

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO – MTA**

**COGERAÇÃO A PARTIR DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR:  
HISTÓRICO, SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS PARA O SETOR**

**CARLOS ALEXANDRE DE OLIVEIRA**

**Sertãozinho / SP  
2013**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PÓS-GRADUAÇÃO EM GESTÃO DO SETOR SUCROENERGÉTICO – MTA**

**COGERAÇÃO A PARTIR DO BAGAÇO DA CANA-DE-AÇÚCAR:  
HISTÓRICO, SITUAÇÃO ATUAL E PERSPECTIVAS PARA O SETOR**

**CARLOS ALEXANDRE DE OLIVEIRA**

Monografia apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Gestão do Setor  
Sucroenergético – MTA.

Aluno: Carlos Alexandre de Oliveira

Orientador: Prof. Cláudio Hartkopf Lopes

**Sertãozinho / SP  
2013**

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho primeiramente a Deus, por me propiciar saúde e perseverança. Aos meus pais, Carlos e Marta que, com grande esforço garantiram minha formação. À minha esposa Daniele, pela paciência e compreensão.*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar a Deus por ter iluminado meu caminho durante toda esta caminhada.

Aos meus pais, Carlos e Marta, que são minha fortaleza, incentivando-me nos momentos difíceis com apoio, confiança, amor, e ensinando-me a persistir nos meus objetivos. Hoje são o alicerce da minha formação.

À minha esposa Daniele, pela compreensão nos momentos de ausência e pela paciência nos momentos de aflição.

Ao meu orientador Prof<sup>o</sup> Claudio Hartkopf Lopes e à Prof<sup>a</sup> Marta Regina Verruma Bernardi, pela ajuda, compreensão e confiança.

A todos os professores e amigos do curso de Pós-Graduação em Gestão do Setor Sucroenergético – MTA, pela troca de experiências, convívio e amizade.

Enfim, a todos que contribuíram de maneira direta e indireta para o sucesso deste trabalho. Muito obrigado!

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO .....</b>   | <b>1</b>  |
| <b>2. OBJETIVOS.....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>   | <b>3</b>  |
| <b>4. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>  | <b>4</b>  |
| 4.1. Definição do termo cogeração .....  | 4         |
| 4.2 Histórico da cogeração .....   | 5         |
| 4.3 A cogeração no Brasil.....   | 6         |
| 4.4 O uso da biomassa como combustível para a cogeração .....  | 11        |
| 4.5 O bagaço da cana-de-açúcar .....   | 14        |
| 4.6 Sistemas de cogeração .....  | 19        |
| 4.7 Cogeração no setor sucro-energético.....   | 27        |
| 4.8 Implementação do uso do palhico da cana-de-açúcar como parte do<br>combustível para a cogeração..... | 32        |
| 4.9 Aspectos ambientais e sócio-econômicos da cogeração.....   | 35        |
| 4.10 O setor elétrico brasileiro .....   | 38        |
| 4.11 Comercialização do excedente da energia elétrica cogorada pelas usinas de<br>açúcar e álcool.....   | 42        |
| 4.12 Panorama atual da cogeração no setor sucroenergético.....   | 45        |
| 4.13 Políticas de incentivos à cogeração.....  | 48        |
| 4.14 Perspectivas do setor para os próximos anos .....   | 50        |
| <b>5. CONCLUSÃO .....</b>  | <b>52</b> |
| <b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>  | <b>54</b> |

## RESUMO

O Brasil apresenta um cenário energético pouco diversificado em que predomina a produção de energia elétrica por fontes hidráulicas. A cogeração nas indústrias apresenta-se como uma alternativa muito interessante, por obter-se de uma única fonte primária duas formas de energias distintas: térmica e mecânica (que depois pode ser convertida em energia elétrica). Especificamente o setor sucroalcooleiro se destaca pela grande capacidade de cogeração. Para as usinas sucroalcooleiras a cogeração é uma prática essencial ao processo industrial, e tal procedimento acontece a partir da queima do bagaço da cana-de-açúcar. Mais atualmente, com a assinatura de protocolos ambientais que objetivam a extinção das queimadas nos canaviais, o palhiço da cana, que antes era incinerado no campo, tem sido incorporado à biomassa que pode ser utilizada para geração de vapor e posterior produção de energia elétrica. Este processo nas usinas mais modernas se faz atualmente de forma tão eficiente que em alguns casos o que é gerado excede as necessidades da planta industrial e esse excedente pode ser comercializado. O intuito deste trabalho é, através de consulta à bibliografia existente sobre o assunto, abordar os seguintes temas: a história da cogeração no Brasil e no mundo e sua evolução até o dias atuais; a utilização da biomassa, e mais especificamente, do bagaço da cana-de-açúcar como combustível para as termelétricas; os ciclos de cogeração existentes e os mais utilizados no setor sucroenergético; a implementação do uso do palhiço também como fonte de energia para cogeração; os aspectos econômicos e sócio-ambientais que envolvem o processo de cogeração; o sistema elétrico brasileiro e seu funcionamento; as formas de comercialização do excedente da energia elétrica cogorada; os entraves para conexão dos produtores ao sistema elétrico nacional; as políticas governamentais de incentivo ao uso de fontes renováveis de energia; a situação atual do setor, as dificuldades e as perspectivas do setor para investimentos nos próximos anos.

Palavras-chave: cogeração de energia, biomassa, setor sucroenergético.

## 1. INTRODUÇÃO

A energia é um bem essencial à vida na sociedade moderna. O nível de desenvolvimento energético é dos principais indicadores do nível de desenvolvimento geral de um país. Muitas nações, e em especial o Brasil, vem experimentando uma elevação do poder aquisitivo de sua população nas últimas décadas, o que tem demandado uma quantidade de energia cada vez maior.

A matriz energética nacional é baseada na hidroeletricidade, chegando a quase 90% do total de energia elétrica gerada no Brasil. Este tipo de energia, apesar de ser originado através de uma fonte renovável, não pode ser considerada uma energia limpa, já que a decomposição da vegetação nas áreas alagadas pelos reservatórios gera uma grande quantidade de gás metano, importante causador do efeito estufa. Além disso, outros fatores desfavoráveis a este tipo de geração são o alto custo de implantação de uma hidrelétrica, além do fato de ser uma produção centralizada e não distribuída, o que resulta em altos custos de transmissão e distribuição desta energia gerada até os grandes centros consumidores.

O desenvolvimento econômico exige investimentos e uma diversificação do setor elétrico brasileiro. Como alternativa surgiu a geração de energia elétrica proveniente do processo de cogeração e, em um caso mais específico, a partir da queima da biomassa em usinas sucroalcooleiras. Este modelo apresenta-se como uma opção viável tanto do ponto de vista econômico quanto ambiental, já que, a partir de uma única fonte de energia primária e renovável são obtidos outros dois tipos de energia – térmica e mecânica. Atualmente, as usinas sucroalcooleiras geram eletricidade para suprir de maneira parcial ou total as necessidades de suas instalações.

Nem toda usina gera uma quantidade de energia excedente, ou seja, energia destinada à venda. A geração de excedentes em uma usina passa por uma série de fatores, que consistem em investimento em tecnologia e equipamentos de alta eficiência, adequação às exigências requeridas pelo poder concedente e poderio econômico. No entanto, a cogeração no Brasil é um fato ainda recente no contexto de geração de energia elétrica, sendo ainda pouco explorada e com grande potencial de crescimento. A legislação relacionada ao tema ainda encontra-se em fase de desenvolvimento, com constantes alterações.

Países como o Brasil, com imensas áreas agriculturáveis e um clima favorável, não podem deixar de fazer uso da energia da biomassa como parte integrante de suas matrizes energéticas. Neste sentido, a cultura canavieira é a que mais facilmente poderia ampliar a participação da biomassa na matriz energética brasileira, dada a extensão da área plantada, oferecendo boas condições para transformar em energia elétrica o bagaço e o palhico proveniente da colheita sem a queima prévia.

A cogeração agrega ao mix de produtos da usina sucroalcooleira a eletricidade e o vapor, que além de essenciais ao processo de produção de açúcar e álcool, podem ser comercializados. Além de tudo, a cogeração no setor sucroalcooleiro representa uma forma descentralizada de produção de energia, próxima aos centros de consumo (principalmente na região Centro-Sul), reduzindo os altos custos com transmissão e perdas de energia. Também representa uma prática que contribui para redução de emissões de gases de efeito estufa e possibilita, principalmente na Região Centro-Sul do país, compensar, durante o período de safra, o baixo nível dos reservatórios de água das hidrelétricas.

O setor elétrico brasileiro vem passando por diversas alterações que regulamentam a comercialização de energia elétrica. Essas mudanças levaram parcelas do setor sucroalcooleiro a realizar investimentos visando comercializar o excedente de energia, aproveitando assim as vantagens da venda de excedentes de energia elétrica, em vista de suas dificuldades econômicas e de sua necessidade de diversificação. O potencial de mercado para comercialização do excedente de energia elétrica exportável depende fundamentalmente da estrutura do setor elétrico, da disposição dos empresários do setor sucroalcooleiro em investir neste novo negócio e do interesse das empresas concessionárias de distribuição de energia elétrica em agregar esta fonte a seu portfólio e sua disposição em remunerar adequadamente a energia elétrica contratada.

O principal entrave para produção de excedentes de energia é a exigência de equipamentos de alta eficiência e, portanto, de custo elevado, além de demandar alto investimento financeiro também na interligação com as redes de transmissão e distribuição da energia, além das tarifas de uso das mesmas. A viabilidade da venda da energia passa pela relação que há entre custos na conexão à rede básica e tarifas de uso com a quantidade de energia gerada, comercializada a um preço que compense a médio ou longo prazo o investimento realizado.

## **2. OBJETIVOS**

O objetivo deste trabalho foi verificar na literatura a produção científica existente sobre cogeração de energia no Brasil, em especial o tipo de cogeração praticado pelo setor sucroenergético.

Neste sentido, o trabalho analisou o histórico deste processo, partindo de meados do século XIX e a sua evolução até os dias atuais. Com enfoque sempre no setor sucroalcooleiro, procurou-se ainda descrever tecnicamente os ciclos mais usuais de cogeração com biomassa, o avanço na questão ambiental e a exportação dos excedentes da produção de energia elétrica para o sistema elétrico nacional. Também foi um dos objetivos a análise das formas de comercialização desta energia, traçando um panorama atual do setor sucroenergético e das perspectivas dos empresários quanto à cogeração.

## **3. MATERIAL E MÉTODOS**

A busca por informações acerca do tema em questão foi realizada utilizando-se como palavras-chave: “cogeração”, “biomassa”, “bagaço de cana-de-açúcar”, “palha da cana de açúcar”, “energia elétrica”, terminologias comuns em língua portuguesa em sites da internet como Scielo, Lilacs, Bibliotecas Digitais etc. Cronologicamente, a pesquisa sobre o assunto iniciou-se por volta de 1880, quando foram construídas as primeiras plantas de geração de energia elétrica, época em que a baixa tensão de geração limitava a cobertura de ação da rede de distribuição a uma pequena distância em torno do ponto de produção. Deste período até os dias atuais foram levantadas informações quanto à evolução técnica dos sistemas de cogeração e, mais especificamente, daqueles que utilizam como combustível o bagaço da cana-de-açúcar. Baseado em projeções do atual mercado de energia elétrica, também foi traçado um cenário para o futuro da cogeração no setor sucroenergético e as perspectivas dos empresários do ramo para os próximos anos.

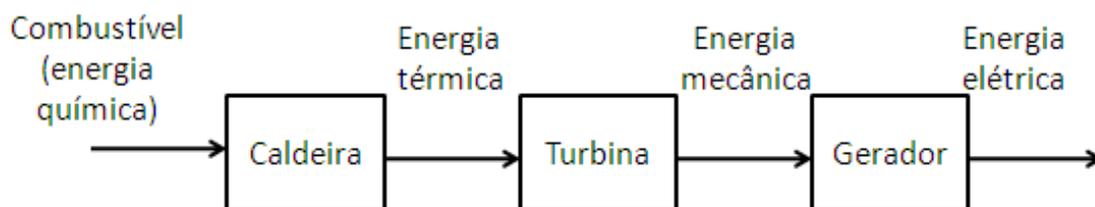
## 4. REVISÃO DA LITERATURA

### 4.1. Definição do termo cogeração

Existem diferentes definições atribuídas ao termo cogeração. Entretanto, o conceito que fisicamente melhor o define é: produção conjunta, em processo seqüencial, de energia elétrica ou mecânica e de energia térmica útil, partindo de uma mesma fonte de energia primária (LOZANO, 1998). Alguns autores como Horlock (1997) tratam a cogeração com a expressão “produção combinada de calor e potência”.

A cogeração, definida na língua inglesa como CHP (*combined heat and power*), é uma solução de engenharia, aplicável a determinados usuários de energia que, em condições favoráveis, pode viabilizar economicamente a auto-produção de energia (BRASIL, 2005).

Em relação à funcionalidade da tecnologia, os sistemas de cogeração são projetados para garantir a demanda térmica do consumidor, já que a compra deste tipo de energia não é viável na maioria dos casos. A potência elétrica gerada pode ser utilizada também para consumo próprio e, dependendo da disponibilidade de combustível e da eficiência dos equipamentos, gerarem excedentes de energia elétrica para venda, constituindo-se em mais um produto da empresa. A maior vantagem deste processo é o maior aproveitamento da energia contida na fonte, reduzindo consideravelmente os custos de produção de energia nas duas formas citadas (BRASIL, 2005). A figura 1 ilustra de forma esquemática este processo.



**Figura 1:** Cogeração de energia.

Fonte: Brasil (2005).

A conversão da energia química de um combustível em trabalho mecânico útil passa obrigatoriamente por um processo termodinâmico de conversão cuja eficiência é sempre baixa, com uma quantidade de energia térmica rejeitada elevada, resultando que a energia mecânica é uma forma de energia nobre. Já a conversão de um combustível em calor é um processo de alta eficiência e o rendimento pode chegar próximo de 100% quando há combustão e condensação do vapor d'água (NETO, 2002).

#### **4.2. Histórico da cogeração**

A cogeração surgiu no final dos anos de 1880 na Europa e nos Estados Unidos. Os primeiros sistemas de cogeração (termelétricas) somente surgiram no final do século XIX, quando o fornecimento de energia elétrica ainda era raro pelas geradoras (LORA, 2004). No início do século XX, uma grande parte das indústrias gerava sua própria energia elétrica, na maioria dos casos utilizando como combustível o carvão. A queima deste combustível produzia o vapor que movimentava turbinas que, por sua vez, acionava os geradores elétricos.

De acordo com Silva e Mendonça (2003), em 1900, da totalidade da energia produzida localmente em plantas industriais, 58% era cogerada. Por volta de 1880 foram construídas as primeiras plantas de cogeração elétrica, época em que a baixa tensão de geração limitava a cobertura de ação da rede de distribuição a uma pequena distância em torno do ponto de produção. No início dos anos de 1900 ainda era raro o fornecimento de energia elétrica através de grandes centrais, o que obrigava os médios e grandes consumidores a instalarem o seu próprio sistema de geração.

Posteriormente, com a geração em corrente alternada e o uso de transformadores de alta tensão, aumentou-se o raio de atuação dos sistemas de distribuição (LORA, 2004). Com a construção das grandes hidrelétricas capazes de garantir uma fonte confiável de geração de energia elétrica e da consequente queda nos custos de produção, muitas indústrias começaram a comprar a eletricidade, deixando de produzi-la. Em suma, a melhora da confiabilidade, disponibilidade e das condições econômicas dos sistemas de geração, transporte e distribuição de energia elétrica, obtidas com a economia de escala, a disponibilidade de combustíveis a preços baixos e regulações e proibições que se verificaram no decorrer deste século

contribuíram para que a cogeração perdesse sua importância e tivesse seu emprego restrito a casos bastante específicos (TOLMASQUIM et al., 1999). A consequência direta do fato foi uma redução drástica da cogeração neste período, marcado por uma intensa regulamentação do setor elétrico em diversos países.

Este cenário perdurou até meados de 1970, período marcado por uma incrível alta nos preços dos derivados do petróleo. A incerteza quanto ao fornecimento destes derivados impulsionou uma nova revitalização da cogeração, passando-se a buscar sistemas mais eficientes de geração de energia, baseados no uso de combustíveis alternativos. Neste momento, inclusive no Brasil, houve uma intensificação das ações que buscavam a racionalização do uso da energia, representando um estágio inicial das práticas para evitar o desperdício energético. Em paralelo, as últimas décadas vêm sendo caracterizadas por importantes restrições ambientais, elevando a cogeração à condição de importante alternativa para as políticas energéticas, visto que sua utilização reduz o consumo de combustível para uma mesma aplicação final, reduzindo os níveis de emissões totais.

Atualmente os sistemas de cogeração vem sendo implantados nos mais diversos tipos de indústrias (siderúrgicas, petroquímicas, refinarias, cimento, alumínio, mineração, cervejarias, cerâmicas, têxteis, fertilizantes, papel e papelão, farmacêuticas, usinas de açúcar e álcool, etc). Também vêm encontrando ampla aplicação no setor terciário (hotéis, shoppings, edifícios comerciais, hipermercados, hospitais, etc.). Nestes últimos, a geração de energia elétrica destina-se ao fornecimento de força motriz e iluminação, enquanto o rejeito térmico é utilizado para climatização através do uso de *absorption chillers* (CUNHA, 2000).

### **4.3 A cogeração no Brasil**

O Brasil apresenta uma incrível abundância de recursos hídricos e relevo característico. Isto explica o fato do sistema de geração de energia elétrica brasileiro ser predominantemente hidrelétrico. Por outro lado, há um grande potencial a ser explorado, o que faz essa forma de obtenção de energia o maior potencial para geração de eletricidade. Ainda, esse tipo de exploração é beneficiado pelo sistema interligado nacional e pela capacidade de acumulação plurianual (característica dos reservatórios) (GOÉS, 2001). Contudo, a oferta de energia

baseada exclusivamente em um tipo de geração predominante não é recomendável do ponto de vista estratégico.

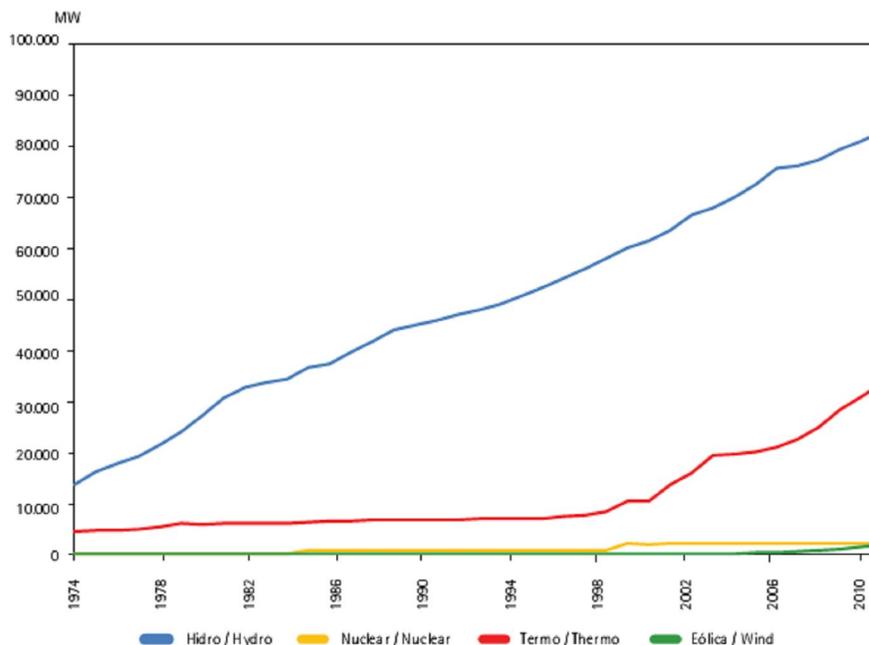
A partir da década de 60, a incrível expansão na geração hidrelétrica dava sinais de que nenhuma outra fonte de geração de energia poderia com ela concorrer. Entretanto, a necessidade de investimentos cada vez maiores e grandes ciclos de tempo para funcionamento – tanto na obtenção das licenças ambientais, quanto na construção das hidrelétricas – a partir da década de 90, percebeu-se um decréscimo percentual desta fonte de geração na matriz energética nacional. Para suprir o aumento da demanda energética que se instalava, naquele tempo, foi adotado o sistema de geração termelétrica, sendo o gás natural o principal combustível utilizado (PARO, 2011).

É inegável que a matriz energética brasileira vem, ano após ano, se modificando. No ano de 1997 foi instituído um novo marco regulatório para o setor elétrico, chamado Reestruturação do Setor Elétrico Brasileiro (RESEB), prevendo grande participação do capital privado, com o intuito de expansão do sistema de geração e orientada ao preço de mercado da energia elétrica. Mesmo instalado um novo marco regulatório, existia uma grande dificuldade em se obter energia abundante, ao menos para acompanhar o passo da demanda crescente (entre 1980 a 1999 o consumo de eletricidade aumentou 5%, enquanto que a capacidade instalada cresceu 4%) (PELLEGRINI, 2009). Tais fatos obrigaram o governo brasileiro aderir ao Programa Prioritário de Termelétricas (PPT), em 1999, onde o país passou a importar gás natural da Bolívia (existia uma grande oferta do combustível naquele país) e, por meio das usinas termelétricas, a energia foi injetada na rede a fim suprir o déficit energético que se anunciava. Em 2000, 83% da geração de energia era de base hidráulica, e diante da escassez de chuva naquele período, culminou em baixo volume pluviométrico. Como consequência desses acontecimentos, em 2001, ocorreu o chamado “apagão” – ou seja, um blecaute no sistema de fornecimento de energia. Naquele ano, a sociedade não teve alternativa, a não ser, reduzir compulsoriamente o consumo de energia elétrica em todos os setores. Superada essa fase, o governo federal lançou, em 2002, o Programa de Incentivo às Fontes Renováveis de Energia (PROINFA) e, em 2004, instituiu um novo marco regulatório instituindo a comercialização centralizada de energia elétrica e a modicidade tarifária, como forma de obter mais alternativas e opções para

geração de energia e equilibrar a capacidade instalada com a energia demandada (PARO, 2011).

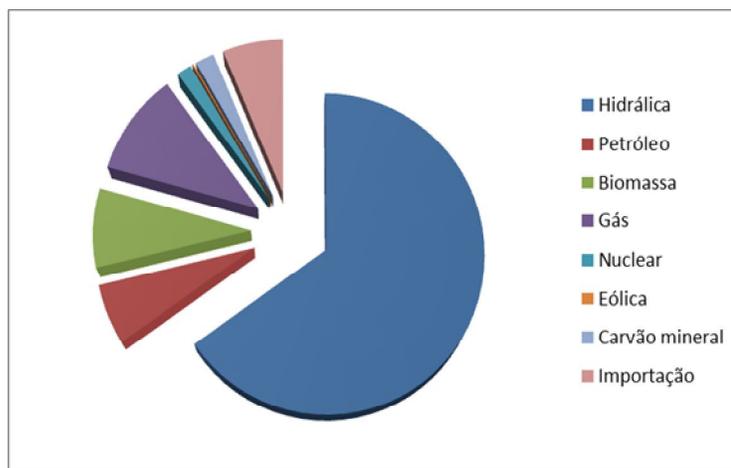
O Brasil passou por mais uma crise no setor energético no início do ano de 2013. Analogamente a 2001, esse colapso se instalou devido ao baixo índice pluviométrico, obrigando o governo federal a realizar reuniões emergenciais com órgãos que monitoram e planejam a matriz energética brasileira, induzindo-o a tomar algumas decisões pontuais a fim de controlar um possível pânico que se instalava. Uma das alternativas foi a ativação de usinas termelétricas que previamente estavam desabilitadas (uma vez que são consideradas mais caras que centrais hidrelétricas), como a Usina Termelétrica (UTE) de Uruguaiana, com capacidade de geração de 650 MW e que utiliza gás natural liquefeito (GNL) como combustível (COSTA, 2013). Alguns apagões que aconteceram no ano de 2013, nas regiões Norte, Nordeste, Sudeste e Centro-Oeste podem ter precedentes e motivos técnicos - falta de investimento no setor energético - e motivos políticos envolvidos. (Fonte: EXAME, 2012).

Essas crises energéticas não influenciam negativamente somente o setor elétrico como também a economia, o setor industrial, o comércio, a política e o cotidiano da população em geral. (MAGALHÃES, 2008). É nitidamente perceptível que a geração hidrelétrica é e continuará sendo a principal fonte geradora de eletricidade para o país. Contudo, é necessário o investimento em fontes secundárias, como as termelétricas, para que estejam preparadas para as oscilações da demanda e, principalmente da oferta de energia hidrelétrica, tão dependente das condições climáticas. A figura 2 apresenta um gráfico relativo à capacidade de geração de energia elétrica no Brasil de 1974 a 2011, elaborado pelo Ministério de Minas e Energia (MME). É notável a expansão da capacidade instalada das centrais termelétricas, passando de 10 GW em 1999 para 33 GW em 2011, representando um crescimento de 300% neste período.



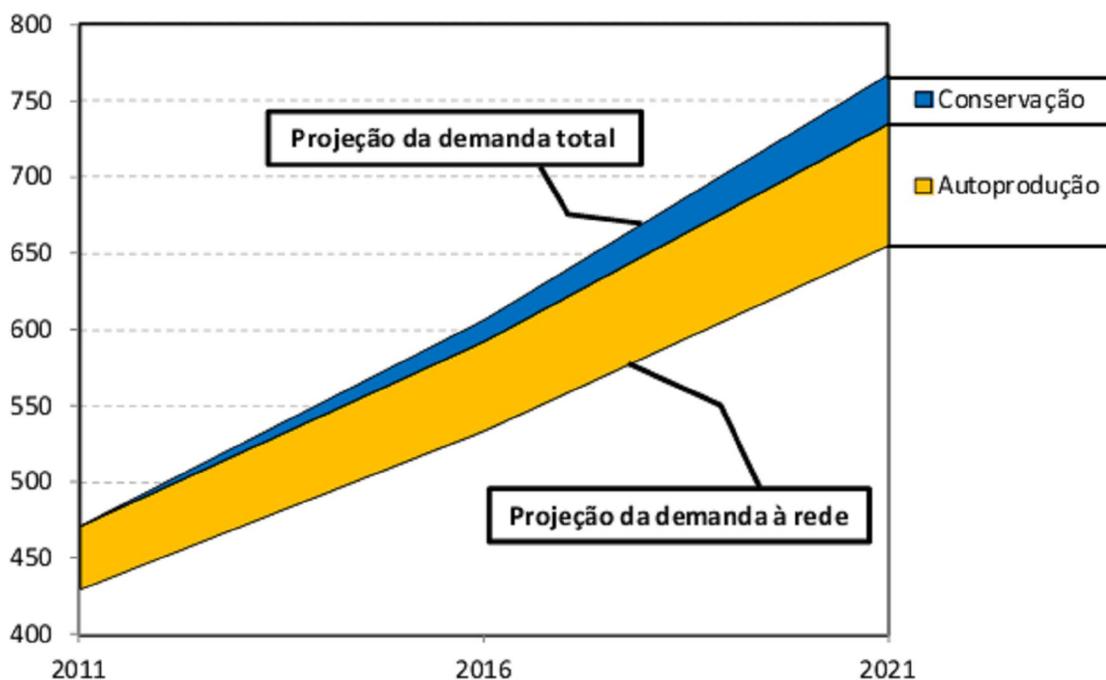
**Figura 2:** Capacidade instalada de geração elétrica no Brasil.  
Fonte: MME (2012).

A figura 3 indica a capacidade instalada de energia elétrica por fonte, em 2013. De acordo com a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), aproximadamente 65% da energia total é produzida por hidrelétricas, entretanto, a geração termelétrica – seja através de combustíveis renováveis ou fósseis – já representa um índice superior a 26% de toda a matriz energética. É importante salientar também que, cerca de 30% da energia termelétrica é oriunda do uso da biomassa como combustível renovável.



**Figura 3:** Capacidade instalada de energia elétrica por fonte em 2013.  
Fonte: ANEEL (2013).

Em 2011, o consumo de energia elétrica do Brasil foi de 480 TWh, sendo que, destes, 77 TWh são oriundos da autoprodução. De acordo com os dados obtidos em um estudo de Projeção de Demanda de Energia Elétrica realizada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e encomendada pelo Ministério de Minas e Energia, tomando como premissas questões demográficas, macroeconômicas e setoriais, o aumento de consumo até 2021 será superior a 50% da demanda atual, conforme ilustrado na figura 4.



**Figura 4:** Projeção total de eletricidade até o ano 2021 (TWh).  
Fonte: MME (2012).

Por conservação deve-se entender a diminuição de perdas, seja na geração, transmissão, distribuição de energia ou na eficiência energética do consumidor. Já a autoprodução de energia tende a evoluir e agregar valores significativos na produção de eletricidade até o ano de 2021. A expansão do consumo de energia está diretamente vinculado ao ritmo de crescimento e desenvolvimento do país. O Brasil pode se considerar privilegiado, pois diferentemente da maioria dos países em desenvolvimento, é capaz de suprir o seu desenvolvimento por meio de recursos renováveis, e a geração termelétrica através da biomassa pode ser considerada uma opção atraente, tendo em vista o potencial

atrelado, e as formas atuais de tornar eficiente a conversão de energia e melhor aproveitar o combustível em questão. (PELLEGRINI, 2009).

#### **4.4 O uso da biomassa como combustível para a cogeração**

Do ponto de vista energético, biomassa é toda matéria orgânica (de origem animal ou vegetal) que pode ser utilizada na produção de energia. De acordo com o Atlas de Energia Elétrica do Brasil, assim como a energia hidráulica e outras fontes renováveis, a biomassa é uma forma indireta de energia solar. A energia solar é convertida em energia química, através da fotossíntese, base dos processos biológicos de todos os seres vivos. Portanto, todos os organismos biológicos que podem ser aproveitados como fonte de energia são chamados de biomassa, tais como: a cana-de-açúcar, a beterraba, o eucalipto, o biogás (produzido pela biodegradação anaeróbia dos dejetos orgânicos), lenha e carvão vegetal, óleos vegetais (amendoim, soja, dendê, etc).

Segundo Vasconcelos et al. (2007), a biomassa energética é o resultado obtido da atividade fisiológica das plantas, que podem se comportar como verdadeiras usinas, podendo assim transformar a energia solar, por meio do processo fotossintético, em energia química. Quando a biomassa é processada de forma eficiente, química ou biologicamente, extrai a energia armazenada nas ligações químicas e a subsequente "energia" produzida combinada com o oxigênio, o carbono é então oxidado para produzir CO<sub>2</sub> e água. Esse processo é cíclico, e o CO<sub>2</sub> é então disponível para produzir nova biomassa (McKENDRY, 2002).

O uso do fogo foi uma das primeiras formas para a utilização da biomassa pelo homem, para a obtenção de energia. A madeira foi, por muito tempo, a principal fonte energética utilizada, ao lado de óleos vegetais e animais, em menor escala. A Revolução Industrial marcou o auge da importância do consumo da biomassa, com o uso de lenha na indústria siderúrgica, além de sua aplicação nos transportes (OLIVEIRA, 2007). De acordo com o Banco Mundial, 50% a 60% da energia nos países em desenvolvimento vêm da biomassa, e metade da população mundial cozinha com madeira. A geração de energia por queima da madeira cresceu de 200 megawatts em 1980 para 7.800 megawatts atualmente (BALEOTTI, 2007). Ainda segundo o Atlas de Energia Elétrica do Brasil, embora grande parte da biomassa seja de difícil contabilização devido ao uso não-comercial, estima-se que,

atualmente, ela possa representar até cerca de 14% de todo o consumo mundial de energia primária. Em alguns países em desenvolvimento, essa parcela pode aumentar para 34%, chegando a 60% na África.

Nos últimos tempos a biomassa tem despertado grande interesse como fonte de energia renovável, na medida em que aumenta a preocupação com a exaustão das fontes não-renováveis, principalmente quando se fala dos combustíveis fósseis. Muller (2005) informa que, na década de 70, a biomassa foi considerada como alternativa viável para atendimento às demandas por energia térmica e de centrais elétricas de pequeno e médio porte. No entanto, a partir de 1985, os preços do petróleo voltaram a cair, desencadeando desinteresse novamente por energias alternativas. Posteriormente, na década de noventa, a biomassa ganha destaque novamente no cenário energético mundial devido ao desenvolvimento de tecnologias mais avançadas de transformação, pela ameaça de esgotamento das reservas de combustíveis fósseis e pela incorporação definitiva da temática ambiental nas discussões sobre desenvolvimento sustentável. A assinatura do protocolo de Kyoto, em 1997 reforçou ainda mais esta ideia, pois ficou estabelecido que os países em desenvolvimento deveriam reduzir significativamente as emissões de gases causadores do efeito estufa, apontando para um futuro em que as fontes renováveis de energia ganhariam cada vez mais importância na matriz energética mundial.

Existem diversas maneiras de se aproveitar o potencial energético da biomassa e gerar energia de forma economicamente eficiente, o que atualmente ainda não ocorre nos países pobres. Diante da abundância dos recursos mundiais de biomassa, espera-se num futuro próximo, um aumento considerável na exploração destes recursos, na medida em que os custos de produção da energia renovável se tornem competitivos em relação aos combustíveis fósseis. De acordo com Grauer e Kawano (2008), o uso da biomassa apresenta diversas vantagens: é um recurso renovável, conforme já mencionado; tem baixo custo de aquisição; não emite dióxido de enxofre; as cinzas são menos agressivas ao meio ambiente que as provenientes dos combustíveis fósseis; provoca menor corrosão dos equipamentos (caldeiras, fornos); tem menor risco ambiental e suas emissões não contribuem para o efeito estufa. Em especial no Brasil, a biomassa como fonte de energia possui vantagens significativas, principalmente por diversificar a matriz energética brasileira; por contribuir para um desenvolvimento sustentável do país, podendo

colaborar para a garantia de suprimento de energia a comunidades isoladas, principalmente nas regiões Norte e Centro Oeste do país e pelas vantagens ambientais (GENOVESE et al., 2006).

Jannuzzi (2003) afirma que a utilização de biomassa na geração de energia é de grande interesse para o país especialmente quando direcionado a usos como na geração de eletricidade, produção de vapor e combustíveis para transporte. Ainda segundo o mesmo autor, o mais importante independente da tecnologia empregada é a redução do custo da matéria prima, incluindo os custos de coleta e transporte. A energia advinda da biomassa, em 2000, representou 19,40% de toda energia primária consumida no Brasil, sendo 9,12% relativo à lenha. A biomassa tem despertado interesse maior entre as alternativas energéticas renováveis, por ser versátil, através dela podendo se obter combustíveis sólidos, líquidos e gasosos e, com base nesses a eletricidade (VALE et al. 2002).

Uma das formas de utilização da biomassa é por meio da queima direta que produz energia térmica e elétrica, sendo, portanto a biomassa uma fonte primária de energia. Outra forma é através do processamento da biomassa para produção de combustíveis, como a gaseificação, ou de processos biotecnológicos, como a fermentação (GENOVESE et al., 2006).

No Brasil, a imensa superfície do território nacional, quase toda localizada em regiões tropicais e chuvosas, oferece excelentes condições para a produção e o uso energético da biomassa em larga escala. Além da produção de álcool, queima em fornos, caldeiras e outros usos não-comerciais, a biomassa apresenta grande potencial no setor de geração de energia elétrica, destacando-se entre os principais tipos que podem ser usados como combustíveis, os provenientes da madeira, como a lenha, serragem e cavacos. Ainda de acordo com Genovese et al. (2006), além dessas, o bagaço de cana-de-açúcar também é muito empregado, devido à grande produção brasileira de açúcar e álcool, sendo o recurso de maior potencial para geração de energia elétrica no País. De acordo com o Atlas de Energia Elétrica do Brasil, alta produtividade alcançada pela lavoura canavieira, acrescida de ganhos sucessivos nos processos de transformação da biomassa sucroalcooleira, têm disponibilizado enorme quantidade de matéria orgânica sob a forma de bagaço nas usinas e destilarias de cana-de-açúcar, interligadas aos principais sistemas elétricos, que atendem a grandes centros de consumo dos Estados das regiões Sul e Sudeste. Além disso, o período de colheita da cana-de-

açúcar coincide com o de estiagem das principais bacias hidrográficas do parque hidrelétrico brasileiro, tornando a opção ainda mais vantajosa.

#### **4.5 O bagaço da cana-de-açúcar**

Historicamente a cana-de-açúcar é um dos principais produtos agrícolas do Brasil, sendo cultivada desde a época da colonização. Do seu processo de industrialização obtêm-se como produtos o açúcar nas suas mais variadas formas e tipos, o álcool (anidro e hidratado), o vinhoto e o bagaço. De acordo com Corrêa Neto (2001), o colmo, as folhas e os ponteiros fazem parte da cana-de-açúcar no campo no estágio de colheita, sendo o colmo a matéria-prima principal usada na fabricação de açúcar e álcool. O bagaço (biomassa constituída de fibras) é obtido após a moagem do colmo da cana-de-açúcar para obtenção do caldo. O bagaço é, portanto, um subproduto inevitável tanto no processo para produção de álcool quanto no de açúcar.

Caracterizando-se como uma das principais culturas agrícolas brasileiras, a cana-de-açúcar apresenta um ciclo produtivo médio de cinco anos, com possibilidade de cinco cortes e um rendimento médio de 85 toneladas por hectare, podendo variar de 65 a 120 toneladas por hectare (SCARPINELA et al., 2009). De acordo com Jank (2007), cada tonelada colhida e processada nas usinas pode gerar até 82 litros de álcool combustível ou 138 quilos de açúcar.com o meio ambiente.

Há alguns anos as usinas canavieiras utilizavam madeira de eucalipto para acender ou complementar seu consumo de combustível nas caldeiras. Embora utilizassem também o bagaço resultante da moagem de cana-de-açúcar para consumo nessas caldeiras , a produção era somente para consumo interno de seu parque industrial e o que sobrava ficava exposto às intempéries da natureza e seria reaproveitado no próximo ano. Como a produtividade agrícola foi aumentando cada vez mais , conseqüentemente o volume de bagaço também , houve então uma evolução em termos de máquinas industriais para que este volume fosse aproveitado de maneira racional dentro da indústria para geração de energia e não apenas fosse queimado para eliminar esta montanha de resíduo.

Schmidt (2008) afirma que é possível a geração de energia elétrica por meio da queima do bagaço devido a grande quantidade de cana-de-açúcar moída

para produção de açúcar e álcool, ou seja, cerca de 30% de bagaço em relação a quantidade de cana-de-açúcar.

Segundo Pellegrini (2002), a utilização do bagaço como combustível permite que as usinas sucroalcooleiras sejam auto suficientes em energia térmica e elétrica, o que não é comum acontecer em outros ramos industriais. O bagaço de cana-de-açúcar possui diversas vantagens que o tornam uma das biomassas com melhores atributos econômicos para ser industrializado e concorrer comercialmente com o óleo combustível.

Ainda de acordo com mesmo autor, a utilização do bagaço como combustível permite que as usinas sucroalcooleiras sejam auto suficientes em energia térmica e elétrica, o que não é comum acontecer em outros ramos industriais. O bagaço de cana-de-açúcar possui diversas vantagens que o tornam uma das biomassas com melhores atributos econômicos para ser industrializado e concorrer comercialmente com o óleo combustível. As seguintes vantagens podem ser citadas:

- (a) a cana-de-açúcar possui lavoura organizada e os custos da produção do bagaço são debitados no produto nobre: açúcar e/ou álcool;
- (b) todo sistema de transporte campo-indústria é organizado e ocorre por conta do mesmo produto nobre;
- (c) produz grandes quantidades de bagaço, concentradas em um ponto, que o libera semi beneficiado, após o processo de moagem da cana-de-açúcar.

De acordo com Paoliello (2006), o bagaço como combustível apresenta as seguintes características:

- (a) produção de bagaço por tonelada de cana processada: 250 a 260 kg.t<sup>-1</sup>;
- (b) energia útil contida no vapor gerado: 4,79 MJ.kg<sup>-1</sup> de bagaço;
- (c) produção de vapor por kg de bagaço: 1,9 kg vapor por kg de bagaço;
- (d) poder calorífico inferior (bagaço úmido): 7,53 MJ.kg<sup>-1</sup>;
- (e) poder calorífico inferior (bagaço após secagem): 10,56 MJ.kg<sup>-1</sup>.

Além do emprego como combustível, o excedente de bagaço pode ter as seguintes utilizações, como matéria-prima:

- (a) na fabricação de chapas de fibra, usadas nas construções;
- (b) na fabricação de massa de papel (celulose), como pasta de alto rendimento;
- (c) na fabricação de matéria plástica ou vários solventes utilizados na indústria;

(d) atualmente já começa a ser utilizado para produção em escala industrial do etanol de segunda geração, também conhecido como estanho celulósico.

A composição física do bagaço varia muito pouco. Sua propriedade mais importante, sob o ponto de vista energético (para produção de vapor), é a umidade. Os índices mais comuns mostram uma variação entre 45 e 50% (índice padrão = 48%). Além da água, o bagaço contém a fibra, constituída por celulose, que forma a “fibra” do bagaço e matérias em solução na água (proveniente da embebição e do caldo), composta por açúcar e impurezas (entre 2 e 4%). O valor deste índice, designado por  $f'$  (fibra % de bagaço) freqüentemente é da ordem de 46%. A composição média padrão do bagaço seco, segundo Hugot (1977), é a seguinte:

- Carbono (C) = 47%
- Hidrogênio (H) = 6,5%
- Oxigênio (O) = 44%
- Cinzas (E) = 2,5%

O poder calorífico, ou PC, é a quantidade de calor que a combustão de 1 kg do combustível considerado pode fornecer. Distinguem-se 2 valores de PC: poder calorífico superior, ou PCS: é o calor despreendido pela combustão de 1 kg do combustível bruto. O PCS é medido em bomba calorimétrica onde o combustível é queimado na presença de  $O_2$  a 30 bar ( $kgf/cm^2$ ), com o vaso de combustão mergulhado na água com temperatura na faixa de 20°C a 25°C. poder calorífico inferior, ou PCI, que supõe, pelo contrário, que a água formada pela combustão, assim como a água fisiológica do combustível, continue no estado de vapor. O PCS estabelece o potencial de calor teoricamente contido no combustível, porém, na prática industrial ainda não foi possível fazer baixar a temperatura dos gases de combustão abaixo do ponto de condensação. O PCI fornece uma ideia mais exata do calor realmente obtenível. Portanto, na prática deve-se adotar o PCI. Como não se tem instrumento que o forneça, o mesmo deve ser calculado. Assim, o PCI de um combustível é dado pela fórmula a seguir:

$$PCI = PCS - 600 E_{PV}$$

onde:  $E_{PV}$  = peso do vapor de água presente nos gases provenientes da combustão de 1 kg do combustível e calculado em kg.

Apesar das diferenças consideráveis na aparência das diversas variedades de cana, o PCS do bagaço seco é praticamente constante em todos os países e para todas as variedades. Assim, adota-se como usual para o PCS do bagaço seco o seguinte valor :

$$\text{PCS} = 4.600 \text{ Kcal / kg}$$

De acordo com os dados da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), indicados na tabela 1, ao sair das moendas, o bagaço (30% do peso da cana) tem uma umidade média de 50% e constitui-se basicamente dos elementos a seguir discriminados:

Tabela 1: Elementos constituintes do bagaço:

| CONSTITUINTES | BAGAÇO ÚMIDO<br>(MOENDAS) | BAGAÇO APÓS<br>SECAGEM |
|---------------|---------------------------|------------------------|
| Umidade       | 50%                       | 36%                    |
| Açúcar        | 2%                        | 2,6%                   |
| Impurezas     | 2%                        | 2,6%                   |
| Fibra         | 46%                       | 59,8%                  |

Fonte: Cetesb 2008.

Segundo Paoliello (2006), apesar de utilizado como alternativa energética, o bagaço da cana apresenta três inconvenientes: sua composição química decompõe-se ao longo do tempo, a densidade energética do bagaço “in natura”, tal como sai das moendas, é baixa (umidade = 50% e densidade energética = 214.800 kcal/m<sup>3</sup>) e a 50% não queima tão bem como o óleo combustível, acarretando uma diminuição na eficiência térmica nas caldeiras dos usuários do bagaço. O estudo da CETESB mostra, ainda, que se pode conseguir eliminar estes três fatores, através de prensagem, fermentação natural e aeração, num prazo de 20 dias, a baixo custo, obtendo-se um bagaço com 20% de umidade, com densidade energética seis vezes superior ao produto original, viabilizando o seu armazenamento e transporte a distâncias de até 200 km da fonte produtora. Além disso, o processo resolve o problema da deterioração do bagaço porque as transformações químicas ocorrem durante os 20 dias de processamento. Após esse período, o bagaço se estabiliza. Assim, a queima se dá de forma mais adequada

que o produto úmido e quase com tanta facilidade quanto o óleo combustível, permitindo que o rendimento térmico das caldeiras atinja valores da ordem de 85%.

A produção de energia elétrica nas usinas de açúcar e álcool a partir de bagaço é prática tradicional no mundo há muitos anos. O que varia em grande escala é a eficiência com que o potencial do bagaço é utilizado. Hoje em dia, o bagaço representa uma das opções mais atrativas para a geração de potência. No Brasil, a cogeração nas usinas de açúcar e álcool é também uma prática tradicional, porém, a produção de excedentes de energia elétrica cogerada só tem sido objeto de interesse nos últimos anos. Pode-se falar em heterogeneidade quando se trata do setor sucro-alcooleiro brasileiro. A enorme diversidade em termos de capacidade de moagem, eficiências de produção, entre outros aspectos, nas mais de três centenas de unidades industriais no país, indicam claramente que a identificação de um caso típico é praticamente impossível, muito embora seja possível estabelecer critérios na hora de tipificar os arranjos para os sistemas de produção de energia elétrica (PRIETO, 2003).

O processo de geração de energia elétrica em uma central termelétrica, do tipo existente no setor sucroalcooleiro, se baseia na transformação de energia térmica em energia mecânica e, desta em energia elétrica. Para produzir a energia térmica (vapor) é preciso queimar a biomassa (bagaço de cana). Tal combustível, depois que é incinerado, faz com que a água contida na caldeira seja transformada em vapor, que em alta pressão é transportado para uma turbina. No momento que a pressão baixa na turbina, o vapor tende a se expandir (descompressão de vapor), resultando no acionamento mecânico de um gerador elétrico acoplado ao eixo da turbina. Com isso, é produzida a energia elétrica (SOUZA, 2003).

A cogeração de eletricidade com bagaço, além de representar uma prática que contribui para redução de emissões de gases de efeito estufa, ela possibilita, principalmente na Região Centro-Sul do país, compensar, durante o período de safra, o baixo nível dos reservatórios de água das hidroelétricas (CLEMENTE, 2003).

Para Pellegrini (2002), o uso da biomassa sucroalcooleira pode se caracterizar como um apoio à oferta de eletricidade para a matriz energética brasileira, não só em períodos conturbados com crises de energia, mas também em períodos estáveis de oferecimento de energia elétrica.

Além de combustível utilizado primordialmente na geração de vapor para as usinas, nos últimos anos, outras aplicações têm sido desenvolvidas para o bagaço da cana com equipamentos para secagem, a níveis de 15% de umidade, utilizando gases de exaustão de caldeiras, visando posterior compactação e operação de planta de paletização e briquetagem. Usos finais, também como combustível, têm sido investigados na produção de gás pobre para ciclos diesel – gás para utilização em máquinas agrícolas ou em irrigação; e ainda, na produção de óleo pirolítico e na queima em caldeiras a óleo modificadas. Contudo, uma das linhas de estudo que mais vem despertando o interesse do setor é a utilização dessa mesma matéria-prima na obtenção do etanol celulósico. Há uma tecnologia, de segunda geração, que está sendo aperfeiçoada, para obtenção do etanol a partir da palha e do bagaço em nível econômico e competitivo. A expectativa é de que nos próximos anos as chamadas tecnologias de segunda geração estejam prontas para permitir a utilização do bagaço e da palha na produção de etanol por meio o processo de hidrólise. Estaria, portanto, definida de uma vez por todas a sustentabilidade e a competitividade do etanol brasileiro em relação ao resto do mundo. Essa é mais uma oportunidade para o fortalecimento do setor sucroalcooleiro e para a economia do País.

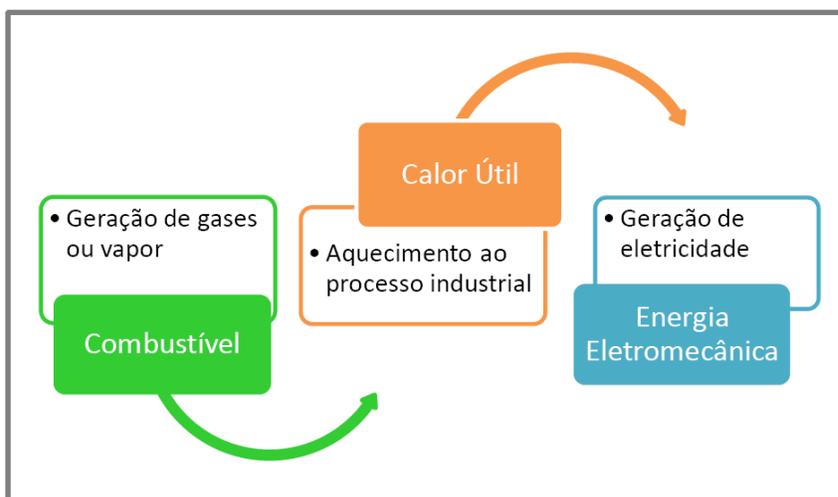
#### **4.6 Sistemas de cogeração**

Segundo Prieto (2003), um dos aspectos mais importantes, inerentes à definição, mas com muita relação com a funcionalidade da tecnologia, é que os sistemas de cogeração de energia são projetados para satisfazer fundamentalmente a demanda térmica do consumidor. Dessa forma, fazendo o uso do sistema de cogeração, é vantajoso para a indústria produzir de um único combustível, dois produtos diferentes e de valores distintos, como calor e potência. A potência elétrica gerada pode ser suficiente para atender parte, a totalidade ou exceder as necessidades da planta industrial, enquanto que o calor produzido é utilizado em inúmeros processos industriais.

Ainda de acordo com o mesmo autor, O desenvolvimento tecnológico do processo de cogeração é voltado exclusivamente para a melhoria do aproveitamento da fonte primária, uma vez que esse processo é um processo

sequencial de geração de eletricidade e consumo de calor útil e admite apenas duas possibilidades segundo a ordem de produção das formas de energia.

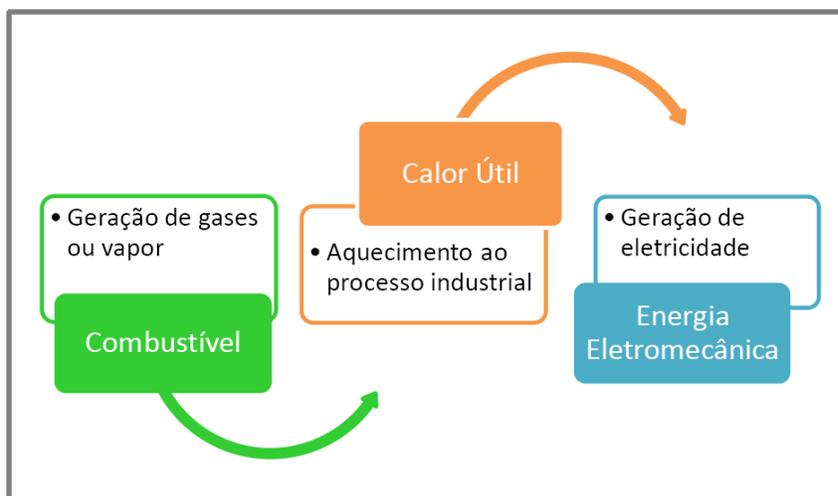
A maioria dos sistemas de cogeração podem ser caracterizados tanto como topping cycle como bottoming cycle. No caso de topping cycle, um fluido a alta temperatura (gases de exaustão, vapor) aciona uma turbina para produzir eletricidade, enquanto que um fluido a baixa temperatura é utilizado em processos térmicos ou no aquecimento/arrefecimento de espaços. Neste ciclo (também conhecido como Ciclo Montante), primeiramente ocorre a geração de gases ou vapor, através de um combustível. Em decorrência desse fato acontece a geração de energia eletromecânica, por meio das turbinas, e com um gerador acoplado ocorre uma conseqüente geração de eletricidade. Posteriormente, na continuidade do processo, ao invés da energia térmica que deu origem ao movimento das turbinas ser descartada, dispõe-se de um potencial de calor útil para ser reaproveitado em algum processo industrial. Este esquema pode ser verificado na figura 5.



**Figura 5:** Configuração Topping Cycle.  
Fonte: Costa (2013).

No caso do bottoming cycle, também chamado de Ciclo Jusante, numa primeira fase é produzido calor a altas temperaturas para um determinado processo (por exemplo numa fundição, produção de vidro ou cimenteiras) e após o processo os gases de combustão são utilizados diretamente para acionar a turbina a gás, caso a sua pressão seja adequada, ou indiretamente para produzir vapor num

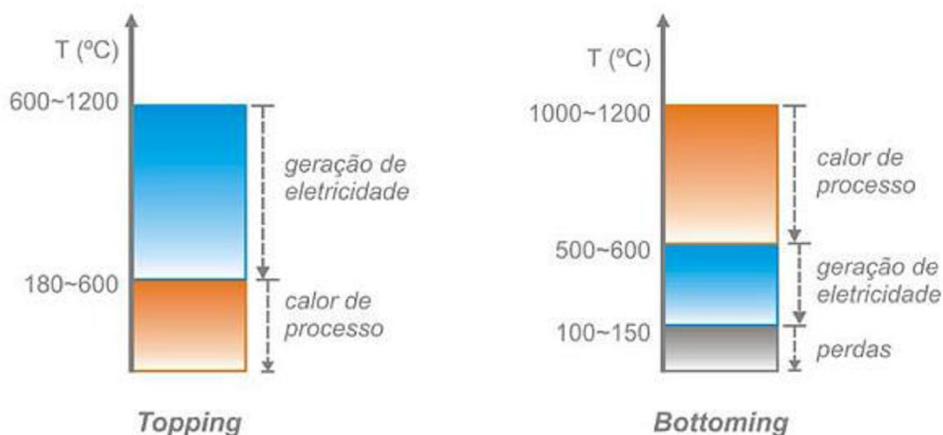
recuperador de calor, o qual aciona a turbina a vapor. Diferente do Ciclo Montante, no Ciclo Jusante, de acordo com a figura 6, após a geração de gases ou vapor em uma caldeira, por meio de um combustível, ocorre o fornecimento do calor ao processo industrial para, posteriormente, ocorrer a geração de energia eletromecânica e eletricidade.



**Figura 6:** Configuração Bottoming Cycle.  
Fonte: Costa (2013).

A aplicação dessas duas configurações dependerá do caso industrial a ser analisado. Segundo Costa (2013), para casos em que o processo industrial contenha secagem, cozimento e evaporação, habitualmente necessita-se de temperatura variando na faixa entre 120 e 200°C, logo o Ciclo Montante é a configuração ideal, sob o ponto de vista da racionalidade da cogeração; já a faixa para geração de eletricidade irá variar entre 400 e 950°C, utilizando turbinas de contrapressão. Este tipo de tecnologia é o mais empregado, uma vez que a maioria dos processos industriais demanda calor em temperaturas inferiores. Contudo, em casos onde a demanda de calor seja estimada para temperaturas superiores (na ordem de 1000 a 1200°C), como, por exemplo, em indústrias siderúrgicas, fornos cerâmicos, cimenteiras e refinarias de petróleo, faz-se uso da configuração de Ciclo Jusante. Ainda de acordo com Costa (2013), após o aproveitamento industrial os gases de exaustão continuam em temperatura elevada (entre 500 e 600°C), então são direcionados a um trocador de calor que irá produzir o vapor necessário para geração de energia eletromecânica e conseqüentemente elétrica, por meio de uma

turbina de condensação. O ponto negativo dessa forma é o baixo nível de temperatura advinda do processo industrial, geralmente sendo insuficientes para geração eletromecânica, levando em alguns casos à inviabilidade técnico-econômica de aplicação. Esta explicação está ilustrada na figura 7.



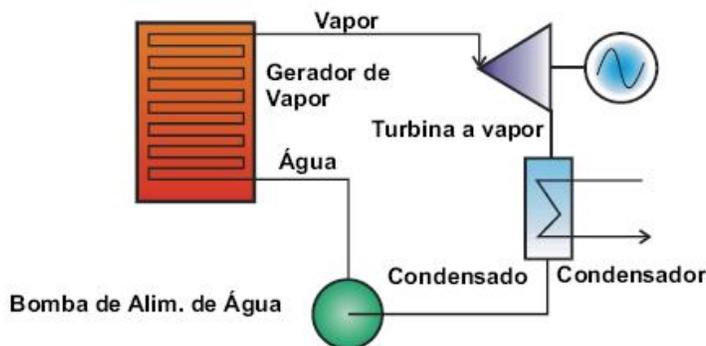
**Figura 7:** Faixa típica de temperaturas nas configurações de Ciclos Montante e Jusante.

Fonte: Barja (2006).

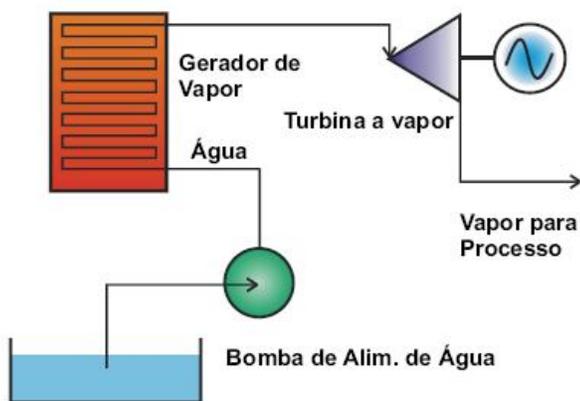
Dentre os ciclos térmicos para geração de energia elétrica, os mais utilizados são o Ciclo Rankine, Ciclo Brayton, além dos grupos geradores de pequeno porte baseados nos ciclos Otto e Diesel. Esses ciclos têm por objetivo representar as transformações dos fluidos, que são determinadas pela temperatura, pressão e volume, sendo que dois destes são escolhidos para serem controlados, dependendo do processo. No caso de centrais termelétricas o controle dos fluidos é feito de acordo com a variação de temperatura e pressão. Os rendimentos elétricos dos ciclos variam de 20% a 50%, aumentando na seguinte ordem: Rankine, Brayton e Ciclo Combinado. O rendimento do ciclo aumenta também com o aumento da potência. Para se entender a cogeração é necessário conhecer-se um pouco de cada ciclo, sendo que o modo mais convencional de geração de energia térmica é o ciclo Rankine.

a) *Ciclo Rankine:* neste ciclo é utilizado o calor proveniente da queima de combustíveis para geração de vapor numa caldeira ou gerador de vapor. A energia térmica gerada pode ser utilizada para calor de processo e para geração de energia

elétrica em um gerador elétrico acionado por uma turbina a vapor. O rendimento térmico máximo deste processo é de aproximadamente 30%, ou seja, 1/3 da energia do combustível pode ser convertido em energia térmica. As figuras 8 e 9 ilustram o ciclo Rankine convencional e o ciclo Rankine com cogeração.



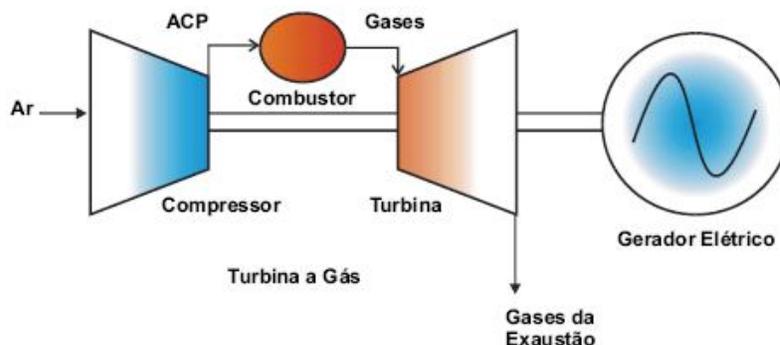
**Figura 8:** Ciclo Rankine convencional.  
Fonte: Pellegrini (2009).



**Figura 9:** Ciclo Rankine com cogeração.  
Fonte: Pellegrini (2009).

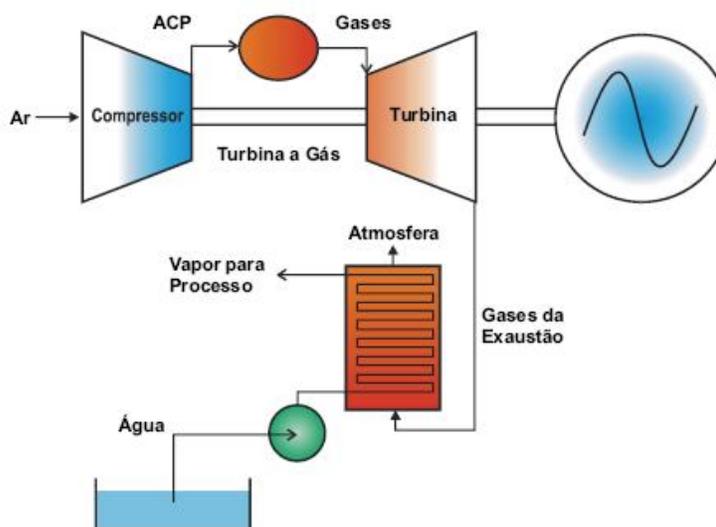
*b) Ciclo Brayton:* é o ciclo de turbinas a gás. Vem se tornando um método cada vez mais utilizado para geração de energia. Neste tipo de máquina, ilustrado na figura 10, o ar atmosférico é continuamente succionado pelo compressor, onde é comprimido para alta pressão. O ar comprimido entra na câmara de combustão (ou combustor), é misturado ao combustível e ocorre a combustão, resultando em gases com alta temperatura. Os gases provenientes da combustão se expandem através da turbina e se descarregam na atmosfera. Parte do trabalho desenvolvido pela

turbina é usado para acionar o compressor, o restante é utilizado para acionar um gerador elétrico ou um dispositivo mecânico. Este tipo de ciclo é chamado de ciclo Brayton simples e aberto, podendo existir variações.



**Figura 10:** Ciclo Brayton aberto e simples.  
Fonte: Pellegrini (2009).

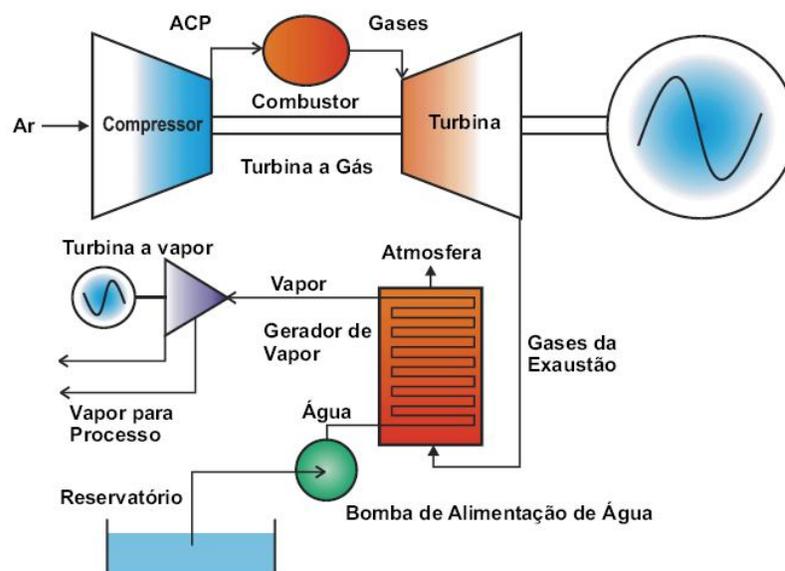
O rendimento térmico do Ciclo Brayton é de aproximadamente 35%, mas, atualmente existem turbinas que atingem um rendimento de 41,9%. A cogeração neste ciclo é obtida através da adição ao ciclo de uma caldeira de recuperação de calor, conforme indicado na figura 11. Neste caso, os gases de exaustão da turbina são direcionados para a caldeira, de modo a gerar vapor. Este vapor é então utilizado no processo industrial.



**Figura 11:** Ciclo Brayton com cogeração.  
Fonte: Pellegrini (2009).

Este é o ciclo proposto para a utilização do gás natural na maioria dos sistemas de cogeração atuais que tem como combustível o gás natural. Esta é a tendência atual no Brasil, em plantas nas quais o consumo de vapor é muito elevado, como nas indústrias de papel e celulose e químicas.

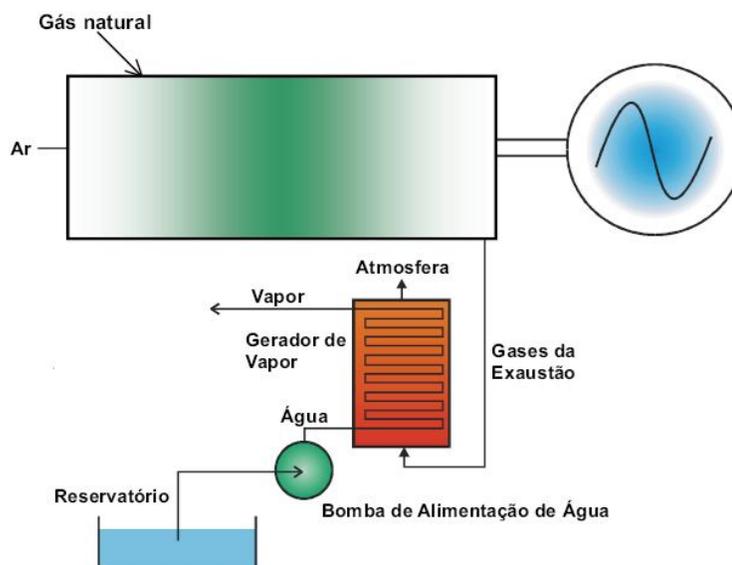
*b) Ciclo Combinado:* Neste sistema são utilizados dois ciclos de potência, o ciclo Brayton e o Rankine. A figura 12 ilustra o ciclo combinado. Neste tipo de arranjo, o calor liberado por um ciclo é usado parcial ou totalmente como entrada de calor para o outro ciclo. No caso de geração de energia elétrica, através do ciclo combinado gas-vapor (Brayton- Rankine), os gases de exaustão da turbina a gás estão numa temperatura relativamente alta, normalmente entre 450 e 550°C. Deste modo, o fluxo de gás quente pode ser utilizado numa caldeira de recuperação de calor para geração de vapor, que serve como fluido de trabalho para o acionamento de uma turbina a vapor, gerando um adicional de energia. Portanto, o ciclo combinado tem uma eficiência térmica maior que a dos ciclos Rankine e Brayton separadamente. Este tipo de processo de cogeração é a melhor opção para as aplicações nas quais a demanda de eletricidade é superior à demanda de vapor, ou seja nas indústrias eletrointensivas.



**Figura 12:** Ciclo Combinado com cogeração.  
Fonte: Pellegrini (2009).

b) *Ciclo Otto e Diesel*: O ciclo Otto e Diesel são utilizados em motores para a geração de energia (grupos geradores). Neste tipo de equipamento, o combustível é misturado ao ar atmosférico numa câmara, onde ocorre a combustão. O trabalho desenvolvido pelo motor é usado para acionar um gerador elétrico. A diferença básica entre o ciclo Otto e Diesel está na forma em que ocorre a combustão do combustível. No ciclo Diesel, a combustão ocorre pela compressão do combustível na câmara de combustão, enquanto no ciclo Otto, a combustão ocorre pela explosão do combustível através de uma fagulha na câmara de combustão. O rendimento térmico do ciclo Otto e Diesel é de aproximadamente 40%. A cogeração nestes ciclos é obtida através da adição ao ciclo de uma caldeira de recuperação de calor. Neste caso, os gases de exaustão do motor são direcionados para a caldeira, de modo a gerar vapor ou aquecer fluido térmico e água. Este vapor, fluido térmico e água aquecidos são então utilizados no processo industrial.

Para a utilização de gás natural como combustível, o ciclo recomendável é o ciclo Otto. No entanto, pode-se utilizar o gás natural em equipamentos de ciclo Diesel desde que o combustível inserido na câmara de combustão seja uma mistura de gás natural com 3~5% de diesel. Este equipamentos são conhecidos como bi-fuel ou dual-fuel, em função do modo em que é executada a mistura dos combustíveis. A figura 13 ilustra este tipo de ciclo.



**Figura 13:** Motor com cogeração.  
Fonte: Pellegrini (2009).

Dominar completamente as necessidades energéticas de um processo produtivo, incluindo-se os aspectos tanto qualitativos quanto os quantitativos, é fundamental para se obter a adequada integração entre os sistemas consumidores de energia e uma planta de cogeração. Segundo Lozano (1998), existe uma integração íntima entre o processo consumidor de energia e a instalação de cogeração adotada. As quantidades de trabalho mecânico, energia elétrica, calor ou frio requeridos pelo processo produtivo são o ponto de partida para o dimensionamento dos equipamentos da instalação de cogeração. Portanto, a utilização da tecnologia de cogeração requer um grau elevado de conciliação entre os processos consumidores de energia e o sistema gerador, sob pena de se alcançar eficiências satisfatórias, caso esta integração não se realize com o devido rigor.

Ainda de acordo com o mesmo autor, embora contenha em seu princípio a racionalidade energética, a tecnologia de cogeração não é uma garantia de eficiência, como verificado nos atuais sistemas de cogeração *topping* a vapor em contrapressão. Para se avaliar o sucesso de uma instalação dessa natureza se faz necessário não só escolher a melhor combinação de equipamentos para a unidade cogeneradora, mas também elevar os padrões de eficiência e racionalidade energética do processo consumidor de energia.

#### **4.7 Cogeração no setor sucro-energético**

Anualmente o setor sucroalcooleiro movimenta cerca de R\$ 90 bilhões em vendas nos diversos elos que compõem o sistema de produção agroindustrial da cana, representando aproximadamente 4% do PIB nacional. Em 2010, o país produziu pouco mais de 590 milhões de toneladas de cana, sendo 56% destinados à produção de etanol. As exportações brasileiras de açúcar atingiram 24 milhões de toneladas, enquanto o etanol chegou a 1,8 milhão de toneladas (UNICA, 2011).

Este cenário de competitividade da produção da cana e de seus derivados, em parte é explicado pela auto-suficiência energética das usinas brasileiras, o que contribui para manter custos de produção relativamente baixos, adicionando-se ainda a flexibilidade de incremento de receita via venda de energia elétrica decorrente da reutilização da biomassa. A participação da biomassa na matriz energética nacional é importante não somente pela diversificação entre

fontes, mas também pela safra coincidente com o período de estiagem na região Sudeste/Centro-Oeste, onde está concentrada a maior potência instalada em hidrelétricas do país. A eletricidade fornecida neste período possui potencial para auxiliar na preservação dos níveis dos reservatórios das hidrelétricas, atuando assim de forma a complementar a oferta de energia ao Sistema Interligado Nacional (Barja., 2006).

De forma bem sucinta, o processo de produção de uma usina típica de açúcar e álcool pode ser resumido da seguinte forma: primeiramente a cana é cortada, por corte mecanizado ou manual (o corte manual está em vias de ser extinto, mais de 90% do corte já é mecanizado no Brasil), e transportada até a unidade de produção. Podem ser usados caminhões de até 45 toneladas de capacidade de carga, que percorrem distâncias de até 30 km da usina produtora. O primeiro passo é a passagem pela balança para aferir a quantidade de cana-de-açúcar em cada caminhão e para controle do volume de matéria-prima que será processada; na sequência ocorre uma retirada de amostra para medir o teor de sacarose, a porcentagem de sólidos solúveis e o teor de fibra; então a cana é descarregada na mesa alimentadora para a lavagem a seco ou com água; o quarto passo do processo é o preparo da cana nos picadores e desfibradores (visa a abertura das células da cana); em seguida ocorre a extração do caldo da cana, que pode ser por dois processos, moagem (97% de extração) e difusor (98% de extração). O passo seguinte do processo é a filtração, limpeza e decantação do caldo, para a retirada de impurezas; enquanto que o próximo passo é a separação do caldo para fabricação de álcool nas destilarias e para a fabricação de açúcar.

O funcionamento de uma unidade de produção sucroalcooleira requer três tipos de energia: térmica, utilizada no cozimento do açúcar e/ou na destilação do álcool etílico; mecânica, utilizada, na maior parte das unidades para mover as moendas que, por um processo de desfibramento e compressão, retiram o caldo da cana, a sacarose nele presente; e a energia elétrica para a iluminação, funcionamento dos motores e bombas d'água que movimentam todo o sistema fabril (CONAB, 2011).

Segundo Gallinari (2013), a cogeração de energia a partir da queima do bagaço em caldeiras, resultando na produção das energias mecânica e térmica, não é fato recente no contexto sucroalcooleiro. Porém, nem sempre foi prioridade a eficiência, mas sim a necessidade: a preocupação sempre foi em produzir energia

necessária para abastecer parte ou a totalidade da demanda energética da usina e não o máximo aproveitamento do combustível (bagaço) para geração de energias. Para Escobar (2003) o acionamento de caldeiras em usinas através da queima do bagaço tem sido utilizado há muito tempo, mas foram necessárias as crises energéticas do sistema interligado para que se cogitasse o uso do bagaço da cana como combustível. Até alguns anos atrás, o bagaço era tratado como resíduo industrial, e era incinerado para produzir vapor.

A mudança de pensamento dos gestores do setor e a consequente evolução do mesmo se deu a partir do racionamento de energia em 2001, em que o governo brasileiro implementou novas regras no mercado de energia elétrica. Este fato foi importantíssimo para impulsionar o setor sucroalcooleiro a investir na modernização de seus parques industriais, com o objetivo de torná-los mais eficientes e, assim, produzir e comercializar o excedente nos leilões de energia, em programas de incentivos como o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia – PROINFA, ou até mesmo no mercado livre (FIOMARI, 2004).

Grande parte das usinas convencionais sofreram mudanças a fim de se tornarem aptas a garantir maior eficiência no processo de cogeração, porém, nem toda modificação a fim de se obter excedente de energia é viável e uma série de fatores devem ser levados em conta. Sendo assim, ao considerar que uma usina convencional com equipamentos ultrapassados e instalações típicas do setor sucroalcooleiro, que utiliza para queima do bagaço caldeiras com baixo aproveitamento térmico, baixa pressão e baixa eficiência, não consegue obter excedente de energia térmica, modificações que demandam um alto investimento financeiro são necessárias e, então, uma avaliação de custo-benefício deve ser feita com a finalidade de analisar as condições técnicas, econômicas e legais. Portanto, uma usina que exporta excedente de energia se caracteriza por possuir equipamentos de tecnologia de alta eficiência, uma produção de açúcar e álcool que demande uma quantidade suficiente de bagaço para gerar excedente de energia no período de safra e no período de parada e início da próxima safra, admissão legal das atividades de exportação e ou importação de energia por um órgão regulatório e poder econômico para realização das modificações necessárias (GALLINARI, 2013).

Conforme já exposto, uma planta de cogeração que utiliza como combustível o bagaço da cana-de-açúcar demanda a instalação de uma série de equipamentos. O principal sistema de cogeração no setor sucroalcooleiro utiliza

turbinas a vapor como máquinas térmicas vinculado a três configurações fundamentais: turbinas de contrapressão, combinação de turbinas de contrapressão com outras de condensação que empregam o fluxo excedente e turbinas de extração-condensação. A condensação de uma parte do vapor de escape, ou de uma extração de vapor de uma turbina de extração-condensação, garante as necessidades de energia térmica do sistema (FIOMARI, 2004). Ainda de acordo com o mesmo autor, em usinas que tenham o objetivo de comercializar energia excedente, torna-se necessário o uso de turbinas de extração-condensação, que apresentam altos índices de desempenho. Tais máquinas de condensação com extração regulada justificam-se também pela sua capacidade de satisfazer a relação energia térmica / elétrica que pode variar em uma ampla faixa.

Este sistema, com maior capacidade de produção de energia elétrica, possui normalmente turbinas de extração dupla, sendo que a primeira trabalha no nível de pressão em que o vapor é requerido pelas turbinas de acionamento mecânico, e a segunda, na pressão em que o vapor é consumido no processo produtivo. Sendo assim, uma usina que tem a finalidade de obter excedentes de energia elétrica, deve investir em tecnologia, aumento da eficiência dos equipamentos industriais, redução no consumo de vapor, maior eficiência na queima do combustível (bagaço, palha) através de caldeiras de alta pressão e também na obtenção de uma matéria-prima com características favoráveis, como o teor de fibra do bagaço da cana-de-açúcar (GALLINARI, 2013).

Entre os vários sistemas que compõem uma unidade termelétrica movida a bagaço de cana-de-açúcar destacam-se: caldeiras de alta pressão, turbinas, geradores elétricos, subestação elevatória e sistemas de transmissão de energia.

A caldeira, exemplificada na figura 14, é o equipamento conhecido como gerador de vapor, pois fornece o vapor necessário para movimentação das palhetas da turbina.



**Figura 14:** Exemplo de caldeira de alta pressão.

Fonte: [www.gemea.com.br/eventos](http://www.gemea.com.br/eventos), acessado em 10 de dezembro de 2013.

Esta turbina é acoplada a um gerador, ambos ilustrados na figura 15, onde será produzida a energia elétrica em média tensão. O excedente de energia gerado, destinado à venda é encaminhado a uma subestação (figura 16), onde geralmente ocorre uma elevação da tensão de 13,8 kV para 138 kV, 69 kV ou ainda 34,5 kV (menos usual), para ser encaminhado por uma linha de transmissão até o ponto de conexão, onde passará a fazer parte do Sistema Interligado Nacional – SIN. Esta conexão pode ser através de um seccionamento de linha de transmissão, conexão radial em outra subestação, ou mesmo uma derivação em alguma linha de transmissão (QUEIROZ, 2008).



**Figura 15:** Exemplo de um conjunto turbo-gerador.

Fonte: <http://www.dsempral.com.br/processo+geracao+de+energia.html>, acessado em 11 de dezembro de 2013.



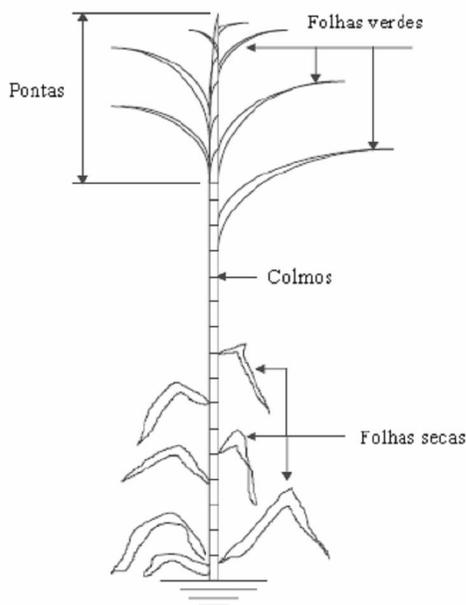
**Figura 16:** Exemplo de uma subestação elevatória de tensão.

Fonte: [www.historico.aen.pr.gov.br/](http://www.historico.aen.pr.gov.br/), acessado em 12 de dezembro de 2013.

Gallinari (2013) afirma que, ainda faz parte desta composição uma série de conjuntos periféricos, que vão desde a alimentação da caldeira com o combustível (bagaço de cana), até o sistema de refrigeração dos mancais do turbogerador, sistema captação de água, desaerador, entre outros. Um fator importante que tem sido utilizado por muitas usinas é a substituição de turbinas a vapor por motores elétricos nos sistemas de moagem, devido ao ganho direto de potencial de cogeração.

#### **4.8 Implementação do uso do palhiço da cana-de-açúcar como parte do combustível para a cogeração**

De acordo com Ripoli et al. (1990), o nome correto para este resíduo da colheita da cana-de-açúcar, sem queima prévia, é palhiço e não palha. O palhiço não se constitui apenas de folhas de cana com baixo grau de umidade, mas sim de folhas verdes, palhas, ponteiros, colmos ou suas frações e rebolos ou suas frações, com terra a eles agregados. A figura 17 ilustra as partes componentes do vegetal cana-de-açúcar.



**Figura 13:** Partes contituíntes da cana-de açúcar.

Fonte: Hassuani et al. (2005).

A colheita mecanizada da cana crua apresenta como característica marcante a grande quantidade de resíduos (palhiço) que ficam sobre o solo após este procedimento. Durante o crescimento da cana-de-açúcar, crescem também as folhas e as pontas, que sempre foram descartadas (através da queima pré-colheita), pois não se vislumbrava sua utilidade. Atualmente, a queima da cana-de-açúcar antes do corte vem sendo abolida e substituída pela colheita mecanizada. Pela lei estadual nº 11.241, de 2002, do Estado de São Paulo, até 2021 será proibida a queima do palhiço na área mecanizável e até 2031 na área não mecanizável (DANTAS, 2010). Entretanto, o governo do Estado assinou um Protocolo Agroambiental com o compromisso de antecipar a extinção da queima até 2014 na área mecanizável e até 2017 nas áreas onde não é possível o trabalho com máquinas. Com o cumprimento do protocolo haverá grande quantidade de palhiço disponível, que antes era queimado e poderá ser usado como combustível, bastando apenas um estudo mais completo de viabilidade e adequação dos equipamentos rurais e industriais.

Para Hassuani et al. (2005), o palhiço deixado no campo traz vários benefícios, tais como: proteção do solo contra a erosão, menor temperatura do solo devido a proteção da radiação solar, aumento da atividade biológica do solo, maior

taxa de infiltração de água no solo, redução da evaporação e conseqüente aumento na disponibilidade de água, controle de plantas daninhas e redução e/ou eliminação do uso de herbicidas. Ainda de acordo com o mesmo autor, da mesma forma há também alguns problemas relacionados à presença do palhiço no campo: riscos de incêndio durante e após a colheita, problemas na realização do cultivo e adubação das soqueiras, retardamento ou falhas na brotação causando redução da produtividade quando a temperatura do solo é baixa e/ou a umidade é alta, elevação da população de pragas devido ao cobertor de palhiço, onde elas se abrigam e se multiplicam.



**Figura 18:** Palhiço no campo após colheita da cana

Fonte: Siloni (2008).

De acordo com Ripoli et al. (1990), o palhiço que fica no campo após a colheita mecânica pode ser encontrado na ordem de 9 a 28 t.ha<sup>-1</sup> dependendo das condições da cultura. Este grande volume de palhiço deixado na lavoura, conforme exemplificado na figura 18, apresenta-se como uma grande fonte complementar de combustível para geração de energia elétrica, uma vez que sua combustão em caldeiras de alta pressão é realizado com eficácia no processo. Contudo, o problema que o setor está encontrando no momento é como recolher e transportar até a usina este volume de palhiço de forma economicamente viável. A principal dificuldade para se utilizar o palhiço para cogeração de energia é a questão logística. Muitos estudos estão sendo feitos no Brasil e no exterior, pois o poder calorífico do palhiço é bem superior ao do bagaço e a deterioração do palhiço na lavoura representa perdas de biomassa

e conseqüentemente perdas financeiras. A maioria das usinas já começou a estudar a viabilidade do transporte do palhiço da lavoura até a indústria, pois a dificuldade se encontra na retirada do palhiço do solo. Algumas usinas preferem enfardar o palhiço na forma cilíndrica e outras na forma de um quadrado, sendo que o objetivo é achar uma maneira em que o volume e a densidade dos fardos compensem o transporte.

Portanto, é uma tendência irreversível as usinas começarem a buscar formas de viabilizar o processo de retirada do palhiço do campo. O motivo é bastante simples: a matéria-prima interessa aos canavieiros e usineiros, pois o equivalente energético do palhiço gira em torno de 1,2 barris de petróleo por tonelada de material. Dependendo da cultura da cana, da variedade plantada, idade e condições edafoclimáticas, um hectare de canavial pode oferecer entre 11 e 33 equivalentes de barris de petróleo (MELLO, 2009).

#### **4.9 Aspectos ambientais e sócio-econômicos da cogeração**

Com a revolução industrial surgiu a economia concentrada de energia e de matéria-prima, também chamada de economia fóssil. Segundo Ferrão (2001), a economia mundial fóssil possui três características centrais. Em primeiro lugar, os recursos fósseis são esgotáveis. Em segundo lugar, as emissões resultantes da transformação da energia fóssil levaram a uma crise ecológica mundial, que com o passar do tempo está se tornando cada vez mais grave. Mesmo que existissem mais recursos fósseis, somente a queima das reservas conhecidas atualmente põe em perigo a base existencial humana. Em terceiro lugar, as reservas dos recursos fósseis concentram-se apenas em poucos lugares da Terra sendo, porém, que eles são necessários em toda parte onde as pessoas vivem e trabalham. Por isso, a extração destes recursos é feita de maneira central e com a ajuda de empresas concentradas, no contexto de uma cadeia de economia global, sendo que, ao contrário disto, o consumo é descentralizado. Em outras palavras, a sociedade se vê completamente dependente destes recursos não-renováveis.

O padrão de desenvolvimento econômico adotado pelas nações, baseado na utilização de combustíveis fósseis, tem intensificado o efeito estufa atmosférico. O efeito estufa é um fenômeno natural, ou seja, existe na natureza, independentemente da ação do homem e do sistema econômico. Ele é causado pela presença de determinados gases na atmosfera terrestre que, por este

motivo, são chamados de Gases de Efeito Estufa (ROCHA, 2004). No entanto, sabe-se que a presença atmosférica destes gases – medida em termos de concentração – vem aumentando devido a determinadas atividades econômicas e industriais.

Uma vez que podemos gerar energia elétrica de várias formas e sob várias situações, existe uma grande variedade de fatores condicionantes que são importantes na avaliação dos impactos associados à geração de energia elétrica, e posterior valoração. Ainda de acordo com Rocha (2004), dependendo da especificação destes fatores são obtidos impactos completamente diferentes. Assim, para avaliação dos efeitos de um determinado projeto de geração de energia elétrica devem ser considerados e definidos de forma clara: a localização da planta de geração, a localização das atividades de suporte, as tecnologias utilizadas, o tipo de combustível utilizado e a fonte e composição do combustível usado. Outro aspecto a ser considerado na avaliação e valoração dos impactos é sob que atividade ou parte do processo focaremos nossa análise. É comum para alguns projetos de geração de eletricidade a análise ser focada somente na operação da planta de geração, contudo, uma avaliação completa dos danos ao longo do processo deve contabilizar todos os potenciais efeitos do ciclo do combustível, utilizando a análise do ciclo de vida do combustível, que passa por uma série de outras atividades além daquelas diretamente relacionadas a operação da planta de geração.

Os muitos benefícios da cogeração sobre formas convencionais de produção de energia estão somente agora sendo reconhecidas pelos órgãos reguladores (FERRÃO, 2001). Um deles está relacionado ao fato de poder utilizar biomassa como fonte de energia, tornando o sistema uma fonte renovável de energia, e fazendo com que se quebre aos poucos a dependência que o setor energético mundial possui em relação aos combustíveis fósseis, ajudando a resolver dois dos mais importantes desafios do momento:

a) Geração descentralizada de energia: o número de pessoas no mundo sem suprimento de energia está crescendo a cada dia. Muitas destas pessoas vivem em comunidades rurais onde soluções descentralizadas de energia oferecem a melhor maneira de solucionar este problema já que elimina a necessidade do uso de longas linhas de transmissão. Sistemas centralizados não podem oferecer as soluções necessárias para este desafio. Este é apenas um pequeno exemplo do impacto social e econômico da geração descentralizada de energia, e de como se pode suprir a necessidade de muitas comunidades de possuir eletricidade, a qual

muitas vezes não é fornecida pelas empresas de distribuição de energia por não ser um negócio economicamente viável.

b) Impacto Ambiental: o dióxido de carbono – na sua maioria proveniente da queima de combustíveis fósseis – metano e outros gases atuam no chamado efeito estufa, deixando o calor passar pela atmosfera na forma de radiação solar e evitando que o calor escape para o espaço, causando o aquecimento global. Este fenômeno pode ter um enorme impacto social e ambiental pelo resultado da inundação de áreas costeiras devido a elevação do nível do mar, secas e inundações mais severas e mudanças na produtividade da agricultura. Chuva ácida, diminuição da camada de ozônio e outros resultados da poluição resultante da queima de combustíveis fósseis são problemas significantes e estão sendo cada vez mais uma preocupação pública. Sistemas localizados produzem energia onde é necessário e parecem ser uma das tecnologias de menor impacto ambiental disponível atualmente. Sistemas de cogeração diminuem as emissões de gases devido a sua alta eficiência energética e efetivos sistemas de controle de emissão de gases.

Nas termelétricas os impactos estão predominantemente ligados às emissões atmosféricas, e devido à modularidade dos processos, é possível para vários casos utilizar os resultados obtidos em estudos prévios para estimar os impactos de novos projetos, que tenham o mesmo tipo de combustível, e mesmas tecnologias de transporte, beneficiamento e geração. De acordo com Reis (2001), as emissões de uma termelétrica dependem do tipo de combustível utilizado, da fonte e composição do combustível utilizado e das tecnologias utilizadas para transporte, tratamento e geração. As emissões primárias em uma termelétrica são CO<sub>2</sub>, o CH<sub>4</sub>, o N<sub>2</sub>O, os NO<sub>x</sub>, e quantidades de materiais particulados, SO<sub>x</sub>, CO, outros orgânicos voláteis, cloro e traços de metais.

Ainda de acordo com Ferrão (2001), com o pretexto de que o estado deve redefinir o seu papel em prol do desenvolvimento do país, este estado que até então era um grande empreendedor passa a ser visto como um promotor do desenvolvimento socioeconômico do país, com direcionamento das suas ações preferencialmente para áreas sociais e abertura de espaço para a iniciativa privada nos setores de infra-estrutura.

Com relação às barreiras econômicas, há a questão dos custos elevados envolvidos na implementação dos projetos que, em muitos casos, são grandes, o que requer a

participação dos agentes financeiros. Entretanto estes agentes não mostram interesse em investir e/ou financiar tais projetos (COELHO, 1999), e ainda hoje isso acontece. Há falta de investimento na inovação, o que poderá comprometer a posição do Brasil no mercado mundial de energia.

Em resumo, o uso da biomassa para a geração de eletricidade tem sido objeto de vários estudos e aplicações, tanto em países desenvolvidos como em países em desenvolvimento. Entre outras razões, estão a busca de fontes mais competitivas de geração e a necessidade de redução das emissões de dióxido de carbono. Do ponto de vista técnico-econômico, os principais entraves ao maior uso da biomassa na geração de energia elétrica são a baixa eficiência termodinâmica das plantas e os custos relativamente altos de produção e transporte. De um modo mais genérico, incluindo aspectos socioambientais, verifica-se a necessidade de maior gerenciamento do uso e ocupação do solo, devido à falta de regularidade no suprimento (sazonalidades da produção), criação de monoculturas, perda de biodiversidade, uso intensivo de defensivos agrícolas etc. Cortez, 1999 afirma que esses entraves tendem a ser contornados, a médio e longo prazos, pelo desenvolvimento, aplicação e aprimoramento de novas e eficientes tecnologias de conversão energética da biomassa e por meio dos incentivos instituídos pelas políticas do setor elétrico. Além de ambientalmente favorável, o aproveitamento energético e racional da biomassa tende a promover o desenvolvimento de regiões menos favorecidas economicamente, por meio da criação de empregos e da geração de receita, reduzindo o problema do êxodo rural e a dependência externa de energia, em função da sua disponibilidade local.

#### **4.10 O setor elétrico brasileiro**

O consumo de energia tem crescido intensamente nas últimas décadas. Este fato pode ser explicado pela modernização da agricultura, pelo aumento da expansão demográfica e, conseqüentemente, ao aumento da capacidade de consumo da população com a elevação dos níveis de conforto. Em função desse elevado crescimento no consumo e do desenvolvimento sócio-econômico, tem-se uma grande dificuldade para atender à pressão da demanda por energia, o que deixa o país em uma situação de crise (AMBROSI, 1993).

Para se entender melhor as razões dessa crise atual, é necessário fazer uma análise histórica do setor elétrico brasileiro. Esse setor era predominantemente proveniente de capital privado. Foi nas décadas de 40 e 50 que passou a ser essencialmente estatal (COELHO, 1999). Porém, foi somente em 1961 (durante os governos militares), com a criação das Centrais Elétricas Brasileiras S.A. (ELETROBRÁS), que o modelo estatal foi consolidado. O objetivo da Eletrobrás era o de promover estudos e projetos de construção e operação de usinas geradoras, linhas de transmissão e subestações, destinadas ao suprimento do país (CORRÊA NETO, 2001).

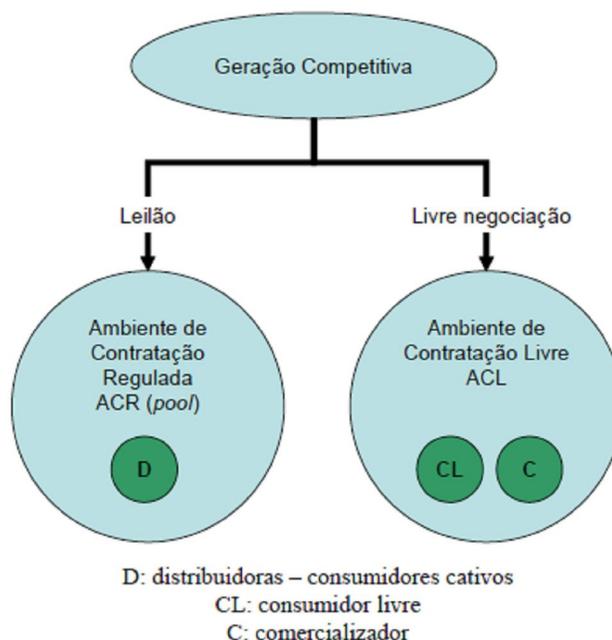
Segundo Goldemberg (2000), na década de 70, houve uma crise energética devido às altas taxas de juros em consequência da crise do petróleo. É nesse contexto que a procura por outras fontes de energia cresceu, principalmente da energia das hidrelétricas e nas agroindústrias sucroalcooleiras, tanto no programa do pró-álcool, como pelo uso do bagaço da cana. Em 1991, o Governo Federal apresentou uma proposta de reestruturação do setor elétrico que introduziu várias alterações na legislação. Dessa forma, abriu-se espaço para a geração descentralizada da energia, ou seja, a participação do autoprodutor e do produtor independente de energia (COELHO, 1999). Entretanto, Corrêa Neto (2001) afirma que, foi somente em 1995 que a figura do produtor independente foi reconhecida. A partir deste marco as oportunidades se abriram para a comercialização de energia elétrica por cogeração em sistemas de gaseificação de biomassa.

Em 2001, a crise no setor elétrico e o plano de racionamento mostraram a necessidade de diversificar as fontes de energia e é nesse contexto que surgiu o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA), com o objetivo principal de promover o incentivo à geração de energia elétrica a partir de fontes renováveis (SILVA, 2003).

Apesar dessas novas oportunidades que se abriram, a cogeração de energia era vista com reserva, já que o setor elétrico sempre privilegiou a energia hidráulica e as concessionárias viram na cogeração uma “perda de poder”. Para encobrir o real interesse em não estimular o setor sucroalcooleiro a produzir excedente, as concessionárias tiraram proveito do fato de a geração de eletricidade ocorrer somente nas épocas de safra. Na verdade, como explica Coelho (1999), isso é uma vantagem, já que a safra ocorre justamente na época de seca, quando a oferta de energia hidráulica apresenta maiores dificuldades.

Durante os anos de 2003 e 2004, o Governo Federal lançou bases de aprimoramento do modelo para o Setor Elétrico Brasileiro, sustentado pela Lei nº 10.848, de 15 de março de 2004 e pelo Decreto nº 5.163, de 30 de julho de 2004. Em termos institucionais, o novo modelo definiu a criação da Empresa de Pesquisa Energética – EPE como responsável pelo planejamento do setor elétrico a longo prazo, do Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico – CMSE com a função de avaliar permanentemente a segurança do suprimento de energia elétrica e da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE. Neste cenário, então, foi criada em 26 de dezembro de 2006 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), cuja missão é garantir condições favoráveis para que o mercado de energia elétrica se desenvolva com equilíbrio entre os agentes em benefício da sociedade (ANEEL, 2010).

Em relação à comercialização de energia, foram instituídos dois ambientes para celebração de contratos de compra e venda de energia: o Ambiente de Contratação Regulado (ACR), onde a energia pode ser vendida através de contratos de longo prazo garantidos pelo governo, permitindo aos investidores assegurar o financiamento para novos projetos de geração. Paralelamente foi criado o Ambiente de Contratação Livre (ACL), permitindo geradores, distribuidores e empresas com consumo significativo de energia, possam negociar livremente contratos bilaterais regulados pela ANEEL, através de leilões de compra e venda de energia elétrica viabilizados pela CCEE. A figura 19 ilustra as modalidades de comercialização de energia elétrica. Esses contratos são celebrados entre agentes vendedores (comercializadores, geradores, produtores independentes ou autoprodutores) e compradores (distribuidores). A CCEE também é responsável por registrar os montantes de energia medida, gerada, vendida, consumida e contratada, fazendo um balanço da energia entre os agentes. As diferenças contabilizadas são liquidadas no Mercado de Curto Prazo e integradas ao cálculo do Preço de Liquidação das Diferenças – PLD. O PLD é determinado semanalmente pela CCEE e seu valor tem como base o Custo Marginal de Operação (CMO) informado pelo Operador Nacional do Sistema (ONS), que considera as previsões de disponibilidade e demanda para a semana subsequente, dentro de um limite de preço máximo e mínimo definidos para cada submercado e estipulados anualmente pela ANEEL.



**Figura 23:** Ambiente de contratação.

Fonte: Barja, 2006.

Analisando tecnicamente o sistema elétrico brasileiro, verifica-se que ele é segmentado em sistema interligado e sistemas isolados, sendo que o sistema interligado, devido a diversidades regionais e grande extensão territorial do país é dividido em dois subsistemas: Sul/Sudeste/Centro-Oeste e Norte/Nordeste, haja vista a capacidade instalada. O primeiro subsistema tem uma maior importância, fato que se atribui em parte ao desenvolvimento econômico das regiões e pelo fato da usina hidrelétrica de Itaipu estar conectada ao subsistema. Os sistemas isolados concentram-se em grande parte na região norte com predominância de geração de energia elétrica por termoelétrica, fato totalmente contrário ao sistema interligado, que tem sua energia predominantemente gerada por usinas hidráulicas. Segundo o Boletim Informativo do Ministério de Minas e Energia com dados referentes até a abril de 2013, o sistema elétrico brasileiro apresentava uma capacidade instalada de 114.229 MW, sendo que 71,04% dessa energia têm como fonte usinas hidroelétricas e apenas 7,02% tendo como fonte usinas de biomassa.

Outros elementos integrantes do sistema elétrico – as redes elétricas – são classificadas em redes de distribuição e redes de transmissão. As redes de transmissão oriundas de tensões até 750 KV para interligação entre os grandes centros de carga e de produção formam a rede básica do Sistema Interligado

Nacional (SIN), que opera em tensão igual ou superior a 230 KV. Também fazem parte das redes de transmissão as Demais Instalações de Transmissão (DIT s), que são linhas disponibilizadas para os geradores e importadores e/ou exportadores de energia, em caráter exclusivo ou compartilhado, e para as distribuidoras, como instalações de âmbito próprio da distribuição (ANEEL, 2005). Considerando todas as linhas de transmissão existentes no Brasil, inclusive 550,6 km nos sistemas isolados, o país apresenta uma extensão de 101.144,2 km de extensão em linhas de transmissão (MME 2012).

Segundo Barja (2006), as redes de distribuição são exploradas por concessionárias de distribuição na prestação de serviço público de fornecimento de energia aos centros urbanos. Essas redes operam em média e baixa tensão que variam de 69 KV a 127 V.

#### **4.11 Comercialização do excedente da energia elétrica cogenerada pelas usinas de açúcar e álcool**

Clemente (2003) afirma que, na terminologia do setor elétrico uma usina sucroalcooleira pode se enquadrar como autoprodutor ou produtor independente de energia elétrica. O que diferencia um de outro é quantidade de energia gerada, pois se a energia gerada é o suficiente apenas para suprir parte ou a totalidade das necessidades das instalações industriais, essa usina se caracteriza como autoprodutor de energia elétrica, enquanto que nos casos em que a energia gerada excede as necessidades de consumo da planta industrial, podendo assim efetuar a venda dessa energia, a usina se caracteriza como produtor independente de energia elétrica. Ainda de acordo com o mesmo autor, embora a interligação da usina cogeneradora de energia seja feita com a concessionária ou permissionária mais próxima, a venda da energia cogenerada não é obrigatoriamente feita à concessionária ou permissionária em questão. Essa venda pode ser realizada entre a usina e terceiros, e em casos de potências elevadas superiores a 230 KV a comercialização é realizada com o sistema básico.

Portanto, a decisão da forma como a energia será comercializada é tomada de acordo com as garantias operacionais e econômicas dadas a usina para a condução das negociações. No que diz respeito às questões operacionais de acesso, o cuidado deve ser ainda maior. De acordo com Gallinari (2013), embasado

nas estimativas do GESEL (Grupo de Estudos do Setor Elétrico da UFRJ), cerca de 20% do preço da bioeletricidade gerada por uma usina de cana-de-açúcar (calculado com parâmetros de uma usina localizada no estado de São Paulo) está diretamente ligado aos custos de conexão à rede. Souza (2003) afirma que, para avaliar os custos da energia elétrica gerada em cogeração, deve-se primeiro ter conhecimento dos custos energéticos que participaram dessa operação assim como os custos para o deslocamento dessa energia. Ainda segundo o mesmo autor, outro fator importante é o tipo de ligação contratada com a distribuidora, ou seja, convencional, azul e verde e a classe de tensão. A resolução normativa da ANEEL nº456 de 29 de novembro de 2000 assim define:

- a) tarifa convencional: tarifa aplicada ao consumo de energia, e/ou demanda de potência independentemente das horas de utilização do dia e dos períodos do ano.
- b) tarifa verde: tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de uma única tarifa de demanda de potência.
- c) tarifa azul: tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, bem como de tarifas diferenciadas de demanda de potência de acordo com as horas de utilização do dia.

A usina sucroalcooleira (termelétrica) atuante como produtora independente de energia elétrica pode efetuar a venda a um consumidor livre, como relatado anteriormente, onde o preço é acordado livremente entre as partes envolvidas mediante um contrato. Embora o preço da energia nesse tipo de negociação seja acordado livremente entre as partes, deve ser pago o uso dos sistemas de transmissão e distribuição ao Operador Nacional do Sistema – ONS e à concessionária de distribuição. Nessa modalidade de venda, é aplicado o ICMS. Também como já citado, a outra forma de venda de energia que pode ser realizada pela usina é a venda a terceiros através de um comercializador, o que inicialmente parece não ser muito atrativo tendo em vista os custos adicionais. Essa modalidade torna-se atraente quando observado que ao optar por essa forma de comercialização tem-se uma redução de custos e encargos comerciais, além de se evitar algumas burocracias e outros problemas relativos (CLEMENTE, 2003).

A energia cogorada também pode ser comercializada no mercado a longo ou curto prazo (mercado spot) e o preço reflete a lei de mercado da oferta e da procura. No Brasil a demanda de energia é maior em períodos secos, o que pode representar

uma vantagem competitiva para usinas sucroalcooleiras onde a safra coincide com o período de secas. A estratégia da usina pode ser traçada a fim de firmar acordos operacionais de socorro mútuo com outros geradores para evitar que tenha que recorrer ao mercado spot no caso de interrupções de fornecimento programadas ou aleatórias. (CLEMENTE, 2003).

Uma das maiores barreiras para a comercialização de excedentes de energia elétrica do setor sucroalcooleiro, entretanto, ainda é a questão tecnológica. A principal dificuldade refere-se ao fato de que a maior parte das usinas brasileiras utiliza caldeiras de média pressão (22 bar, 300 °C), apesar de estarem disponíveis comercialmente equipamentos mais eficientes (COELHO, 1999). Além disso, quanto aos custos de transporte da eletricidade, Souza (2003) afirma que os gastos com implantação (reforço), operação e manutenção das linhas de conexão com a rede pública e os respectivos encargos são de responsabilidade dos geradores, que neste caso são as usinas de açúcar e álcool.

Outro entrave que existe diz respeito à cultura do setor sucroalcooleiro, Coelho (1999) afirma que este setor apresenta uma postura conservadora, que encara ainda hoje com reservas, investimentos em cogeração. Por fim, há a barreira ambiental. Segundo Brighenti (2003), na queima do bagaço para geração termoelétrica, a principal consequência ambiental é a questão da poluição atmosférica, devido às emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) e a emissão de particulados através da combustão do bagaço nas caldeiras. Ainda de acordo com a mesma autora, em relação à Lei nº. 6938 de agosto de 1981, a construção, instalação, ampliação e funcionamento de qualquer estabelecimento ou atividade geradora de poluição, ou que explore os recursos naturais, só pode ocorrer após a obtenção da licença ambiental. E, para finalizar, menciona que para realizar este processo são necessárias três licenças: a Licença Prévia (LP), a Licença de Instalação (LI) e a Licença de Operação (LO).

Sabe-se que entre todas as utilidades produzidas por uma usina sucoenergética, a única que permite seu consumo remoto a grandes distâncias é a energia elétrica. E por ser a única das utilidades com liberdade de comercialização, o mercado de energia elétrica evoluiu até hoje a um avançado estágio, ancorado por complexo sistema regulatório, que vem se desenvolvendo no país ao longo do tempo e encontra-se em constante transformação. Portanto, a confiabilidade e segurança com que a energia é entregue são de extrema importância, já que a

energia elétrica não pode ser estocada. Quando a usina, por algum problema técnico operacional ou por falta de planejamento, não tem energia para fornecer ao consumidor, obrigatoriamente deve honrar o contrato, tendo que recorrer ao mercado spot. Gallinari (2013) informa que, quando a falta de energia para venda definida em contrato acontece em período de escassez o custo dessa energia é muito elevado. Sendo assim as usinas, devem firmar acordos comerciais de energia que defendam os riscos técnicos, operacionais e comerciais.

#### **4.12 Panorama atual da cogeração no setor sucroenergético**

De acordo com dados da ANEEL (2012), em novembro de 2008 existiam 302 termelétricas movidas à biomassa no país, que correspondia a um total de 5,7 MW (megawatts) instalados. Dessas, 252 são usinas de cogeração movidas por bagaço decana. O número de usinas que vendem o seu excedente de energia ainda é baixo no Brasil, mas ainda assim essas unidades conseguiram ficar na segunda posição, com uma participação de 6,5%, apenas perdendo para a hidráulica. A participação atual das usinas termelétricas movidas exclusivamente a bagaço de cana chega a aproximadamente a 5,8%. De acordo com a UNICA (2012), o potencial energético da biomassa de cana de açúcar é enorme. Trata-se de energia limpa e renovável, com baixo investimento em equipamentos e linhas de transmissão e com tecnologia nacional.

Apesar do cenário cada vez mais favorável, existem ainda algumas barreiras que podem tornar a cogeração menos atrativa e viável para os usineiros: a tecnologia, o uso do bagaço para produzir álcool de segunda geração, a questão do preços de compra da energia gerada e as taxas impostas para se conectar com as redes de transmissão. Mesmo com o potencial de gerar, em 2014, o volume de energia equivalente ao gerado pela hidrelétrica de Itaipu, o uso do bagaço para gerar energia pode se tornar ainda mais subvalorizado se esses quatro aspectos apresentados não forem controlados.

O etanol celulósico, também conhecido como etanol de segunda geração (EG2), é uma nova tecnologia que vem sendo desenvolvida para a produção de álcool a partir do bagaço. Está previsto para 2014 o início da primeira planta industrial utilizando essa nova tecnologia. A partir de então será possível se ter uma real ideia da sua viabilidade, como concorrente da cogeração de energia a

partir do bagaço. Ferreira (2012) informa que essa nova tecnologia tem o potencial de aumentar a produção do álcool em 50% sem expandir a área de plantação da cana-de-açúcar. Para a expansão da cogeração por biomassa, a tecnologia capaz de gerar álcool a partir do bagaço se apresenta como uma barreira, pois desvia a matéria prima para utilização para outro fim. As principais questões a serem analisadas para o direcionamento da utilidade do bagaço são custo, demanda e necessidade. Em relação à necessidade e à demanda, o Laboratório Nacional de Ciência e Tecnologia do Bioetanol (CTBE) se sustenta nas seguintes realidades do mercado: (1) aumento da demanda do álcool hidratado, consequência do aumento da demanda por carro flex; (2) oscilação do preço do barril de petróleo; (3) expansão da exportação do etanol brasileiro, que é misturado a gasolina para diminuir a emissão de gases que causam o aumento do efeito estufa.

Quanto à questão tecnológica, como já citado, as principais melhorias passam pela substituição dos equipamentos obsoletos por outros mais modernos, de forma que se possa elevar os índices de eficiência, principalmente com a utilização de caldeiras de alta pressão e turbinas de condensação com extração.

O terceiro aspecto é quanto à fixação do preço médio da energia vendida. O preço de venda é o maior atrativo para os usineiros entrarem na atividade de produção e venda de energia elétrica. Como os investimentos iniciais para instalação de uma planta eficiente de cogeração são muito elevados, é necessário que o preço da energia vendida viabilize o negócio. O preço médio da energia vendida nos leilões realizados em 2008 foi de R\$ 154 por megawatt médio, em 2010 recuou para R\$ 144 e para R\$ 102 em 2011. Nesse contexto, em 2012 o segmento vendeu apenas 4% do ofertado no mercado regulado, ante participação média de 16% nos leilões realizados entre 2008 e 2010 (SANTOS, 2013). Os preços atrativos nos leilões exclusivos para biomassa de 2008 começaram a declinar principalmente porque o governo alterou as regras a partir de 2009 e passou a permitir a concorrência de outras fontes de energia, como a eólica. As usinas eólicas iniciaram sua participação na matriz energética nacional após a implantação do novo modelo do setor, em 2004 e foram impulsionadas pelo PROINFA. Um dos motivos que explicam os baixos preços pagos pela energia termelétrica e a consequente entrada da forte concorrência da energia eólica nos leilões é o não cumprimento da entrega de energia contratada em leilões anteriores pelo setor sucroalcooleiro. Um estudo divulgado pelo MME (2012) apontou que a quantidade de energia contratada

foi maior que a quantidade de energia gerada pelas usinas, colocando em questão a credibilidade das usinas em honrar seus compromissos.

O quarto aspecto refere-se ao alto custo de conexão do sistema de cogeração à rede. A tarifa cobrada é proporcional à potência demandada ou injetada no ponto de conexão, em MW, para a remuneração do custo de transporte de energia gerada ou consumida pela central e, também, conforme o ponto de conexão da central de cogeração ao sistema. A partir de 2002, a legislação determinou que os encargos setoriais de responsabilidade do “segmento consumo” passassem a ser incorporados nas tarifas de uso do sistema, juntamente com as perdas elétricas (ANEEL, 2005).

Pelo fato da venda de energia não ser uma especialidade dos produtores de açúcar e álcool, o que os atrai a investir nessa produção é a questão lucrativa e a viabilidade financeira. Por esse motivo e pelos mencionados anteriormente, as barreiras relacionadas com os investimentos comerciais em projetos de cogeração estão relacionadas principalmente aos riscos do projeto. A análise do projeto requer um tempo bastante grande para avaliar os riscos e garantir seu desenvolvimento (COELHO, 1999).

Nota-se atualmente um panorama em que o empresário do setor sucroalcooleiro enfrenta, além das dificuldades técnicas e econômicas já apresentadas, também uma falta de políticas governamentais claras no sentido de impulsionar o setor. Coelho (1999) afirma que, apesar da legislação em vigor aparentemente favorecer a cogeração de eletricidade no setor industrial, verifica-se que, na verdade, as normas e regulamentos (além das distorções tarifárias) parecem ainda não cumprir o seu papel de incentivar a viabilização de um maior potencial. O mesmo autor ainda complementa que, ao mesmo tempo, não se verificam no planejamento energético maiores distinções entre a cogeração e simplesmente a auto-produção, esta última correspondendo a uma tecnologia menos eficiente em termos energéticos. Desta forma a cogeração não recebe nenhuma vantagem especial, da mesma forma que também não é dispensado nenhum tratamento especial à esta fonte renovável de energia.

#### 4.13 Políticas de incentivos à cogeração

Alguns países como Estados Unidos, Holanda e Dinamarca implementaram uma série de políticas de incentivo a cogeração de energia com o objetivo de racionalizar a utilizar o uso de energia primária em virtude das crises de petróleo da década de 1970. Já no Brasil, outras alternativas foram adotadas em resposta a referida crise. Diante da crise energética, o Brasil focou seus investimentos em hidreletricidade, em geração termonuclear, na prospecção offshore de petróleo e no programa de incentivo ao álcool. Embora a este último se possa atribuir impacto indireto sobre a expansão da geração baseada no consumo de bagaço, não é lícito afirmar que a cogeração constitui historicamente uma estratégia nacional de conservação de energia (BASTOS, 2011).

Barja (2006) afirma que o Brasil iniciou a implementação de políticas de incentivo à cogeração no ano de 1996, quando o Decreto nº. 2.003 abriu de forma tímida a visão do governo perante a racionalidade energética trazida pela cogeração, permitindo ao cogerador a comercialização de energia elétrica junto aos integrantes de seu complexo industrial ou comercial, aos quais forneça vapor ou outro insumo oriundo de processo de cogeração, mesmo que este consumidor venha a ser cativo da concessionária de distribuição ou transmissão. A Resolução Nº 21 de 21 de janeiro de 2000 que trata dos requisitos necessários à qualificação de centrais cogedoras reconhece a necessidade de implementar políticas de incentivo ao uso racional dos recursos energéticos no País e, neste contexto, reconhece ainda que a atividade de cogeração de energia elétrica contribui com a racionalidade energética, uma vez que possibilita um melhor aproveitamento dos combustíveis. A Lei nº. 10.438/2002 institui um importante incentivo ao agente cogerador, considerando as tarifas geradas pelo transporte da energia na rede, regulamentada pela Resolução Normativa ANEEL nº. 77, de 18 de agosto de 2004, a qual teve seus artigos 1º e 3º modificados pela Resolução Normativa ANEEL nº 271, de 3 de julho de 2007, onde o artigo 1º “estabelece os procedimentos vinculados à redução das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição, aplicáveis aos empreendimentos hidrelétricos com potência igual ou inferior a 1.000 (mil) kW, para aqueles caracterizados como pequena central hidrelétrica e àqueles com base em fontes solar, eólica, biomassa

ou cogeração qualificada, conforme regulamentação da ANEEL, cuja potência injetada nos sistemas de transmissão e distribuição (TUST/TUSD) seja menor ou igual a 30.000 (trinta mil) kW, incidindo na produção e no consumo da energia comercializada pelos aproveitamentos”. Em seu artigo 2º fica estipulado o percentual de redução de 50% das tarifas de uso dos sistemas elétricos de transmissão e de distribuição incidindo na produção e no consumo da energia comercializada pelos empreendimentos a que se refere o artigo 1º. A alteração realizada no artigo 3º assegura direito a 100% de redução na TUST/TUSD para os empreendimentos referidos no artigo 1º que atendem condições estabelecidas nesta Resolução.

Barja (2006) descreve um importante incentivo dado às centrais termelétricas em geral, mas que é direcionado à cogeração por apresentar um critério de enquadramento muito exigente, foi instituído no âmbito da regulamentação do novo modelo do setor elétrico, pelo Decreto nº. 5.163/2004. Com a instituição do novo modelo, a compra de energia elétrica pelas concessionárias de distribuição ficou restrita a poucas opções, sendo uma delas a compra de eletricidade proveniente de empreendimentos de geração distribuída. Neste caso, estão incluídas as centrais termelétricas com eficiência energética superior a setenta e cinco por cento, o que só é alcançado por alguns empreendimentos de cogeração. É importante citar que as centrais termelétricas que utilizam biomassa como combustível gozam dos mesmos benefícios dados à cogeração qualificada. Neste sentido, as centrais de cogeração a biomassa não necessitam de submissão à ANEEL para participação junto a estes incentivos. Ainda segundo Barja (2006), além destes, podem ainda existir incentivos regionais aos empreendimentos de cogeração, como é o caso do Estado de São Paulo, que instituiu a prática de preços diferenciados de gás natural aos agentes cogeradores e isentando-os do pagamento mensal por disponibilidade.

Bastos (2011) aponta que, apesar de todos os esforços para alavancar o desenvolvimento da cogeração no Brasil, este setor ainda desperta baixo interesse econômico devido à existência de diversas barreiras, a começar pela instabilidade legal do setor elétrico, pelas baixas tarifas de venda da eletricidade e pela instabilidade da oferta de gás natural.

Apesar de não existirem linhas de crédito dedicadas exclusivamente à promoção da cogeração, a instituição no Brasil que oferece financiamento para o tipo de empreendimento aqui analisado a uma taxa de juros relativamente baixa

para a realidade brasileira é o Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social - BNDES. Este banco possui linhas de financiamento em três áreas de atuação (meio ambiente, infra-estrutura e indústria), onde projetos de cogeração de energia se enquadrariam (BASTOS, 2011).

Para a indústria e o meio ambiente destaca-se a linha de crédito de Apoio a Projetos de Eficiência Energética – PROESCO (BNDES, 2011). Segundo Bastos (2011), nesta linha de financiamento enquadram-se empreendimentos que comprovadamente 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. Para acessar esta linha de financiamento o empreendimento deve atender critérios socioambientais, como padrões de emissões atmosféricas.

Também merece destaque o Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica. Criado no âmbito do Ministério de Minas e Energia pela Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002, e revisado pela Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003. Tem como principais objetivos: alavancar os ganhos de escala, promover a aprendizagem tecnológica, promover competitividade industrial nos mercados interno e externo, identificação e a apropriação dos benefícios técnicos, e garantir a competitividade econômico-energética de projetos de geração que utilizem fontes limpas e sustentáveis. A meta desse programa prevê a instalação de 3.300 MW de capacidade, que serão incorporados ao SIN. Desse montante, 1.100 MW serão de fontes eólicas, 1.100 MW de pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) e 1.100 MW de projetos de biomassa. A energia produzida pelas unidades geradoras selecionadas será adquirida pela Centrais Elétricas Brasileiras S.A. Os contratos dos geradores com a Eletrobrás terão duração de 20 anos, contados a partir da entrada em operação (BASTOS, 2011).

#### **4.14 Perspectivas do setor para os próximos anos**

Segundo Castro (2009), o crescimento da demanda por energia elétrica é função do nível de atividade econômica presente e a necessária e estratégica ampliação da oferta de energia elétrica depende das estimativas de projeção do PIB. Assim sendo, a atual desaceleração da economia brasileira pode levar a acreditar que irá reduzir o crescimento da demanda por energia elétrica e conseqüentemente

a necessidade de expansão da oferta de energia elétrica. A conclusão, portanto, poderia ser de que a inserção da bioeletricidade tenderia a diminuir, assim como todas as outras fontes de energia elétrica. Contudo, a conclusão a que se chega é sobre que fontes priorizar na expansão, agora reduzida. Quais as fontes de energia elétrica que são, num cenário de médio e longo prazo, econômica e ambientalmente mais viáveis.

Ainda de acordo com Castro (2009), o potencial de produção de bioeletricidade, por sua vez, é função da disponibilidade de biomassa a ser utilizada como combustível e da tecnologia empregada. Desta forma, as projeções do potencial de energia elétrica a ser produzida pelo setor sucroalcooleiro dependem das premissas adotadas. Existe um consenso quanto ao crescimento da oferta de biomassa. Além disso, como foi visto, o fim do método da queimada na colheita da cana irá disponibilizar um enorme adicional de biomassa a ser utilizado como combustível, principalmente com as novas tecnologias para aproveitamento do palhiço. Considerando que parte deste palhiço deve ser mantida no campo para proteger o solo, ainda assim a utilização desta biomassa como combustível representará um sensível aumento da quantidade de combustível para a produção de bioeletricidade.

Outro ponto importante já citado anteriormente é que a avanço tecnológico dos equipamentos continuará influenciando os cenários futuros e orientando as premissas a serem assumidas, tanto nos novos projetos quanto nos retrofits. De acordo com CORRÊA (2001), a tecnologia de ciclo de contrapressão modificada para a geração máxima de excedentes pode produzir em torno de 30 KWh excedentes por tonelada de cana enquanto que a tecnologia de condensação e extração pode produzir 80 KWh de energia excedente por tonelada de cana. Por sua vez, tecnologias que utilizam a gaseificação da biomassa são capazes de produzir em torno de 300 KWh por tonelada de cana.

Contudo, o princípio da viabilidade técnica deverá sempre desenhar o cenário tecnológico. De acordo com FERREIRA (2007), plantas com a tecnologia de extração-condensação capazes de gerar 80 KWh excedentes por tonelada de cana possuem atualmente um custo de R\$3000,00 por KW. O autor relata que tecnologias que utilizem a gaseificação da biomassa ainda são inviáveis economicamente. Existem relevantes divergências entre as análises de viabilidade econômica de investimentos em plantas com maior capacidade de geração de eletricidade dos

agentes privados do setor e do governo. Nesta mesma entrevista, Ferreira (2007) afirma que os usineiros alegam ser necessária uma remuneração de R\$ 220,00 por MWh para viabilizar o empreendimento, embora transacione a bioeletricidade em leilões na faixa de R\$ 140,00 por MWh. Por sua vez, o governo alega que o limiar de viabilidade da bioeletricidade sucroalcooleira é muito inferior ao ao valor do MWh exigido pelos usineiros, os quais estão acostumados com taxas de retorno superiores a 20% no setor sucroalcooleiro e não se satisfazem com a taxa de retorno média de 12% do setor elétrico.

É de extrema importância que as disputas por mais R\$ por MW e pela busca da modicidade tarifária cheguem a um meio termo. As premissas adotadas pelo MME são conservadoras ao estimar uma potência instalada de aproximadamente 5100 MW em 2016. As projeções de Kitayma (2007), entretanto, são mais otimistas, considerando que os cenários de utilização apenas do bagaço da cana de açúcar e cenários onde também é utilizada a palha como combustível.

Para Castro (2009), a inserção da bioeletricidade em uma escala condizente com seu potencial na matriz elétrica brasileira é de grande importância para a garantia do suprimento e da sustentabilidade econômica e ambiental do sistema elétrico brasileiro. Apesar da crise econômica mundial ter criado obstáculos à promoção da bioeletricidade, justamente no momento em que os principais entraves vinham sendo superados, o próximo Leilão de Energia de Reserva parece sinalizar um início mais consistente desta inserção. Neste sentido, a crise econômica e a necessidade irreversível de uma política anti-cíclica de geração de energia elétrica podem criar perspectivas de bons negócios nos novos leilões para a contratação de bioeletricidade. É muito importante, não só para os empresários do setor sucroenergético, que aos planejadores do setor elétrico brasileiro avaliem as possibilidades, revejam as regras de contratação e, por consequência, não deixem de aproveitar esta oportunidade de explorar todo o potencial de uma energia limpa, que pode complementar o saturado parque de geração hídrico brasileiro.

## **5. CONCLUSÃO**

A geração de energia elétrica no Brasil depende intensivamente das hidrelétricas e este cenário não deve se alterar nos próximos. Este tipo de fonte de geração depende de altos investimentos, sendo ainda totalmente dependente da

média pluviométrica para garantir o nível de água dos reservatórios. As termelétricas movidas a combustíveis fósseis produzem uma energia cara, sendo dependente das variações do preço do combustível e ainda emitem altos níveis de CO<sub>2</sub>, altamente agressivos ao meio ambiente. Com a necessidade de suprir a possibilidade de uma crise energética, causada por baixos níveis dos reservatórios das usinas hidrelétricas no período de seca, e a necessidade de diminuir a emissão de CO<sub>2</sub>, imposta por protocolos mundiais, uma alternativa que desponta é o investimento em fontes renováveis e limpas como a cogeração a partir da queima da biomassa bagaço de cana-de-açúcar.

A bioeletricidade produzida pelas usinas sucroalcooleiras é uma energia renovável e gerada de forma extremamente eficiente. A implementação de tecnologias cada vez mais eficientes e a utilização da palha como combustível permite vislumbrar um imenso potencial de geração de bioeletricidade nos próximos anos. Além disso, sua produção traz inúmeros benefícios nas esferas econômica e social. Estas qualificações indicam que este tipo de energia apresenta grande potencial para assumir uma maior participação na matriz energética brasileira. Porém, alguns entraves ainda dificultam a expansão deste setor. Hoje, o ponto central é a definição do valor do MW a ser negociado nos contratos de longo prazo. A grande dificuldade que vem se encontrando para a maior participação deste recurso energético na matriz pode ser sintetizada na diferença da taxa de retorno verificada no setor sucroalcooleiro e o setor elétrico. É necessário que haja uma maior interação entre governo, usineiros e órgãos do setor elétrico para que haja consenso nas decisões diante um tema de tão extrema importância.

Como se sabe, o setor sucroalcooleiro no Brasil é bastante heterogêneo. Há empresários que não cumprem seus compromissos de entrega de energia assumidos em contrato, colocando em questão a credibilidade de todo o setor diante do mercado. Existem outros descompromissados com a modernização do setor e o aumento da eficiência da produção em seus vários aspectos. Mas também existem outros que têm suficiente espírito empreendedor a ponto de assumir o enfrentamento de riscos se existirem garantias mínimas de viabilização de bons negócios. Portanto, o sucesso do uso da bioeletricidade a partir da biomassa da cana-de-açúcar depende da sinergia entre empresários, gestores do setor elétrico e incentivos do governo brasileiro.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBROSI, IVO; GONZATTO, VALMIR. **Situação Energética no Brasil e Alternativas frente à Falta de Investimento no Setor.** Passo Fundo: TEOR. EVID. ECON. ANO 1 N.1 P.143-164, 1993.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **A missão da Aneel.** Disponível em <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=635&idPerfil=3>> Acesso em: 14/12/2013.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas de Energia Elétrica do Brasil.** 2. ed. : Brasília, ANEEL, 2005.

BARJA, G.J.A. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico.** 2006, 157p. Tese (Mestrado em Ciências Mecânicas). Universidade de Brasília, Brasília.

BASTOS, J. B. V. **Avaliação de Mecanismos de Incentivo à Cogeração de Energia a partir do Bagaço da Cana de Açúcar em uma Planta Química Brasileira de Soda-Cloro.** 2011, 180p. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

BRASIL, N. P. **Cogeração,** Apostila do curso de Engenharia de Equipamentos, 29 p, 2005.

BRIGHENTI, C. R. F. **Integração do cogrador de energia do setor sucroalcooleiro com o sistema elétrico.** 2003. Dissertação de Mestrado - Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo: **Emissão de Material Particulado Proveniente da Combustão de Bagaço em Caldeiras,** 1986.

CLEMENTE, L. **Avaliação dos Resultados Financeiros e Riscos Associados de uma Típica Usina de Co-geração Sucro-Alcooleira.** 2003. Monografia (Curso de Especialização) - Curso de Pós-Graduação em Planejamento, Operação e Comercialização na Indústria de Energia Elétrica, Setor de Tecnologia - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.

COELHO, Suani Teixeira. **Mecanismos para implementação da Co-geração de Eletricidade a partir de Biomassa. Um Modelo para o Estado de São Paulo.** 1999. Tese de Doutorado. PIPGE/USP – Programa Interunidades de Pós-Graduação em Energia. São Paulo: USP, 1999.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **A Geração termoeétrica com a queima do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil. Análise do desempenho da safra 2009-2010.** Mar. 2011. Disponível em:

<[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11\\_05\\_05\\_15\\_45\\_40\\_geracao\\_termo\\_baixa\\_res..pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_05_05_15_45_40_geracao_termo_baixa_res..pdf)>. Acesso em 09/01/2014.

CORRÊA N. V. **Análise de viabilidade da co-geração de energia elétrica em ciclo combinado com gaseificação de biomassa de cana-de-açúcar e gás natural.** 2001. 174 f. Tese (Mestrado em Ciências/Planejamento Energético)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2001.

CORTEZ, L. A. B. **Uso de Resíduos Agrícolas para Fins Energéticos: o Caso da Palha de Cana-de-Açúcar.** 1999, p. 66-81. Revista Brasileira de Energia, Rio de Janeiro, v. VI, nº.1, 1º semestre, 1999.

COSTA, A. K. **A cogeração de energia e a sua inserção em indústrias arrozeiras utilizando a casca de arroz.** 2013, 97 p. Relatório de Estágio Curricular. Universidade Regional do Estado do Rio Grande do Sul – Unijuí.

CUNHA, F., 2000, **Cogeração e Ciclos Combinados.** 1 ed, CEFET/RJ, Rio de Janeiro.

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

EXAME. **Por que o Brasil está sofrendo tanto apagão?** Revista Exame, São Paulo, 26 out. 2012. Disponível em: <<http://exame.abril.com.br/meio-ambiente-e-energia/energia/noticias/por-que-o-brasil-esta-sofrendo-tanto-blecaute>>. Acesso em: 19/12/2013.

ESCOBAR, M. R. **Viabilidade econômico-financeira da energia cogerada do bagaço de cana in natura.** Informações Econômicas. n.9, v.33, São Paulo: 2003.

FERRÃO, P. D. M; WEBER, F. A. **Cogeração: uma abordagem socioeconômica.** 2001, 14p. Núcleo de estudos e pesquisas em educação – Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, SP.

FERREIRA, J. **Custos de Plantas de Co-Geração Sucroalcooleiras.** Entrevista concedida à Guilherme de Azevedo Dantas. São Paulo, abril de 2007.

FERREIRA, L. C. C. **Caracterização do potencial energético entre a produção de etanol celulósico e a cogeração a partir do Bagaço de cana.** 2012. Monografia (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

FIOMARI, M. C., **Análise energética e exergética de uma usina sucroalcooleira do Oeste Paulista com sistema de cogeração de energia em expansão.** 2004. Dissertação de Mestrado - FEIS/UNESP, Ilha Solteira.

GALLINARI, B. R. M. **Comércio da energia cogerada em plantas termoeletricas com concessionárias e permissionárias e consumidores livres tendo como foco usinas sucroalcooleiras**. 2013, 47 p. Trabalho de graduação. Faculdade de Tecnologia de Araçatuba – Fatec, São Paulo.

GENOVESE, A. L.; UDAETA, M. E. M.; GALVÃO, L. C. R. **Aspectos energéticos da biomassa como recurso no Brasil e no mundo**, In: CONGRESSO INTERNACIONAL SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 2006, Campinas.

GOÉS, R.R.A. **A Complementariedade entre a Geração Hidrelétrica e a Geração Termelétrica a partir do Bagaço e Resíduos da Cana em Sistemas de Cogeração em Usinas Sucroalcooleiras**. 2001. 177p. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético). Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ. Rio de Janeiro.

GOLDEMBERG, J. **Pesquisa e desenvolvimento na área de energia**. 2000, p. 91-97. São Paulo em Perspectiva. v.14, n.3, São Paulo-SP.

GRAUER, A.; KAWANO, M. **Aproveitamento de resíduos para biomassa é rentável**. Revista da Madeira, n. 110, 2008. Disponível em: <[http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira\\_materia.php?num=1203&subject=Biomassa&title=Aproveitamento de resíduos para biomassa é rentável](http://www.remade.com.br/br/revistadamadeira_materia.php?num=1203&subject=Biomassa&title=Aproveitamento%20de%20res%C3%ADUOS%20para%20biomassa%20%C3%A9%20rent%C3%A1VEL)>. Acesso em: 11/12/2013.

GUIMARÃES, O. **Eletricidade vegetal**. O Sulco, Horizontina, v. 112, n. 27, p. 6-9, 2007.

HORLOCK, J. H., **Cogeneration: Combined Heat and Power (CHP)**, Rieger Publishing Company, Malabar, 226 p., 1997.

HUGOT, E. **Manual da Engenharia Açucareira**, Ed. Mestre Jou, São Paulo, 2 Vols., 1969.

JANK, M. S. **A relação do setor sucroalcooleiro com o meio ambiente**. União da Indústria de cana-de-açúcar . Fórum internacional sobre o futuro do álcool. Sertãozinho / SP, 2007.

KITAYMA, O. **Tecnologia e operação de unidades de bioeletricidade a partir de biomassa de cana-de-açúcar – condições operacionais**. In: Cogeração de Energia a Bagaço de Cana no Estado de São Paulo. São Paulo, 2007.

LORA, E. E. S; NASCIMENTO, M. A. R. **Geração Termelétrica: Planejamento, Projeto e Operação**. 2. ed. São Paulo: Interciência, 2004.

LOZANO, M., **Cogeneración**, Area de Máquinas y Motores Térmicos. Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad de Zaragoza, 175 p, 1998.

MCKENDRY, P. **Energy production from biomass (part 1): overview of biomass.** Bioresource Technology, Amsterdam, v. 83, p. 37-46, 2002.

MELLO, A. M. **Desempenho de uma enfardadora prismática no recolhimento do palhiço.** Mestrado, Universidade de São Paulo – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2009.

MULLER, M. D. **Produção de madeira para geração de energia elétrica numa plantação clonal de eucalipto em Itamarandiba.** 2005. 94 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

NETO, V. C.; RAMON, D. **Análises de Opções Tecnológicas para Projetos de Cogeração no Setor Sucro-Alcooleiro.** Vibhava Consultoria Empresarial S/C Ltda, 107 p, 2002.

OLIVEIRA, J. G. **Perspectivas para a cogeração do bagaço de cana-de-açúcar: potencial do mercado de carbono do setor sucroalcooleiro paulista.** 2007. Dissertação (Mestrado em Energia) – Universidade de São Paulo, São Carlos.

PARO, André de Carvalho. **Uma metodologia para gestão de eficiência energética em centrais de cogeração a biomassa: aplicação ao bagaço de cana.** 2011. 146 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

PAOLIELLO, J. M. M. **Aspectos ambientais e potencial energético no aproveitamento de resíduos da indústria sucroalcooleira.** 2006. 180 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2006.

PELLEGRINI, L.F. **Análise e otimização termo-econômica-ambiental aplicado à produção combinada de açúcar, álcool e eletricidade.** 2009. 350p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

PRIETO, M. G. S. **Alternativas de Cogeração na Indústria Sucro-Alcooleira, Estudo de Caso.** 2003, 255p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas / SP.

QUEIROZ, G. M. O. R. PASCHOARELI, D. J. **Aspectos Técnicos para Geração e Exportação de Energia Elétrica por Usinas Sucroalcooleiras.** In: INDUSCON, CONFERÊNCIA INTERNACIONAL DE APLICAÇÕES INDUSTRIAIS, VII, 2008, Poços de Caldas. Anais eletrônicos. Poços de Caldas, 2008.

REIS, M. M., 2001 **Custos Ambientais Associados a Geração Elétrica: Hidrelétricas x Termelétricas à Gás Natural.** 2001. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.

RIPOLI, T.C; MOLINA Jr., W.F.; NOGUEIRA, M.C.S.; MATOS, J.R. **Equivalente Energético do Palhão de Cana-de-Açúcar**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 19, Piracicaba. 1999. Anais. Piracicaba: FEALQ, SBEA, 1990b.

ROCHA, M. T.; MELLO, P. C. **O efeito estufa e o mecanismo de desenvolvimento limpo**. 2004, in: A questão ambiental: desenvolvimento e sustentabilidade. Escola Nacional de Seguros - Rio de Janeiro, RJ.

SCARPINELA, G. D. A.; MAUAD F. F.; MATOS A. J. S.; DANTAS, D. N. A. **Cana de açúcar no estado de São Paulo, seus impactos ambientais e a influência na demanda e disponibilidade de água**. In: IX SEREA, Seminário Iberoamericano sobre planificación, proyecto & operación de sistemas de abastecimento de água, 2009, Valencia. Anais...,2009.

SILONI, J. R. **Co-geração de Energia – Aproveitamento de Matéria Orgânica: Um relato da realidade do Grupo Cosan-Unidade Rafard, Capivari – SP**. 2008, 37p. Trabalho de graduação - Faculdade Cenecista de Capivari – SP.

SILVA, C.S.L.; MENDONÇA, J. P. L. **Produção e Distribuição Centralizada de Energia Térmica e Cogeração**. Coimbra: Universidade de Coimbra, 50 p, 2003. Trabalho de conclusão de curso.

SILVA, E. P.; CAVALIERO, C. K. **Perspectivas para as fontes renováveis de energia no Brasil**. Jornal da Unicamp, ed.21, Campinas, 2003.

SOUZA, Z. J. **Geração de Energia Elétrica Excedente no Setor Sucroalcooleiro: entraves estruturais e custos de transação**. 2003. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.

TOLMASQUIM, M. T., SUGIYAMA, A., SZKLO, A. S., SOARES, J. B., CORRÊA, V. N., 1999, **Avaliação dos Potenciais Técnico e Econômico de Identificação das Principais Barreiras à Implantação da Cogeração no Brasil em Setores Selecionados**, Relatório Final, Convênio PROCEL / ELETROBRAS – PPE/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil.

UNIÃO DA AGROINDÚSTRIA CANAVIEIRA DE SÃO PAULO (ÚNICA). **Dados**. Disponível em:  
<<http://www.unica.com.br/content/show.asp?cntCode=%7B6ED1BE65-C819-4721-B5E7-312EF1EA2555%7D>>. Acesso em: 21/12/ 2013.