de algumas usinas se encontrarem longe dos pontos de distribuição de energia e os problemas com licenciamento, por descasamento entre os prazos dos leilões e as respostas dos órgãos ambientais.

Quanto à energia solar, a capacidade instalada de geração ainda é pouco expressiva, mas com expectativa de crescimento. De acordo com Sant'Ana (2012), o Brasil recebe boa incidência de radiação solar diária durante a maior parte do ano em todo o território nacional. Além de boa incidência de radiação solar, o Brasil possui grandes reservas de silício, matéria prima indispensável para a produção dos painéis solares. Segundo o autor: “Essa conjunção de fatores representa uma boa oportunidade para o investimento em pesquisa, desenvolvimento e implantação comercial de toda a cadeia tecnológica da energia solar” (SANT’ANA, 2012, p. 17).

O PDE 2024 apresenta a previsão de expansão das fontes alternativas de energia renovável de forma conjunta. A previsão é de que a participação da biomassa, da energia eólica, das PCHs e da energia solar totalizarão 27,3% da matriz de energia elétrica em 2024. A expectativa é de que a participação das fontes renováveis (incluindo a hidroeletricidade) na matriz de energia elétrica atingirá 86% em 2024 (BRASIL, 2015g).

Segundo o PDE 2024, as fontes alternativas renováveis como a energia eólica e biomassa, contribuem para a complementação da matriz de energia elétrica brasileira, pois possuem perfil de geração superior no período seco. No entanto, em razão da intermitência da geração eólica e da sazonalidade da biomassa, o planejamento ainda defende a expansão do parque termoelétrico a combustíveis fósseis (principalmente gás natural e carvão mineral) para elevar a segurança

operativa do SIN e o nível adequado dos reservatórios das hidrelétricas (BRASIL, 2015g).

Sant'Ana (2012) acredita que o planejamento da expansão do SIN deve considerar os princípios básicos que já estão previstos nos planos decenais de energia elétrica da EPE, como a sustentabilidade, menores custos e diversificação da matriz elétrica. Contudo, a falta de metas de longo prazo de inserção de fontes renováveis alternativas faz com que o uso dessas fontes não seja devidamente contemplado nos planos de expansão da oferta de eletricidade, ficando em segundo plano.

Segundo Sant'Ana (2012, p. 11), as principais barreiras às fontes renováveis de energia dizem respeito a escala de produção, “com um parque industrial ainda modesto e um mercado restrito, os custos de instalação permanecem altos”. O principal componente do custo desses empreendimentos é o investimento inicial. Portanto, políticas de crédito e incentivos fiscais podem ser eficazes para diminuir custos e aumentar a competitividade dessas fontes. O autor acredita que as barreiras de mercado e os custos de produção podem ser derrubados por meio de políticas públicas de investimento no setor, com o estabelecimento de metas de ampliação dessas fontes na matriz energética do país e incentivos fiscais e de crédito para expandir o mercado e estimular os investimentos privados.

Para Sant'Ana (2012), são importantes as ações que promovam economia de escala e aprendizado tecnológico, aliadas a inovações técnicas e institucionais. Na fase de pesquisa e desenvolvimento, as tecnologias de geração de energia por fontes renováveis alternativas são caras, mas sua utilização reduz os custos gradativamente. Quanto mais plantas forem instaladas, mais experiência será acumulada e menores serão os custos médios de produção. O autor dá exemplos de alguns países europeus:

[...] Para se avaliar a dimensão do impacto da curva de experiência nos custos de produção de energia elétrica por fontes renováveis alternativas, na Holanda, entre 1993 e 2001, a cada vez que a produção de sistemas fotovoltaicos dobrou os custos de produção foram reduzidos em 85%. Da mesma forma, na Espanha e no Reino Unido, entre 1990 e 1998, a cada vez que a produção de geradores eólicos dobrou o custo de produção caiu cerca de 80% (SANT'ANA, 2012, p. 20–21).

No Brasil, algumas das fontes renováveis alternativas para a geração de energia elétrica ainda estão em estágio inicial, com altos custos, ou em transição para o estágio intermediário. Nessas etapas iniciais, políticas públicas da área de ciência e tecnologia são extremamente relevantes, porque funcionam como indutores para o desenvolvimento tecnológico e para a posterior implantação das novas tecnologias (SANT'ANA, 2012).

A energia solar fotovoltaica, por exemplo, ainda é a mais cara. Para ampliar o uso dessa fonte, o ideal é que se estabeleçam políticas de pesquisa e desenvolvimento para que o Brasil possa dominar toda a cadeia produtiva da energia solar e passe a incluir a geração fotovoltaica em sistemas isolados ou de autoprodução (SANT'ANA, 2012).

Já as usinas eólicas atingiram preços bastante competitivos e impulsionaram a instalação de uma indústria nacional de equipamentos para atendimento a esse mercado. Segundo a EPE (BRASIL, 2014b), sua participação crescente na matriz de energia elétrica resultou de uma combinação de fatores relacionados ao cenário externo, ao desenvolvimento tecnológico e da cadeia produtiva, além de aspectos regulatórios, tributários e financeiros.

A biomassa, assim como a energia eólica, foi uma das fontes de energia renovável que mais aumentou sua participação na capacidade instalada no país.

Segundo Sant'Ana (2012), o estágio de desenvolvimento atual das tecnologia de geração energia eólica e por meio de biomassa permite ganhos de produtividade e escala e melhorias no desempenho técnico-econômico. Para o autor, a ampliação da participação dessas fontes no SIN é viável e, para isso, recomenda-se o estabelecimento de metas de inclusão e a destinação de incentivos fiscais e de crédito.

4.2 A MUDANÇA DE PARADIGMA TECNOLÓGICO E OS FATORES ENVOLVIDOS

A queda progressiva da participação da hidroeletricidade e a expansão de outras fontes na capacidade instalada de geração e na oferta de energia configuram uma importante mudança de paradigma tecnológico no segmento de geração de energia elétrica brasileiro. Isso porque a diversificação da matriz elétrica, com a utilização de diferentes fontes para geração de energia, implica em uma mudança

operativa do SIN e um novo padrão para a expansão do sistema elétrico nacional. A utilização de diferentes fontes de energia implica ainda na utilização de diferentes tecnologias de geração, diferentes arranjos produtivos e a modificação do perfil da matriz de energia elétrica brasileira.

A mudança operativa do SIN diz respeito a um maior controle dos reservatórios das UHE. Com a redução da capacidade de regularização dos reservatórios, cujo nível de armazenamento cresce em intensidade muito inferior a demanda por energia, existe a necessidade de um maior controle dos níveis de segurança dos reservatórios e acionamento mais frequente de usinas termelétricas, com o objetivo de preservar esses níveis de segurança. Segundo a EPE (BRASIL, 2015g), as fontes alternativas renováveis como a biomassa e a energia eólica ajudam a complementar a geração, no entanto, também dependem de condições climáticas para garantir a geração.

Tais características tornam a operação do sistema mais complexa, exigindo adaptações para garantir a segurança no suprimento de energia. [...] é preciso entender a penetração dessas fontes no contexto da diversificação da matriz elétrica como um todo (BRASIL, 2015g, p. 402).

Com a expectativa de queda gradativa da participação da hidroeletricidade e da capacidade de regularização, será cada vez mais necessária a complementação da geração de energia elétrica por meio de outras fontes. Nesse contexto, cresce a preocupação em preservar o perfil renovável e sustentável da matriz elétrica e, para que isso ocorra, será necessário limitar a expansão e utilização dos combustíveis fósseis na geração. O planejamento da expansão da geração de energia elétrica precisa analisar as fontes de energia existentes e definir o nível desejado de participação de cada uma delas de forma a garantir a segurança do suprimento de energia elétrica no país.

Cada fonte de energia alternativa possui características diferentes, portanto, ao se traçar uma matriz elétrica desejada é importante estabelecer políticas adequadas de incentivos às fontes de energia que serão priorizadas. Nesse sentido, as políticas públicas e o planejamento do setor elétrico têm sido criticados, em função da ausência de metas claras de longo prazo e medidas efetivas de priorização de fontes alternativas renováveis.

Diante do frequente acionamento das termelétricas, alguns autores (CASTRO; BRANDÃO, 2013) afirmam que o novo paradigma tecnológico da geração de energia elétrica no Brasil é um padrão hidrotérmico, isto é, um modelo com predominância de geração hidrelétrica e termelétrica (de origem fóssil). No entanto, acredita-se que, embora isso possa indicar uma tendência, ainda é cedo para afirmar que esse é o novo paradigma tecnológico do segmento geração. O estabelecimento de um novo paradigma tecnológico é um processo geralmente lento, onde o paradigma tecnológico antigo e um novo paradigma tecnológico podem coexistir por um longo período de tempo.

Um paradigma tecnológico implica em heurísticas e visões específicas sobre como fazer as coisas e como melhorá-las, essas “regras” são compartilhadas e aceitas pelos diversos agentes envolvidos na solução de um determinado “problema” tecnológico. O paradigma tecnológico envolve ainda a adoção de um modelo e padrão expresso por meio de um material tecnológico selecionado, incluindo fortes prescrições na direção da mudança técnica a seguir e aquelas a negligenciar (DOSI, 1982). Acredita-se que nenhuma fonte de energia ou tecnologia de geração atualmente utilizada no segmento de geração de energia elétrica no Brasil se enquadra na definição de paradigma tecnológico.

Apesar da falta de metas claras e medidas efetivas, o governo tem sinalizado, por meio dos planos decenais de expansão de energia, o objetivo de preservar uma participação elevada de renováveis na matriz de energia elétrica, diminuir as emissões de poluentes e agregar sustentabilidade técnica, econômica, social e ambiental no setor elétrico. O que não condiz com a adoção de um padrão hidrotérmico.

Os dados apresentados nas seções anteriores deste capítulo também demonstram que não há ainda uma regularidade e estabilidade no consumo das fontes de energias alternativas e na contratação dessas fontes nos últimos anos. Além disso, o governo fornece incentivos para as fontes alternativas renováveis e não renováveis (incluindo subsídios para termelétricas movidas a combustíveis fósseis). Esse cenário reforça o fato de que o segmento de geração de energia elétrica está passando por um período de transição, onde ainda não ocorreu, de forma definitiva, o estabelecimento de um novo paradigma tecnológico. O incentivo a diversificação da matriz elétrica por meio de diferentes fontes de energia (renováveis

e não renováveis) demonstra que o objetivo maior do governo é evitar um desabastecimento de energia elétrica no país.

Dentre as medidas adotadas, merece destaque a política de não expandir a geração de energia por meio de usinas termelétricas movidas a óleo diesel e óleo combustível, uma vez que essas fontes encarecem a geração e são poluentes, entre outros aspectos negativos. Por outro lado, a EPE e o ONS ainda defendem o uso de usinas termelétricas movidas a carvão mineral. Esse fato denota uma contradição entre o discurso e as práticas adotadas pelo governo, uma vez que o carvão mineral é o combustível fóssil que provoca maiores prejuízos ao meio ambiente.

Uma matriz elétrica com elevada participação de energias renováveis e sustentáveis somente será possível com a eliminação das barreiras às fontes renováveis alternativas e uma política que estabeleça de forma efetiva as metas de expansão dessas fontes e de redução dos combustíveis fósseis. Caso isso ocorra, será possível o estabelecimento de um novo paradigma tecnológico no segmento de geração de energia elétrica, mais adequado do ponto de vista da sustentabilidade.

De acordo com Dosi (1982) e Kemp (1994), os fatores determinantes para o surgimento de um novo paradigma tecnológico são muitas vezes as dificuldades técnicas ou econômicas para se seguir em uma determinada trajetória tecnológica e a existência de necessidades não atendidas por meio da trajetória tecnológica vigente. Ou seja, o que tem ocorrido no caso da hidroeletricidade. Um novo paradigma também depende de fatores como: uma nova base de conhecimento, novas oportunidades tecnológicas, a identificação pelos agentes de benefícios econômicos e garantias de apropriabilidade, a existência de um mercado potencial, demanda, custos compatíveis etc. No entanto, Dosi (1982) ressalta que os fatores mais importantes para o surgimento de um novo paradigma tecnológico são os fatores econômicos aliados aos fatores institucionais, que funcionam como um “dispositivo seletivo” na seleção de um novo paradigma tecnológico dentro de um universo maior de possibilidades. Os fatores institucionais se referem aos diversos agentes, atores, organizações e instituições que possam interferir no processo de inovação e na seleção de uma trajetória a se seguir. Dentre os fatores institucionais, Dosi (1982) e Kemp (1994) acreditam que o governo é o principal agente de indução e de seleção de um novo paradigma por meio de suas políticas públicas. Para Kemp (1994), cada novo paradigma exige uma modificação da infraestrutura que só pode

ocorrer como resultado de mudanças institucionais e regulatórias, que são realizadas pelo governo.

O segmento de geração de energia elétrica no Brasil é especialmente dependente de políticas públicas, uma vez que sua regulação, planejamento, monitoramento e expansão são de responsabilidade do Governo Federal. A elaboração de políticas públicas e planejamento para o setor elétrico são os principais instrumentos de incentivo e indução de um novo paradigma tecnológico.

Acredita-se que sem um planejamento de longo prazo e uma focalização institucional por parte do Governo, o perfil renovável da matriz de energia elétrica brasileira pode ser comprometido com a adoção de um novo padrão de geração inadequado do ponto de vista da sustentabilidade econômica e ambiental e o potencial para produção de energias renováveis, como a bioeletricidade, pode ser desperdiçado.

A adoção de um novo modelo de geração de energia elétrica baseado em fontes de energias renováveis e sustentáveis enfrenta diversos obstáculos, como: custos maiores em relação à energia hidroelétrica, em razão da menor escala de produção e por não ter se aproveitado ainda dos efeitos aprendizagem; dificuldades de acesso à rede de distribuição por falta de infraestrutura adequada; falta de apoio público e ausência de incentivos que poderiam diminuir os custos de produção (KEMP, 1994).

Outras dificuldades estão relacionadas ao padrão antigo (KEMP, 1994). Os agentes econômicos e o próprio Governo ainda estão acostumados ao modelo baseado na hidroeletricidade, que apresenta custos mais baixos por possuir uma escala maior de produção e usufruir de uma infraestrutura e um sistema que estão prontos e foram planejados para sua utilização. O conhecimento acumulado e os aperfeiçoamentos ao longo da trajetória hidroelétrica também favorecem essa fonte de energia.

O surgimento de um novo paradigma tecnológico está relacionado à geração de uma inovação radical, implicando em novas bases de conhecimento, novas heurísticas de busca e novos *designs* dominantes. Os custos envolvidos na transição entre tecnologias e os efeitos de aprendizagem (por parte da hidroeletricidade) podem explicar a lentidão do processo de difusão de uma nova tecnologia, ou inovação radical, e o estabelecimento de um novo paradigma tecnológico no segmento de geração de energia elétrica.

A transição para um novo modelo de geração implica no aperfeiçoamento de novas tecnologias e adaptação da infraestrutura existente para compatibilizar a geração por meio de fontes alternativas que muitas vezes são produzidas em menor escala e de forma distribuída¹¹ geograficamente, diferentemente da geração hidroelétrica que possui maior porte de geração e é uma fonte centralizada de energia. Além disso, a transição implica na mudança de hábitos, atitudes e crenças dos agentes envolvidos.

Kemp (1994) acredita que a viabilidade econômica das soluções tecnológicas ambientalmente preferíveis depende fortemente de políticas públicas, para isso é preciso também uma boa compreensão, por parte do governo, das barreiras que impedem as tecnologias ambientalmente favoráveis de serem introduzidas no mercado. Essas barreiras podem ser econômicas (quando a nova tecnologia não é capaz de competir com as tecnologias convencionais, dada a estrutura de custo dominante), elas podem ser de natureza técnica (falta de tecnologias complementares, infraestrutura, competências adequadas ou problemas de integração na infraestrutura técnica existente), e podem ser sociais e institucionais (relacionadas com as leis, atitudes, percepções, hábitos). Para lidar com estas barreiras, uma política integrada e coordenada é necessária, que envolva não só a implementação de impostos e subsídios que mudam os custos marginais da utilização de tecnologias específicas ou a fixação de normas de redução das emissões, mas também a formulação de metas de longo prazo e a criação de uma rede de atores para sustentar uma nova trajetória tecnológica.

O entendimento das barreiras existentes para o aumento da participação das fontes alternativas de energia renovável na matriz de energia elétrica é fundamental para a criação de políticas públicas de incentivo a essas fontes, induzindo um novo paradigma tecnológico no segmento de geração de energia elétrica no Brasil baseado na sustentabilidade econômica e ambiental. Cada fonte, entretanto, apresenta potenciais e barreiras diferentes, em função de suas peculiaridades, tecnologias de geração, estágio de desenvolvimento tecnológico etc. Por esse motivo, o trabalho elegeu a biomassa residual da cana-de-açúcar para exemplificar as oportunidades e barreiras para o país ampliar a produção de energia elétrica por meio de fontes alternativas de energia renovável. A cana-de-açúcar foi escolhida por

¹¹ A geração distribuída (GD) é localizada próxima ao consumidor final, objetivando o seu atendimento prioritário, podendo ou não gerar excedentes para a rede. A GD de grande porte está associada à lógica industrial enquanto as de menor porte estão vinculadas à realidade de residências e do setor comercial (EPE, 2015).

representar 80% da energia elétrica produzida a partir de biomassa no Brasil. A biomassa é a fonte de energia renovável alternativa com maior participação na matriz elétrica brasileira. Além disso, a cana-de-açúcar ainda possui um grande potencial de produção a ser explorado.

5 BIOELETRICIDADE DA BIOMASSA RESIDUAL DA CANA-DE-AÇÚCAR

Este capítulo tem por objetivo apresentar a bioeletricidade, energia elétrica produzida a partir da biomassa residual da cana-de-açúcar, rejeitos do processo produtivo do álcool e do açúcar. A primeira seção deste capítulo aborda o uso da biomassa para produção de energia elétrica e o potencial de produção de bioeletricidade pelo setor sucroalcooleiro. A segunda seção apresenta as alternativas tecnológicas para a produção de bioeletricidade. A terceira seção apresenta as vantagens da bioeletricidade para o setor elétrico brasileiro e as oportunidades e incentivos para o aumento da produção de bioeletricidade. E a quarta seção apresenta as principais barreiras e entraves para um maior aproveitamento do potencial de produção da bioeletricidade e as dificuldades para uma maior inserção da bioeletricidade na matriz elétrica brasileira.

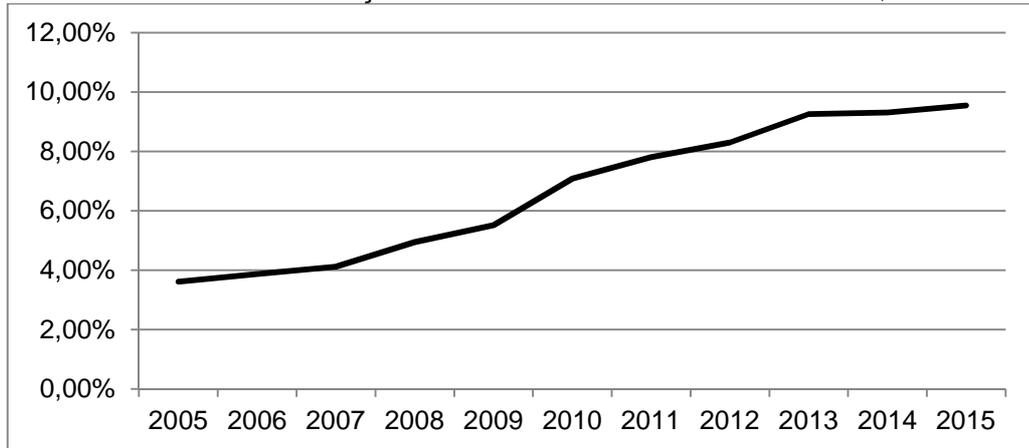
5.1 A BIOMASSA E O POTENCIAL DE PRODUÇÃO DE BIOELETRICIDADE PELO SETOR SUCROALCOOLEIRO

Segundo a ANEEL (BRASIL, 2008), a biomassa é uma das fontes para produção de energia com maior potencial de crescimento nos próximos anos. Tanto no mercado internacional quanto no interno, ela é considerada uma das principais alternativas para a diversificação da matriz energética e a consequente redução da dependência dos combustíveis fósseis, pois com ela é possível produzir eletricidade e biocombustíveis, como o biodiesel e o etanol.

Qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica é classificada como biomassa. De acordo com a sua origem, pode ser: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos, rurais e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo, esgoto e dejetos de animais). Os derivados obtidos dependem tanto da matéria-prima utilizada (cujo potencial energético varia de tipo para tipo) quanto da tecnologia de processamento para obtenção dos energéticos (BRASIL, 2008).

A utilização da biomassa como fonte de energia elétrica tem sido crescente no Brasil, principalmente em sistemas de cogeração (pelo qual é possível obter energia térmica e elétrica) (BRASIL, 2008). O (GRÁFICO 11) apresenta a evolução da participação da biomassa na capacidade instalada total de geração elétrica no país, de 2005 a 2015.

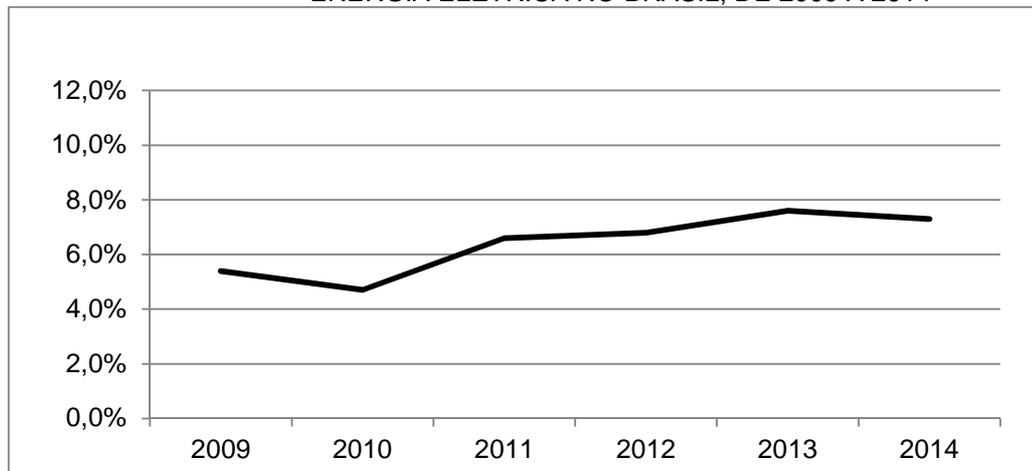
GRÁFICO 11 – EVOLUÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DA BIOMASSA NA CAPACIDADE INSTALADA TOTAL DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL, DE 2005 A 2015



FONTE: Adaptado de Brasil (2010–2015; 2015a).

O (GRÁFICO 12) apresenta a evolução da participação da biomassa na oferta interna de energia elétrica no Brasil de 2009 a 2014.

GRÁFICO 12 – EVOLUÇÃO DA PARTICIPAÇÃO DA BIOMASSA NA OFERTA INTERNA DE ENERGIA ELÉTRICA NO BRASIL, DE 2009 A 2014



FONTE: Adaptado de Brasil (2010–2015).

A (TABELA 3) apresenta os diferentes tipos de biomassa que compõem a matriz de capacidade instalada de geração de energia elétrica brasileira, de acordo com o BIG da ANEEL (BRASIL, 2015a).

TABELA 3 – MATRIZ DE ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA: BIOMASSA

FONTES	Nº DE USINAS	CAPACIDADE INSTALADA EM KW	% DA CAPACIDADE INSTALADA TOTAL DE GERAÇÃO NO BRASIL
Cana-de-açúcar	390	10.436.420	7,1187%
Licor negro	17	1.885.649	1,2862%
Resíduos de madeira	49	381.925	0,2605%
Gás de alto forno (biomassa)	8	109.865	0,0749%
Biogás RU (resíduos urbanos)	11	70.873	0,0483%
Capim elefante	3	65.700	0,0448%
Carvão vegetal	7	51.397	0,0350%
Casca de arroz	11	39.533	0,0269%
Óleos vegetais	2	4.350	0,0029%
Biogás RA (resíduos animais)	9	1.804	0,0012%
Biogás (agroindustriais)	2	1.722	0,0011%
Totais	509	13.049.238	8,9005%

FONTE: Brasil (2015a).

De acordo com esses dados, a energia elétrica produzida a partir da biomassa residual da cana-de-açúcar (bioeletricidade) representa 80% da energia elétrica produzida no país a partir de biomassa. As 390 usinas de bioeletricidade totalizam 10.436 MW de capacidade instalada de geração, 7,12% da capacidade instalada total de geração elétrica no país. A biomassa residual da cana-de-açúcar é proveniente do processo produtivo de etanol e da produção do açúcar e, segundo a EPE (BRASIL, 2007), está entre as fontes renováveis com maiores possibilidades em termos de natureza e origem e em termos de tecnologia de conversão em produto energético.

Além da biomassa da cana-de-açúcar, os resíduos urbanos e rurais (resíduos sólidos urbanos, esgotos domésticos e resíduos animais provenientes da criação de bovinos e suínos) também apresentam grande potencial de geração de energia elétrica por meio do biogás. No entanto, o aproveitamento energético desses materiais enfrenta barreiras técnicas, regulatórias e institucionais, principalmente com relação aos sistemas de coleta, separação e estocagem dos resíduos sólidos (SANT'ANA, 2012).

Como os diferentes tipos de biomassa implicam em diferentes tecnologias de conversão e diferentes desafios e oportunidades para a produção de energia, a biomassa residual da cana-de-açúcar (bioeletricidade) foi selecionada para analisar de forma mais detalhada os desafios e as oportunidades para o aumento da participação das fontes renováveis na matriz de energia elétrica brasileira, uma vez

que não seria viável analisar todas as fontes de energias renováveis disponíveis no país, ou mesmo, todos os tipos de biomassa.

Segundo a EPE (BRASIL, 2014b), o potencial técnico de produção de energia elétrica a partir da biomassa residual da cana-de-açúcar, considerando o aproveitamento ótimo do bagaço, permitiria ofertar 7,7 GW médios até 2023, dos quais 1,4 GW médio já foi contratado nos leilões e com início de suprimento até 2018. O potencial desta fonte está localizado principalmente nos estados de SP, GO, MG, MS e PR, portanto, próximo dos maiores centros consumidores de energia.

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar. Desde a década de 1970, o setor sucroalcooleiro brasileiro vive em contínua evolução tecnológica. A maior parte das usinas existentes no país produzem açúcar e etanol (União da indústria de cana-de-açúcar (ÚNICA), 2009). No ano de 2015, existiam 373 usinas cadastradas no Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) (BRASIL, 2015b), a maior parte localizada na região centro-sul do país, região responsável por 90,4% da cana-de-açúcar processada na safra 2014–2015 (UNICA, 2015a). Do total de usinas cadastradas no MAPA, 240 são mistas, ou seja, produzem açúcar e etanol, 115 produzem apenas etanol, 13 produzem apenas açúcar e 05 não especificaram.

O Estado de São Paulo é o maior produtor de cana-de-açúcar, responsável por 53,4% da produção total da safra 2014–2015. Quanto à produção de açúcar e etanol, o Estado foi responsável por 61,6% e 48,5%, respectivamente, do total produzido, na mesma safra (UNICA, 2015a).

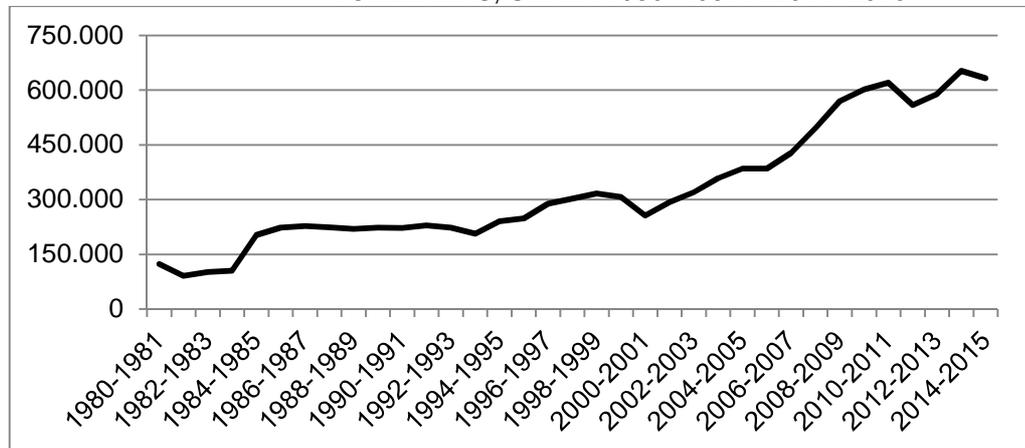
O etanol emergiu no Brasil a partir de 1975 (com o programa ProÁlcool) como combustível para motores de combustão interna. Em 2008, o etanol ultrapassou a gasolina, representando mais de 50% do total de combustível consumido pelos veículos leves no país. O sucesso do etanol deve-se a mistura obrigatória à gasolina (entre 20% a 25% de etanol anidro) e a expansão do mercado de carros *flex fuel* (veículos com motores movidos à gasolina ou etanol). Em 2009, a cada dez carros vendidos no país nove possuem tecnologia *flex fuel*, enquanto no ano de 2005, os veículos *flex fuel* representavam apenas 6,1% da frota nacional de veículos leves (UNICA, 2009).

O Brasil também é o maior exportador de açúcar do mundo, sendo responsável, em termos mundiais, por aproximadamente 20% da produção e 40% das exportações. Mais de 100 países importam açúcar do Brasil (UNICA, 2009).

Segundo Castro e Dantas (2008d), o setor sucroalcooleiro brasileiro encontra-se no seu terceiro ciclo expansivo. A redução do protecionismo internacional irá aumentar a exportação brasileira de açúcar e a demanda interna de etanol aumentará de forma exponencial com o crescimento da frota de veículos *flex fuel*. Essa expansão garante a oferta de biomassa para a geração de excedentes de energia elétrica.

O (GRÁFICO 13) apresenta a evolução da moagem de cana-de-açúcar no Brasil da safra 1980–1981 à safra 2014–2015.

GRÁFICO 13 – EVOLUÇÃO DA MOAGEM DE CANA-DE-AÇÚCAR NO BRASIL, EM MIL TONELADAS, SAFRA 1980–1981 À 2014–2015



FONTE: UNICA (2015a).

O setor sucroalcooleiro disponibiliza uma oferta crescente de biomassa residual (bagaço da cana-de-açúcar), o que representa grande potencialidade de geração de energia elétrica. Para cada tonelada de cana processada, em média, é gerado de 270 kg a 250 kg de bagaço, a maior parte (cerca de 90%) é queimada na usina para a produção do vapor que será utilizado no processo produtivo de açúcar, etanol ou energia elétrica (CONAB, 2011).

Devido ao fim da prática das queimadas na colheita, a oferta da palha da cana-de-açúcar também tem aumentado e ela pode ser utilizada para fins energéticos juntamente com o bagaço (CASTRO; BRANDÃO; DANTAS, 2012a). De acordo com a EPE (BRASIL, 2014b), cada tonelada de cana-de-açúcar origina em média 155 kg de palha e ponta. Segundo Tudeschini (2012), como o poder calorífico inferior (PCI) da palha é praticamente o dobro do PCI do bagaço, a expansão de sua utilização no processo de geração representaria um grande incremento na oferta de energia elétrica sem a necessidade de expansão da área plantada.

Uma tonelada de cana-de-açúcar contém energia primária equivalente a energia de 1,2 barris de petróleo. A sacarose para produção do álcool representa 1/3 da energia da cana, os outros 2/3 estão contidos no bagaço e na palha, com imenso potencial para a geração de bioeletricidade (CASTRO; DANTAS, 2008d).

Para Castro e Dantas (2008a), o surgimento do nicho de negócio de comercialização da bioeletricidade tende a colocar a bioeletricidade como um terceiro produto ofertado pelo setor sucroalcooleiro a ser transacionado no mercado juntamente com o álcool e com o açúcar.

Segundo a UNICA (2009), a bioeletricidade é um importante produto para o setor sucroalcooleiro brasileiro, capaz de impulsionar uma nova revolução de desenvolvimento tecnológico, agregando renda, melhorando a competitividade do açúcar e do etanol e, conseqüentemente, promovendo a expansão do mercado.

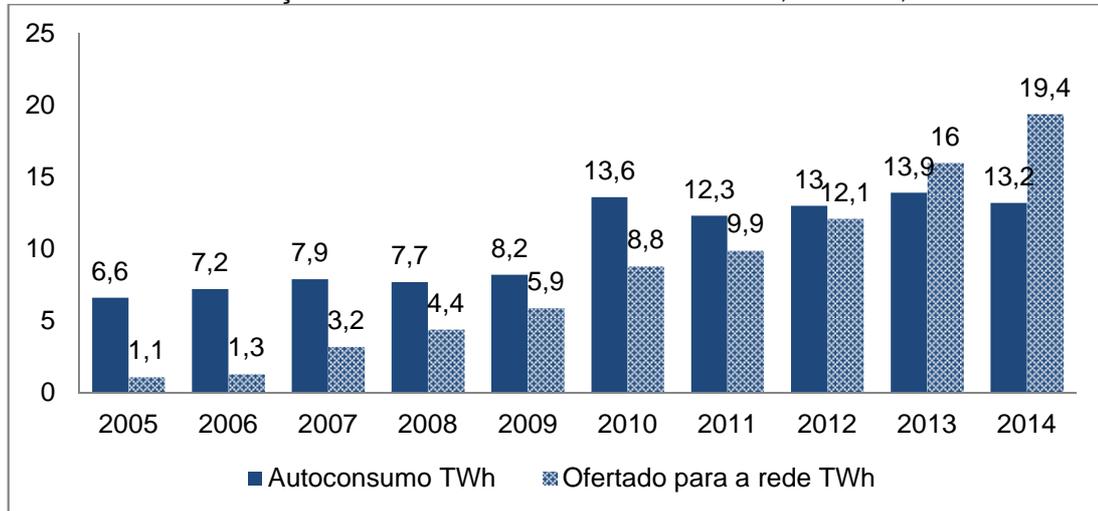
As usinas e destilarias que produzem açúcar e etanol são autossuficientes em termos de energia elétrica. Segundo a UNICA (2015b), no ano de 2014, 50% das unidades produtoras de açúcar e etanol exportaram excedentes de bioeletricidade para a rede. A outra metade das usinas tem a possibilidade de passarem por um processo de reforma (*retrofit*) tornando-se também exportadoras de energia elétrica para a rede. Segundo Castro *et al.* (2010), a viabilização do potencial de geração de bioeletricidade nessas usinas irá depender basicamente de duas variáveis: do processo de reorganização e concentração industrial que vem ocorrendo no setor sucroalcooleiro e da formulação de política pública, incluindo, em especial, linhas específicas de financiamento pelo Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES).

Segundo a UNICA (2015b), entre 2013 e 2014, o crescimento na oferta de excedentes de energia elétrica do setor sucroalcooleiro para a rede foi de 21%. A oferta à rede de 19,4 TWh (terawatts-hora) em 2014 representou poupar 13% da água nos reservatórios do subsistema Sudeste/Centro-Oeste durante o período seco do ano, além de evitar a emissão de 8,3 milhões toneladas de CO₂. Ressalta-se que, considerando o aproveitamento pleno da biomassa existente nos canaviais em 2014, o potencial técnico da bioeletricidade era sete vezes o volume que foi ofertado para rede, o que demonstra um baixo aproveitamento do potencial.

Em 2013, foi a primeira vez em que o setor sucroalcooleiro gerou mais energia elétrica para o SIN do que para o consumo próprio das unidades fabris. Em 2014, a relação foi de 60% de energia para a rede e 40% para consumo próprio. O

(GRÁFICO 14) apresenta a evolução da geração de bioeletricidade no Brasil em TWh de 2005 a 2014.

GRÁFICO 14 – GERAÇÃO DE BIOELETRICIDADE NO BRASIL, EM TWh, DE 2005 A 2014



FONTE: UNICA (2015a).

Segundo a UNICA (2015b), entre janeiro e agosto de 2014 e janeiro e agosto de 2015, o setor sucroalcooleiro aumentou a produção de bioeletricidade em 14%. De janeiro a agosto de 2015, a biomassa da cana-de-açúcar gerou o equivalente para abastecer 6,9 milhões de residências pelo período de um ano.

É importante observar que os investimentos necessários para o desenvolvimento da bioeletricidade estão sujeitos à volatilidade do setor sucroalcooleiro, o que pode eventualmente inibir a ampliação da capacidade de geração, assim como a sua competitividade nos leilões com outras fontes, especialmente a eólica, ressalta a EPE (BRASIL, 2014b).

Nastari (2014) alerta para a distorção causada pelo subsídio de preço da gasolina ao consumidor, que no início de 2014 manteve-se em 19% na comparação do preço no mercado internacional e do preço definido pelo Governo Federal nas refinarias. Essa medida causou, além de prejuízos ao setor de petróleo e gás, o desestímulo dos investimentos no setor de etanol e açúcar. O autor relata que com a crise no setor de açúcar e etanol, de 2008 à 2013, 44 usinas deixaram de operar no país, de um total de 389 unidades em operação em 2013. Com a descapitalização do setor, diminui a capacidade de se investir na produção de bioeletricidade.

5.2 AS TECNOLOGIAS PARA A PRODUÇÃO

O setor sucroalcooleiro é tradicionalmente autossuficiente em termos energéticos. A queima do bagaço da cana permite suprimento da energia térmica, mecânica e elétrica nas usinas. Historicamente as usinas optaram pela utilização de tecnologias de baixa eficiência por não visarem à venda de excedentes de energia (CASTRO; DANTAS, 2008d).

De acordo com a EPE (BRASIL, 2007), existem várias tecnologias para geração de energia elétrica a partir da biomassa da cana-de-açúcar. Em todas há um processo de conversão da biomassa em um produto intermediário que será então utilizado em uma máquina de força motriz, onde será produzida a energia mecânica que acionará o gerador de energia elétrica.

A bioeletricidade é produzida em plantas de cogeração, ou seja, produção de energia mecânica que pode ser convertida em eletricidade e energia térmica de um mesmo insumo energético. Há expectativa de que as unidades que utilizam a cogeração integradas aos sistemas produtivos incorporarão os avanços tecnológicos, elevando significativamente o potencial de energia excedente.

A (TABELA 4) apresenta as tecnologias para geração de energia elétrica no setor sucroalcooleiro e a respectiva capacidade de produção de bioeletricidade em KWh por tonelada de biomassa em sistema de cogeração (energia térmica e elétrica) ou em geração pura (apenas eletricidade).

TABELA 4 – TECNOLOGIAS PARA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO SETOR SUCROALCOOLEIRO

TECNOLOGIA	EM COGERAÇÃO (kWh/tonBiomassa)*	EM GERAÇÃO PURA (kWh/tonBiomassa) ¹
Ciclo a vapor de baixa eficiência (sistemas atualmente utilizados)	15	-
Ciclo a vapor com turbinas de contrapressão	215	-
Ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração	340	530
Ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa	1.050	1.150

FONTE: Brasil (2007).

NOTA: *referenciado à biomassa em base seca.

Segundo Castro e Dantas (2008d), a tecnologia tradicionalmente empregada nas usinas é de ciclo a vapor de baixa eficiência, suficientes para garantir a autossuficiência energética das usinas. Os autores destacam que:

Caso as usinas localizadas no Estado de São Paulo tivessem instalado caldeira de 81 bar em substituição a caldeira de 21 bar e turbinas de extra-condensação em substituição as turbinas de contrapressão juntamente com um novo gerador, as usinas paulistas poderiam ter gerado na safra 2001/02, na qual foram processadas 197.397.811 toneladas de cana, um excedente comercializável médio de energia de 2.184 GWh mensais. No mesmo período, o racionamento de energia estabeleceu a redução média mensal de 2.155 GWh à região Sudeste. Desta forma, nota-se que investimentos em tecnologias mais eficientes poderiam ter evitado o racionamento (CASTRO; DANTAS, 2008d, p. 6).

Segundo a EPE (BRASIL, 2007), o custo de investimento para geração térmica a partir da biomassa da cana dependerá do tipo de arranjo tecnológico utilizado. O ciclo a vapor com turbinas de contrapressão e o ciclo a vapor com turbinas de condensação e extração são duas tecnologias que têm seu processo de fabricação totalmente dominado pela indústria nacional. Já o ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa, mais caro, porém mais eficiente energeticamente, depende ainda da maturação das pesquisas relativas à produção em escala comercial dos gaseificadores.

Para EPE (BRASIL, 2007), entre as possibilidades tecnológicas consideradas, o ciclo de cogeração a vapor com turbinas de contrapressão é o que apresenta maiores perspectivas de aplicação na expansão setorial, tendo em vista que os sistemas de atendimento energético em usinas sucroalcooleiras são, necessariamente, ciclos de cogeração *topping* a vapor, devido às demandas energéticas do processo. Essa tecnologia é similar a mais comumente utilizada (ciclos de baixa eficiência), a diferença está na especificação das características técnicas que permitem maior eficiência do processo produtivo e da caldeira, além de apresentar melhores especificações fluido-mecânicas e termodinâmicas, com maior número de estágios e melhores desempenhos.

De acordo com a EPE (BRASIL, 2007), a segunda tecnologia em termos de potencial de penetração é a que adiciona um condensador ao sistema, cuja função é permitir a expansão do vapor até pressões inferiores à atmosférica, elevando o aproveitamento da energia nele contida. A existência do dispositivo de condensação

permite a operação fora do período de safra, quando a eficiência do ciclo é ainda maior e pode-se usar bagaço e palha ou outros energéticos. Esse processo demanda maiores investimentos e quantidade expressiva de água, o que pode limitar a localização das instalações.

No ciclo combinado integrado à gaseificação da biomassa a eficiência é muito elevada. Por possuírem condensadores, apresentam basicamente as mesmas vantagens e desvantagens do ciclo a vapor de condensação e extração. Segundo a EPE (BRASIL, 2007), no entanto, a tecnologia de gasificação ainda é inviável economicamente e não está disponível comercialmente nas escalas consideradas adequadas para a integração às unidades de processamento da cana. Apesar disso, e dos investimentos relativamente mais elevados que requer, essa tecnologia não deve ser descartada dentro de uma perspectiva de longo prazo.

Para a EPE (BRASIL, 2007), a escolha de uma ou outra rota tecnológica nas novas unidades de processamento da cana-de-açúcar é determinada em função das estratégias de cada unidade. A mecanização da cultura, a recuperação da palha e a cogeração em bases mais eficientes representam maior viabilidade e maior aproveitamento da biomassa.

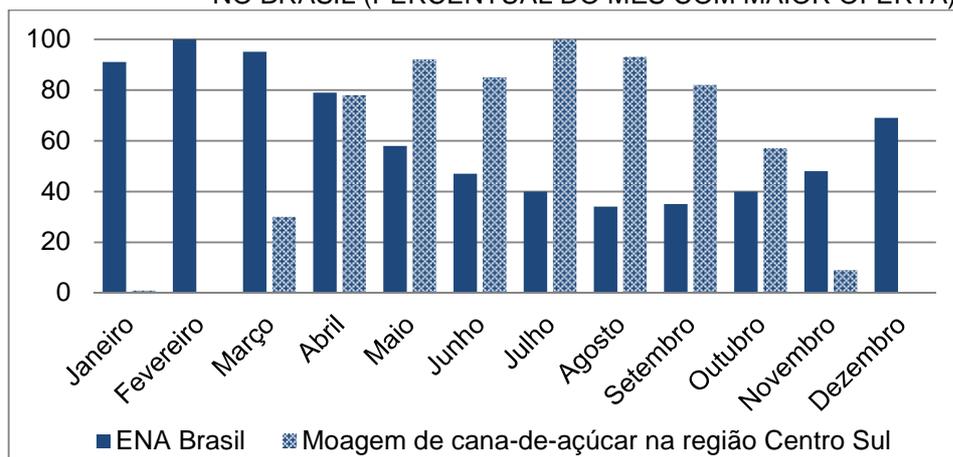
A biomassa residual da cana-de-açúcar também pode ser utilizada para produção do etanol celulósico¹², por meio de processos químicos e bioquímicos (hidrólise, fermentação etc) que ainda estão em processo de desenvolvimento tecnológico. Com a viabilização econômica dessa tecnologia a biomassa passaria a ter dois usos concorrentes, a bioeletricidade e o etanol. No entanto, Castro, Brandão e Dantas (2009) acreditam que os investimentos para cogeração e produção da bioeletricidade não deverão ser refreados e sim expandidos, principalmente se forem adotadas políticas específicas a favor da contratação da bioeletricidade nos leilões de energia.

¹² Obtido por meio da conversão de matéria vegetal em açúcares, e estes em álcool por meio de processos de hidrólise, ainda está em fase de desenvolvimento e aperfeiçoamento para viabilização comercial.

5.3 AS VANTAGENS E AS OPORTUNIDADES DE EXPANSÃO DA PRODUÇÃO

A principal vantagem da bioeletricidade da cana-de-açúcar é sua complementariedade com a geração hidroelétrica, pois a safra canavieira na região Centro-Sul (principal produtora da cana-de-açúcar) ocorre entre os meses de maio e novembro, coincidindo com o período de seca no subsistema Sudeste/Centro-Oeste (GRÁFICO 15). Essa característica faz com que o uso da bioeletricidade aumente a segurança do SIN com a garantia do suprimento de energia elétrica no período hidrológico mais crítico do ano. A sazonalidade da bioeletricidade é, por conseguinte, um aspecto positivo dessa fonte de energia elétrica.

GRÁFICO 15 – COMPLEMENTARIEDADE ENTRE A BIOELETRICIDADE E A GERAÇÃO HÍDRICA NO BRASIL (PERCENTUAL DO MÊS COM MAIOR OFERTA)



FONTE: Castro; Brandão; Dantas (2010).

NOTA: ENA – Energia Natural Afluyente.

Segundo Castro, Brandão e Dantas (2010), a proximidade das usinas ao maior centro de carga é outra vantagem competitiva, pois não demanda investimentos em extensas linhas de transmissão, reduzindo impactos ambientais com a redução das perdas de energia.

Segundo os autores (2012), a bioeletricidade possui perspectivas favoráveis em relação à expansão da matriz elétrica brasileira, pois está em sintonia com as duas principais diretrizes de sustentabilidade do setor energético: eficiência e utilização de fontes renováveis.

De acordo com Leite (2009), a bioeletricidade poderia ainda reduzir o ímpeto de expansão indiscriminada no uso de combustíveis fósseis para geração de energia

elétrica no país, com a vantagem de emitir baixa quantidade de CO₂. Por se tratar de um insumo nacional, em contraste com os combustíveis fósseis, ganha-se em termos de divisas e na redução da volatilidade do preço da energia. Enquanto a geração a óleo, a carvão importado e gás natural são indexados ao preço *spot* internacional desses insumos energéticos, a bioeletricidade da cana é indexada ao Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) (CASTRO, BRANDÃO, DANTAS, 2009).

Além disso, as usinas de bioeletricidade permitem respostas mais rápidas à necessidade de expansão da oferta de energia em função do reduzido tempo de construção, inferior a 20 meses, e maior facilidade de obtenção do licenciamento ambiental (CASTRO; DANTAS, 2008d).

Segunda a UNICA (2009), os projetos para a produção de bioeletricidade são relativamente pequenos e, em geral, envolvem diversos investidores, o que diminui os riscos, especialmente do tipo que muitas vezes provoca atrasos na construção de UHE.

Ademais, a bioeletricidade gera renda no campo e estimula a indústria de bens de capital, pois os equipamentos utilizados na planta sucroalcooleira são ofertados pela indústria nacional (CASTRO; DANTAS, 2008d).

As principais oportunidades para expansão da produção de bioeletricidade dizem respeito: às características da bioeletricidade que demonstram adaptabilidade às necessidades do setor elétrico e atendimento as demandas ambientais e sociais; à necessidade de diversificação da matriz de energia elétrica em função do esgotamento do paradigma tecnológico hidroelétrico; às mudanças no ambiente institucional, principalmente após as reformas no setor elétrico durante a década de 1990 e início dos anos 2000; ao Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA); e, às linhas de financiamento diferenciadas oferecidas pelo BNDES.

Quanto ao ambiente institucional, segundo Castro e Dantas (2008d), a indústria de energia elétrica vem passando por uma mudança com a redução da importância da escala e a gradativa substituição da geração centralizada pela geração distribuída. Segundo Castro *et al.* (2009, p. 12): “a bioeletricidade é uma fonte de energia compatível com o novo paradigma tecnológico do setor elétrico, que dá grande ênfase à exploração dos nichos de geração distribuída”.

Para Castro e Dantas (2008d), as mudanças no ambiente institucional do setor elétrico abriram uma imensa janela de oportunidade para a bioeletricidade, pois até o início dos anos 1990, o setor elétrico brasileiro estava estruturado em monopólios integrados verticalmente, com geração de energia centralizada, e com regras que não contemplavam a possibilidade de comercialização de energia por agentes independentes. Essa situação mudou com a criação da figura do produtor independente de eletricidade, marco legal que possibilitou as usinas do setor sucroalcooleiro investirem em plantas eficientes de cogeração e “exportar” eletricidade para o setor elétrico (CASTRO; BRANDÃO; DANTAS, 2009).

Segundo Castro e Dantas (2008d), as mudanças estruturais no setor e a atual conjuntura são favoráveis à inserção da bioeletricidade da cana na matriz elétrica devido à necessidade crescente de se atenuar o conflito entre segurança do suprimento energético e sustentabilidade ambiental. Essa situação tem levado o Governo a criar incentivo às fontes renováveis alternativas, como a biomassa, a energia eólica e PCHs. De acordo com o MME (BRASIL, 2015e), o PROINFA foi criado em 2002 e regulamentado em 2004 pelo Decreto nº. 5.025/2004. O programa tem como principais objetivos: aumentar a participação das fontes eólicas, biomassa e PCH, diversificar a matriz energética e aumentar a segurança do abastecimento interno. A energia é contratada no Ambiente de Contratação Regulada (ACR) por meio dos Leilões de Energia de Fontes Alternativas (LFA), sendo que a contratação de energia é garantida por 20 anos após a entrada em operação do empreendimento.

Até o ano de 2015, foram realizados três LFA (TABELA 5), o primeiro em junho de 2007, o segundo em agosto de 2010 e o terceiro em abril de 2015. De acordo com a Balanço Energético Nacional 2015 da EPE (BRASIL, 2010–2015), o primeiro LFA resultou na contratação de uma potência instalada total de 638,64 MW, sendo 541,9 MW de termelétricas movidas à biomassa (30 MW de criadouros avícolas, o restante de bagaço de cana-de-açúcar) e 96,74 MW de PCHs. O segundo LFA resultou na contratação de 2.892,2 MW de potência instalada, sendo 2.047,8 MW de 70 centrais eólicas, 712,9 MW de 12 usinas de biomassa e 131,5 MW de sete PCHs. O terceiro LFA resultou na contratação de 479,43 MW de potência instalada, sendo 389,43 de 8 usinas de biomassa (bagaço de cana-de-açúcar) e 90 MW de três usinas eólicas.

TABELA 5 – POTÊNCIA INSTALADA CONTRATADA NOS LEILÕES DE FONTES ALTERNATIVAS

FONTES	1º LFA (2007)	2º LFA (2010)	3º LFA (2015)
Biomassa	541,9 MW	712,9 MW	389,43 MW
PCH	96,74 MW	131,5 MW	-
Eólica	-	2.047,8 MW	90 MW
Total	638,64 MW	2.892,2 MW	479,43 MW

FONTE: Adaptado de Brasil (2010-2015).

O BNDES tem desempenhado importante papel no apoio à expansão e à modernização do setor elétrico, o que tem possibilitado a execução de projetos que exigem longo prazo de maturação e elevados volumes de investimentos. O banco financia empreendimentos de geração de energia a partir de fontes renováveis, tais como hidrelétrica, biomassa, eólica e solar, visando à diversificação da matriz energética nacional (BNDES, 2015).

As linhas de financiamentos do BNDES Finem atendem ao setor, de acordo com o empreendimento/item apoiado. As linhas de financiamento direcionadas ao setor de energia elétrica onde a biomassa se enquadra são (BNDES, 2015):

- Geração de Vapor e de Energia Elétrica Renovável – tem como objetivo apoiar empreendimentos que visem à expansão ou modernização da infraestrutura de geração de energia do País. É destinado às hidrelétricas, geração a partir de vapor ou eletricidade a partir de biomassa, energia eólica, energia solar, PCH e outras energias alternativas. O financiamento é no valor de R\$ 20 milhões, com amortização em 20 anos, podendo também apoiar o capital de giro associado a itens de projetos financiados nessa linha;
- Eficiência Energética - apoio a projetos de eficiência energética que contribuam para a economia de energia, aumentem a eficiência global do sistema energético ou promovam a substituição de combustíveis de origem fóssil por fontes renováveis. Podem ser financiados: I) edificações, com foco em condicionamento de ar, iluminação, envoltória e geração distribuída, incluindo cogeração, para unidades novas ou já existentes (*retrofit*), conforme critérios definidos pelo BNDES; II) processos produtivos, com foco em cogeração, aproveitamento de gases de processo como fonte energética e outras intervenções prioritizadas

pelo BNDES; III) repotenciação de usinas; e IV) redes elétricas inteligentes. O valor mínimo dessa linha é de R\$ 5 milhões;

- Aquisição de Bens de Capital: apoio à aquisição de bens de capital, como máquinas, equipamentos e bens de informática e automação, associada a planos de investimentos apresentados ao BNDES, de forma isolada ou vinculada a projetos.

Além dessas linhas, o BNDES divulga anualmente, para cada leilão de energia elétrica, condições de apoio financeiro ao segmento de geração de energia renovável, onde se inclui a geração a partir de biomassa.

5.4 AS BARREIRAS E ENTRAVES

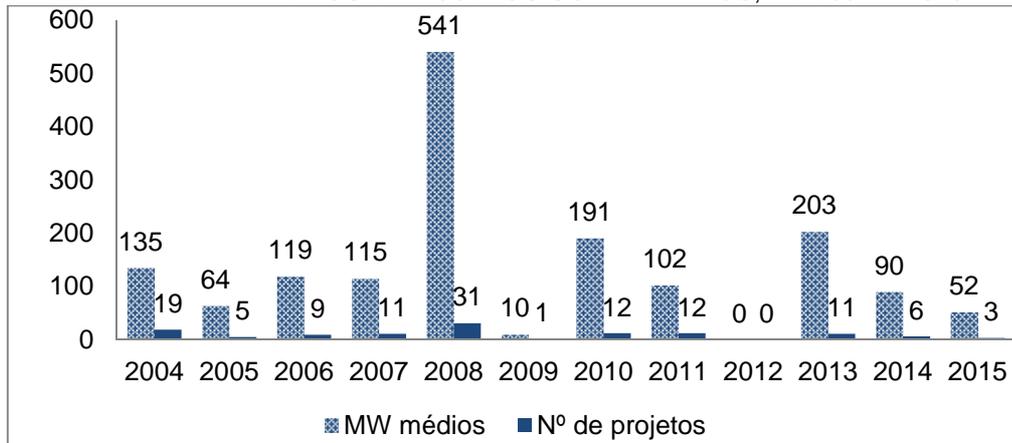
Segundo Castro e Dantas (2008b), apesar de a bioeletricidade ser considerada a fonte de energia mais adequada e disponível para complementar a geração hídrica, tradicionalmente não tem havido uma expansão da oferta compatível com o potencial existente, com as possibilidades tecnológicas e com a necessidade do parque gerador brasileiro.

As principais barreiras ao aumento da participação da bioeletricidade na matriz elétrica brasileira são: os instrumentos de contratação de energia elétrica (leilões) e seus critérios de seleção de projetos de geração; o preço da energia; a conexão com a rede elétrica; as dificuldades para modernização das usinas por meio da aquisição de tecnologia de maior eficiência para geração dos excedentes de energia elétrica, principalmente no que diz respeito às dificuldades de obtenção de financiamento e incentivos para se investir.

Segundo Teixeira (2014), os leilões são mecanismos de evidente importância para a inserção da bioeletricidade da cana na matriz elétrica nacional. No entanto, ao se analisar os leilões que contaram com a participação dessa fonte, “percebe-se que esta inserção ainda tem sido tímida, se constituindo em empecilho institucional ao melhor aproveitamento deste resíduo da indústria sucroalcooleira” (TEIXEIRA, 2014, p. 50).

O (GRÁFICO 16) apresenta a evolução da participação da bioeletricidade nos leilões realizados de 2004 a 2015 em MW médios e em quantidade de projetos contratados.

GRÁFICO 16 – BIOELETRICIDADE COMERCIALIZADA NOS LEILÕES REGULADOS, EM MW MÉDIOS E PROJETOS CONTRATADOS, DE 2004 A 2015



FONTE: UNICA (2015b).

Observa-se (GRÁFICO 16) grande oscilação na quantidade de bioeletricidade contratada nos leilões desde 2004. Segundo Souza (2015), a descontinuidade na contratação da bioeletricidade nos leilões regulados é reflexo de uma política *stop and go*, onde melhora-se as condições para a biomassa em um ano e volta-se atrás nos anos seguintes. Para o autor, o aumento da contratação de bioeletricidade no ano de 2008 deveu-se ao avanço nas regras dos leilões, as quais foram desenhadas para a biomassa. Já no ano seguinte houve um retrocesso com o abandono dessas regras e uma concorrência indiscriminada com os projetos de energia eólica. No ano de 2013, finalmente, houve a separação da energia eólica e da bioeletricidade e melhora do preço teto nos leilões, com boas perspectivas para a bioeletricidade nesse ano, o que não se manteve nos anos seguintes.

Segundo Souza (2015), a descontinuidade na contratação da bioeletricidade tem rebatimento direto em toda a cadeia produtiva do setor sucroalcooleiro. Há, portanto, necessidade de reconhecimento das externalidades da biomassa e melhoramentos no ambiente institucional, objetivando a estabilidade das regras e a segurança para estimular o retorno da bioeletricidade aos leilões regulados, de forma consolidada e contínua.

Castro, Brandão e Dantas (2009) acreditam que as externalidades da bioeletricidade não vêm sendo devida e corretamente precificadas nos leilões de energia nova, realizados no Brasil. Para os autores, a aparente falta de competitividade dessa fonte de energia nos leilões é resultado da metodologia de contratação dos leilões que não auferem corretamente os benefícios da bioeletricidade para o sistema elétrico brasileiro e não seleciona necessariamente os melhores

projetos de geração. Os autores acreditam que os leilões abertos a qualquer tipo de projeto não vêm estimulando a contratação eficiente de novos projetos, por isso defendem a modificação da política de contratação, com a adoção de leilões por fonte ou de leilões contratando especificamente geração de base para o período seco. “Essa diretriz seria uma das mais importantes para compor uma política pública para a bioeletricidade” (CASTRO; BRANDÃO; DANTAS, 2009, p. 13).

Como a comercialização de energia elétrica não é o *core business* dos agentes do setor sucroalcooleiro, existe ainda certa inércia por parte dos agentes que investem nessa atividade econômica. Isso ocorre, principalmente, porque na produção de álcool e açúcar os agentes operam com altas taxas de retorno, bem superiores às taxas de retorno verificadas no setor elétrico. Castro e Dantas (2008b) acreditam que o resultado insatisfatório dos mecanismos de promoção da bioeletricidade deve-se ao fato dos agentes do setor sucroalcooleiro, acostumados com taxas de retorno na casa de 25% na produção de álcool e de açúcar, não se sensibilizarem em investir em um setor cuja taxa média de retorno do investimento encontra-se na casa dos 12%. Para os autores, a questão central é a determinação da remuneração para os investimentos em bioeletricidade.

Trata-se de uma questão complexa porque envolve informações assimétricas, diferença entre as taxas de retorno do setor elétrico, taxas de retorno do setor sucroalcooleiro e discussão referente à internalização das externalidades positivas da bioeletricidade (CASTRO; DANTAS, 2008d, p. 13).

Dentre os inúmeros e mais importantes entraves à promoção da bioeletricidade e o aumento de sua participação na matriz elétrica destacam-se ainda os problemas relacionados com a conexão à rede elétrica. Castro e Dantas (2008c) alertam para o fato de que a tendência mais recente de se atribuir o custo de conexão ao empreendedor possa causar distorções competitivas nos leilões de energia de reserva. Isso ocorreria pela existência de diferentes custos de conexão, basicamente em função da localização geográfica de cada usina.

Os autores (CASTRO; DANTAS, 2008c) acreditam que é necessária a criação de regras que permitam a conexão das fontes alternativas de energia à rede básica de forma eficiente, sobretudo à conexão da bioeletricidade sucroalcooleira, por ser dentre as fontes renováveis de energia a mais competitiva. Como as usinas são autossuficientes em energia elétrica, elas não estão conectadas à rede. Na

região Centro-Oeste também existe a necessidade de ampliação da rede de transmissão para despachar a eletricidade gerada em usinas localizadas no estado de Goiás e do Mato Grosso (CASTRO; DANTAS, 2008c).

Segundo Castro, Brandão e Dantas (2009), como solução para esse problema, à época do Leilão de Energia de Reserva, em 2008, foi criado o desenho de uma rede coletora para servir a diversos empreendimentos em uma mesma região. No entanto, os autores julgam que, apesar de ser um passo na direção certa, não se trata de uma solução ideal, pois o compromisso financeiro com a rede coletora deveria ser decidido antes do leilão. Além disso, em função da competitividade da bioeletricidade, os autores recomendam a realização de estudos para reforço da rede básica em regiões com alto potencial produtor, antes mesmo de confirmada a vitória em leilão das usinas da região (CASTRO; BRANDÃO; DANTAS, 2009).

Quanto aos custos de conexão, os autores (CASTRO; DANTAS, 2008c) defendem que esses deveriam ser adicionados ao custo da bioeletricidade e ser cobrado dos consumidores finais:

[...] não é uma posição em defesa dos usineiros, até porque os mesmos irão repassar os custos de conexão aos agentes demandantes. A fundamentação deste argumento se baseia na defesa de uma maior competição que maximize a eficiência econômica e gere maior modicidade tarifária (CASTRO; DANTAS, 2008c, p. 6).

Um dos motivos para a produção de bioeletricidade ser ainda muito aquém de seu real potencial de produção, considerando a quantidade de bagaço e palha gerados na produção do açúcar e do etanol, deve-se ao fato de muitas usinas ainda operarem com equipamentos de baixa eficiência energética e com caldeiras de baixa temperatura e baixa pressão (21 bar, 300 °C).

Para que essas usinas invistam em uma modernização de suas instalações, para exportar energia elétrica, deve-se considerar a atratividade desse investimento. A modificação das metodologias dos leilões e a redução dos custos de conexão com a rede de transmissão são, portanto, premissas importantes. Além delas, é necessária a criação de instrumentos de financiamentos adequados ao setor.

Segundo Nyko (2011), em muitos casos, os equipamentos (caldeiras e turbinas) utilizados pelas usinas ainda tem vida útil, e o investimento para sua

substituição precisa ser remunerado exclusivamente pela receita da exportação de energia elétrica. Os maiores obstáculos para os investimentos na modernização das usinas sucroalcooleiras são os custos e as condições dos financiamentos, como juros altos, pequenos prazos e dificuldade de obtenção de crédito na modalidade *project finance*.

Segundo estudo realizado por Tudeschini (2012), a UNICA apontou que na análise de investimento desse tipo de projeto, o custo de oportunidade para o setor sucroalcooleiro é geralmente maior do que em outros projetos de geração, pois, a usina possui a opção de investir em produzir mais etanol, açúcar ou logística, por exemplo.

Nesse mesmo estudo o BNDES foi consultado e afirmou que oferece a taxa de *spread* bancário mais baixa do mercado e que muitas vezes o acesso ao crédito é dificultado pela situação financeira das próprias usinas.

Sobre os leilões, os agentes das duas instituições (UNICA e BNDES) concordam que o preço não remunerador praticado tem interferido na decisão de investimento por parte das usinas e acreditam que uma política de promoção da bioeletricidade passaria pela reestruturação desse instrumento de contratação. A realização de leilões regionais que levassem em conta a proximidade dos agentes geradores aos centros consumidores e, a realização de leilões por fontes, para evitar concorrência com fontes que recebem mais incentivos, como é o caso da geração eólica que recebe isenção de ICMS (Imposto sobre circulação de mercadorias e serviços) em toda a cadeia produtiva (TUDESCHINI, 2012).

Outras formas de incentivos que também poderiam ser adotadas seriam incentivos fiscais e linhas de financiamento dedicadas à implementação da coleta e utilização da palha, que aumentaria significativamente a quantidade de biomassa disponível (TUDESCHINI, 2012).

Portanto, de uma forma geral, as condições que precisam ser criadas no país para proporcionar o aumento da participação da bioeletricidade na matriz de energia elétrica brasileira envolvem:

- a adequação dos leilões de contratação de energia elétrica para a bioeletricidade, reconhecendo suas externalidades positivas. Entre as mudanças sugeridas estão: adequação do preço pago pela energia; realização de leilões regionais e por tipos de fontes; e, estabilidade das regras de contratação;

- criação de uma rede de transmissão para conectar as regiões com grande potencial produtor de bioeletricidade à rede elétrica;
- adequação dos instrumentos de financiamento destinados a modernização das usinas do setor sucroalcooleiro e aquisição de tecnologia mais eficientes, por meio de menores taxas de juros, maiores prazos de amortização e facilidades de acesso;
- criação de outros tipos de incentivos financeiros, fiscais ou ainda subsídios específicos para a produção de bioeletricidade.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A hidroeletricidade se estabeleceu como um paradigma tecnológico no segmento de geração de energia elétrica no Brasil no início do século XX. Em um primeiro momento, foram fundamentais para o seu estabelecimento como paradigma tecnológico: a abundância dos recursos hídricos, o custo inferior ao da termoeletricidade a base de carvão mineral e a ausência de regulação por parte do Estado. Nesse período, empresas estrangeiras se instalaram no país e exploraram o potencial de geração hidroelétrica. A partir da década de 1940, no entanto, o Estado passou a intervir no setor elétrico, investindo não somente na construção de novas UHE com grandes reservatórios, para expandir a geração, como também em toda a infraestrutura necessária para transmissão e distribuição da energia e interligação do sistema elétrico nacional.

A principal característica do paradigma tecnológico hidroelétrico é a predominância de UHE com reservatórios com capacidade de regularização da oferta de energia, atendendo quase que a totalidade da demanda por energia elétrica no país. No entanto, a partir da década de 1990, alguns fatores iniciaram um processo de esgotamento do paradigma tecnológico hidroelétrico no Brasil. O término dos recursos hídricos a serem explorados nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste e a concentração do potencial hidroelétrico remanescente na região Amazônica, com suas implicações ambientais, sociais, técnicas, econômicas e regulatórias impuseram uma limitação à continuidade da trajetória tecnológica hidroelétrica no país.

Mesmo com a expansão da hidroeletricidade na região Norte, a contínua queda da participação da hidroeletricidade na capacidade instalada é irreversível. As usinas em construção também não possuem reservatórios de regularização, devido às limitações topográficas e as dificuldades de obtenção de licenciamento devido aos impactos ambientais locais. Desde a década de 1990, não ingressam no sistema usinas com reservatórios de regularização, tal fato implica em uma redução gradativa da capacidade de armazenamento de energia, que seria utilizada nos períodos secos do ano ou em períodos de hidrologia desfavorável.

Entre as fontes que têm sido utilizadas para expandir a geração de energia elétrica no país se destacam: a biomassa, o gás natural, os derivados do petróleo, a energia eólica, as PCHs e o carvão mineral. A diversificação da matriz elétrica tem

sido a principal diretriz da política de expansão da geração. Sendo que, as termelétricas movidas a combustíveis fósseis são acionadas para preservar os níveis de segurança dos reservatórios do sistema em cenários de baixa afluência e baixa disponibilidade de oferta de energia com as fontes alternativas intermitentes e sazonais, a energia eólica e a biomassa da cana-de-açúcar, principalmente.

Apesar de defender uma matriz elétrica com elevada participação de fontes de energias renováveis, o governo, por meio do planejamento da expansão da geração, não tem apresentado quais medidas serão adotadas para viabilizar a matriz desejada e incentivar as fontes renováveis alternativas, tão pouco tem apresentado metas de redução da participação dos combustíveis fósseis. Em contraste ao discurso da manutenção de uma matriz elétrica limpa, o planejamento do setor elétrico defende a utilização de termelétricas movidas a gás natural e, na sua inviabilidade, de carvão mineral para assegurar o atendimento à demanda por energia elétrica no país.

A utilização de fontes alternativas de energia tem implicado em uma mudança de paradigma tecnológico no segmento de geração de energia elétrica no Brasil. Essa mudança diz respeito à alteração das fontes utilizadas, tecnologias envolvidas, adaptação do sistema e de sua operação, diversificação e mudança do perfil da matriz elétrica, entre outras características que divergem do modelo baseado na hidroeletricidade como fonte predominante de geração.

Apesar das mudanças ocorridas, acredita-se que ainda não foi estabelecido um novo paradigma tecnológico no segmento de geração. Pois, observa-se uma irregularidade e instabilidade na utilização de fontes de energias alternativas e uma incongruência nas políticas e diretrizes do planejamento da expansão da geração de energia elétrica no país.

Diante desse cenário de mudanças, entende-se que é fundamental a criação de políticas públicas e medidas de incentivo às fontes de energia alternativas renováveis, para que se possa induzir um novo paradigma tecnológico baseado no princípio da sustentabilidade econômica e ambiental, reduzindo a necessidade de acionamento de usinas termelétricas movidas a combustíveis fósseis. Para tanto, é indispensável o pleno conhecimento das barreiras que as fontes alternativas renováveis enfrentam para ampliar a produção de energia e para aumentar sua participação na matriz de energia elétrica brasileira.

As fontes alternativas de energia renovável (como a energia eólica, energia solar, PCH e a biomassa) apresentam grande potencial de produção de energia elétrica no Brasil e podem garantir o suprimento da demanda de forma sustentável. As principais barreiras à expansão da geração de energia elétrica por meio dessas fontes dizem respeito aos maiores custos de produção; falta de infraestrutura adequada; falta de apoio público e ausência de incentivos adequados à redução dos custos de produção.

É importante destacar a importância em se criar mecanismos capazes de mensurar os custos e benefícios das diferentes fontes de energia elétrica. Dessa forma, os leilões poderiam ser um importante instrumento para a seleção das melhores opções energéticas para o país. Ao se computar os custos dos combustíveis fósseis ou da construção de usinas na região Amazônica deveriam ser acrescentados os custos da emissão de poluentes e dos prejuízos ambientais locais, que em muitos casos são irreversíveis. Da mesma forma, os benefícios advindos do uso de fontes de energias alternativas renováveis precisam ser computados.

Dentre as fontes alternativas de energia renováveis, o presente trabalho apresentou a bioeletricidade da biomassa residual da cana-de-açúcar que possui muitas vantagens para o segmento de geração, tais como a proximidade aos grandes centros consumidores e a complementariedade com o regime hidrológico, garantindo menos perdas de energia e maior segurança de abastecimento, além de não emitir poluentes e usar resíduos que seriam descartados.

O setor sucroalcooleiro oferta uma quantidade crescente de biomassa residual para geração de bioeletricidade, além disso, existem tecnologias disponíveis para aumentar a eficiência das usinas e ampliar a produção de energia elétrica. As principais barreiras e entraves existentes para o aumento da produção da bioeletricidade são: a falta de estabilidade nas políticas de contratação de energia por meio dos leilões; a ineficiência dos leilões para selecionar os melhores projetos de geração (seja em função de suas regras, como pela incapacidade de mensurar a relação custo/benefício das diferentes fontes de energia); as dificuldades de conexão a rede elétrica; a necessidade de modernização das usinas; as dificuldades de obtenção de financiamento; e, a ausência de incentivos para realizar os investimentos.

Como pesquisas futuras, sugere-se identificar as barreiras ao aumento da produção de energia elétrica por meio de outras fontes alternativas de energia

renovável (como a energia eólica, a energia solar fotovoltaica e as PCHs). Esses estudos podem ser base para a formulação de políticas públicas de incentivo às energias renováveis alternativas, preservando o meio ambiente e garantindo de forma sustentável o atendimento da demanda por energia elétrica no Brasil.

REFERÊNCIAS

ARTEIRO, F. **Gestão de recursos hídricos no sistema interligado nacional: o desafio de conciliar os aspectos de meio ambiente e de uso múltiplo da água e a segurança do atendimento eletroenergético.** Trabalho apresentado no Rio + 20, em 20 de junho de 2012. Disponível em: <http://www.ons.org.br/download/Responsabilidade_Social/Gest%C3%A3o%20de%20Recursos%20H%C3%ADdricos%20no%20Sistema%20Interligado%20Nacional%20-%20Rio+20.pdf>. Acesso em: 12 set. 2015.

BANCO NACIONAL DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). Áreas de atuação. Infraestrutura. **Energia elétrica.** Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/bndes/bndes_pt/Areas_de_Atuacao/Infraestrutura/Energia/>. Acesso em: 18 set. 2015.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Atlas de energia elétrica do Brasil.** 3. ed. – Brasília: ANEEL, 2008.

_____. Banco de Informações de Geração (BIG). **Capacidade de Geração do Brasil.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em: 01 ago. 2015a.

_____. Banco de Informações de Geração (BIG). **Capacidade de Geração do Brasil.** Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm>> Acesso em: 01 fev. 2016a.

BRASIL. Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Relação de instituições cadastradas no departamento de cana-de-açúcar e agroenergia.** Disponível em: <<http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sapcana/downloadBaseCompletaInstituicao.action?sgJAASAplicacaoPrincipal=sapcana>>. Acesso em: 15 set. 2015b.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Acordo de Paris.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris>>. Acesso em: 02 mai 2016b.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Energia no mundo.** Matrizes energéticas e matrizes elétricas 2012–2013. Indicadores. Brasília, out. 2014a.

_____. **Boletim mensal de monitoramento do sistema elétrico brasileiro junho – 2015.** Secretaria de energia elétrica. Departamento de monitoramento do sistema elétrico, jun. 2015c.

_____. **Resenha energética brasileira.** Exercício de 2014. Jun de 2015d.

_____. **Leilões de energia elétrica.** Disponível em: <http://www.mme.gov.br/programas/leiloes_de_energia/menu/inicio.html> Acesso em: 13 set 2015e.

_____. **Séries históricas completas:** Oferta e demanda de energia por fonte. Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/BENSeriesCompletas.aspx>> Acesso em: 01 set. 2015f.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balço Energético Nacional Ano base 2009–2014.** Rio de Janeiro. EPE: 2010–2015.

_____. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2023.** Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2014b.

_____. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2024.** Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2015g.

_____. **Plano Nacional de Energia 2030.** Rio de Janeiro: EPE, 2007.

BRASIL. Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). **Plano da operação energética 2014–2018 – PEN 2014.** 2014c.

CASTELLACCI, F. Technological regimes and Sectoral differences in productivity growth. **Industrial and Corporate Change**, v. 16, n.6, p.1105-1145, 2007.

CASTRO, N. J.; BRANDÃO, R. 2013 marca o surgimento de um novo padrão de geração elétrica no Brasil. **Folha de São Paulo.** São Paulo, 15 de fevereiro de 2013.

CASTRO, N. J.; BRANDÃO, R.; DANTAS, G. A. **Importância e perspectivas da bioeletricidade sucroenergética na matriz elétrica brasileira.** Estudo apresentado no seminário: “O setor sucroenergético e o Congresso Nacional: construindo uma agenda positiva”. UNICA: 14 out. 2009.

_____. A. **Considerações sobre a ampliação da geração complementar ao parque hídrico brasileiro.** Texto de discussão n.º 15. Rio de Janeiro: GESEL/IE/UFRJ. Rio de Janeiro, jan. 2010.

_____. A. **O setor elétrico brasileiro e os compromissos de reduções das emissões de gases do efeito estufa.** Texto de discussão n.º 46. Rio de Janeiro: GESEL/IE/UFRJ, mar. 2012a.

_____. A energia em busca de alternativas renováveis. **Valor Econômico.** São Paulo, 02 mai. 2012b.

CASTRO, N. J.; DANTAS, G. A. **A bioeletricidade sucroalcooleira e o hiato entre oferta potencial e oferta efetiva.** IFE n.º 2213, Rio de Janeiro, 28 fev. 2008a.

_____. **A importância da inserção da bioeletricidade na matriz brasileira e o Leilão de Energia de Reserva.** IFE n.º 2227, Rio de Janeiro, 19 mai. 2008b.

_____. **A conexão da bioeletricidade à rede: quem paga?** IFE n.º 2251, Rio de Janeiro, 29 abr. 2008c.

_____. **Lições do Proinfa e do Leilão de Fontes Alternativas para a inserção da bioeletricidade sucroalcooleira na matriz elétrica brasileira.** In: 30 Congresso Internacional de Bioenergia. Curitiba, 2008d.

CASTRO, N. J.; DANTAS, G. A.; LEITE, A. L. S.; BRANDÃO, R.; TIMPONI, R. R. **Considerações sobre as perspectivas da matriz elétrica brasileira.** Texto de discussão n.º 19. Rio de Janeiro: GESEL/IE/UFRJ, mai. 2010.

CASTRO, N. J.; BARA NETO, P.; BRANDÃO, R.; DANTAS, G. A. **Expansão do sistema elétrico brasileiro e o potencial hidroelétrico da região amazônica.** Texto de discussão n.º 50. Rio de Janeiro: GESEL/IE/UFRJ, mai. 2012.

CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (CCEE). **Tipos de leilões.** Disponível em: <http://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/tipos_leiloes_n_logado?_afLoop=787405388612712#%40%3F_afLoop%3D787405388612712%26_adf.ctrl-state%3Db60ge5xui_58>. Acesso em: 13 set 2015.

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. (ELETROBRÁS). **Plano Nacional de Energia Elétrica 1993–2015.** Plano 2015. Volume 2. Estudos básicos. 1994.

CIMOLI, M.; DOSI, G. Technological paradigms, patterns of learning and development: an introductory roadmap. **Journal of Evolucionary Economics.** Springer-Verlag, 1995.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). **Resolução CONAMA nº 237, de 19 de dezembro de 1997.** Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=237>>. Acesso em: 02 mai 2016.

DOSI, G. Technological paradigms and technological trajectories: A suggested interpretation of the determinants and directions of technical change. Science Policy Research Unit, University of Sussex, Brighton, UK, 1982. **Revista Brasileira de Inovação**, v. 5, n.º 1, jan/jun 2006.

_____. Sources, procedures and microeconomic effects of innovation. **Journal of economic literature**, v. 26, sep. 1988.

_____. **Mudança técnica e transformação industrial: a teoria e uma aplicação à indústria dos semicondutores.** Tradutor: Carlos D. Szlak. Campinas, SP: editor Unicamp, 2006.

DOSI, G.; NELSON, R. R. **The evolution of technologies: an assessment of the state-of-the-art.** Eurasian Business Review, 3(1), 2013.

FREEMAN, C.; PEREZ, C. Structural crises of adjustment, business cycles and investment behaviour. In Dosi et al. **Technical change and economic theory**. Pinter Publishers, London N.Y., 1988, p. 38–66.

GOMES, A. C. S.; ABARCA, C. D. G.; FARIA, E. A. S. T.; FERNANDES, H. H. O. **BNDES 50 Anos – histórias setoriais**: o setor elétrico. Dez. 2002. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/conhecimento/livro_setorial/setorial14.pdf> Acesso em: mai. 2015.

KEMP, R. Technology and the transition to environmental sustainability: the problem of technological regime shifts. **Futures**, v. 26, issue 10, dec. 1994.

KUHN, T. The structure of scientific revolutions. Chicago: **University of Chicago Press**. 1962.

LEITE, A. D. **A energia do Brasil**. Rio de Janeiro: Nova Fronteira, 1997.

_____. **Incertezas do sistema energia elétrica no Brasil**. Texto de discussão do setor elétrico n.º 7. GESEL/IE/UFRJ, set. 2009.

_____. **Considerações sobre energia elétrica no Brasil**. Texto de discussão n.º 30. Rio de Janeiro: GESEL/IE/UFRJ, fev. 2011.

MALERBA, F.; ORSENIGO, L. Schumpeterian patterns of innovation. **Cambridge Journal of Economics**, n.19, p.47 - 65, 1995.

NASTARI, P. M. Bioeletricidade: a importância e o potencial. **AgroANALYSIS. Revista de agronegócios da FVG**. Fundação Getúlio Vargas, v. 34, n.º 05, mai 2014.

NELSON, R. R.; WINTER, S. G. **In search of a useful theory of innovation**. *Research Policy*, 6(1), 1977.

NIKO, D.; FARIA, J. L. G.; MILANEZ, A. Y.; CASTRO, N. J. de; BRANDÃO, R.; DANTAS, G. de A. **Determinantes do baixo aproveitamento do potencial elétrico do setor sucoenergético**: uma pesquisa de campo. **BNDES Setorial** 33, p. 421–476. Mar. 2011.

PETRÓLEO BRASILEIRO S.A. (PETROBRÁS). **Oferta de gás natural**. Disponível em: <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/areas-de-atuacao/oferta-de-gas-natural/>. Acesso em: 27 jan. 2016.

PEREZ, C. **Technological revolutions and techno-economic paradigms**. Working Papers in Technology Governance and Economic Dynamics n.º 20. the other canon foundation, Norway. Tallinn University of Technology, Tallinn, Jan. 2009.

SANT'ANA, P. H. de M. (Coord.). **Além de grandes hidrelétricas**: políticas para fontes renováveis de energia no Brasil. Sumário para tomadores de decisão. WWF Brasil. 2012.

SCHUMPETER, J. A. **Teoria do desenvolvimento econômico**. São Paulo: Abril Cultural, 1982. 169 p. (Série Os economistas)

SICSÚ, A. B.; ROSENTHAL, D. Ideias fundadoras: apresentando um texto paradigmático. **Revista Brasileira de Inovação**, v. 5, número 1, jan/jun 2006.

SOUZA, Z. **Mercado para o uso da biomassa da cana-de-açúcar para produção de bioeletricidade no Brasil**. Trabalho apresentado no 1. Seminário sobre biomassa e cana-de-açúcar. Ribeirão Preto – SP. 12 ago. 2015.

TEIXEIRA, B. S. **A economia neoclássica e a inserção da bioeletricidade do bagaço de cana na matriz elétrica brasileira**. Dissertação (Mestrado em Gestão Econômica do Meio Ambiente). Universidade de Brasília, Brasília, 2014. Disponível em: < <http://www.unica.com.br/documentos/documentos/bioeletricidade/>> Acesso em: 13 set. 2015.

TOLMASQUIM, M. T. **Geração de energia elétrica no Brasil**. Rio de Janeiro: Cenergia: Interciência, 2005.

_____. **O novo modelo do setor elétrico brasileiro**. Rio de Janeiro: Synergia; EPE, 2011.

TUDESCHINI, L. G. **A bioeletricidade sucroenergética na diversificação da matriz elétrica brasileira: potenciais, barreiras e perspectivas**. Monografia (Bacharelado em Ciências Econômicas). Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo. Piracicaba, 2012.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇUCAR (UNICA). **A indústria da cana-de-açúcar**. 01 jan. 2009. Disponível em: < <http://www.unica.com.br/documentos/publicacoes/pag=5>> Acesso em: 12 set. 2015.

_____. **Unicadata: histórico de produção e moagem por safra**. Disponível em: < <http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4&acao=visualizar&idTabela=1610&safra=2013%2F2014&estado=SP>> Acesso em: 17 ago. 2015a.

_____. **Bioeletricidade em números Setembro/2015**. Disponível em: < <http://www.unica.com.br/documentos/documentos/bioeletricidade/>> Acesso em: 12 set. 2015b.

URIONA MALDONADO, M. **Dinâmica de Sistemas Setoriais de Inovação: Um modelo de simulação aplicado no Setor Brasileiro de Software**. 2012 279 f. Tese (Doutorado em Engenharia e Gestão do Conhecimento)-Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

VIEIRA, R. M. **Teorias da firma e inovação: um enfoque neo-schumpeteriano**. Universidade Estadual de Mato Grosso do Sul, Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, 2010. Disponível em: <http://www.apec.unesc.net/IV_EEC/sessoes_tematicas/Economia%20industrial,%20oci%EAncia,%20tecnologia%20e%20inova%E7%E3o/Teorias%20da%20firma%20e

%20inova%E7%E3o%20%20um%20enfoque%20neo-schumpeteriano.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2015.