



ENEPEX

ENCONTRO DE ENSINO,
PESQUISA E EXTENSÃO

8° ENEPE UFGD • 5° EPEX UEMS

ANÁLISE ENERGÉTICO-ECONÔMICA DA COGERAÇÃO DE USINAS SUCRO-ENERGÉTICAS DE MATO GROSSO DO SUL

Natália Cardoso Dal Molin¹ e Mirko V. Turdera²

UFGD-FAEN, C. Postal 533, 79804-970 Dourados-MS, E-mail: anaater@hotmail.com

1 Bolsista de Iniciação Científica Tecnológica do CNPq. 2 Docente da Faculdade de Engenharias, Orientador.

RESUMO

Modelagens termodinâmicas são de suma importância para entender processos de transformação energéticos uma vez que estes são bastante complexos. Apesar de modelos simplificados apresentarem apenas conclusões qualitativas em relação ao sistema ideal, estes modelos possibilitam observar variações dos principais parâmetros que afetam o modelo real. A avaliação econômica é de grande importância no âmbito da viabilidade econômica do processo. As decisões de investimento são importantes para a empresa uma vez que envolvem valores significativos e geralmente tem um alcance de longo prazo. Uma vez observado o fato de que o consumo de energia elétrica no Brasil vem aumentando gradativamente nos últimos anos, há preocupação com a necessidade de se aumentar a potência instalada no país bem como a utilização de fontes alternativas e renováveis na produção de energia elétrica, tendo em vista uma possível escassez de água nas bacias onde estão alocadas as hidrelétricas. Sendo assim, este trabalho apresenta a análise energético-econômica da cogeração de usinas-sucroalcooleiras ressaltando a importância deste processo no âmbito da complementação de energia elétrica.

PALAVRAS-CHAVE: Cogeração, Usinas Sucroenergéticas e Análise Energética-econômica

INTRODUÇÃO

Duas das maiores bacias hidrográficas do mundo encontram-se em território brasileiro (Amazonas e Paraná). Por conta desse incomparável potencial gerador de energia elétrica o país dispõe de um dos maiores parques hidroelétricos do mundo, e essas usinas já foram responsáveis por mais de 90% do total de energia elétrica gerada no país. No entanto, os excedentes de água até 1995, passaram a ser consumidos sem compensação que seria assegurada pelos períodos chuvosos, sendo assim, em 2001 se registrou pela primeira vez escassez dos recursos hídricos. (LEITE e TRIBESS, 2003).

Decorrente disso torna-se cada vez mais importante o correto aproveitamento de fontes energéticas, tendo em vista o inevitável esgotamento das reservas de combustíveis fósseis do mundo. Assim, a análise de usinas sucroalcooleiras tem ganhado grande interesse por serem importantes geradoras de energia elétrica.

O período de racionalização de energia causou uma série de inconvenientes, contudo, este período propiciou o incentivo e preocupação com a utilização de formas alternativas de energia na Matriz Energética Nacional. Neste contexto, surgiu o Programa Prioritário de Termelétricas, iniciado em 2000 pelo Ministério de Minas e Energia (MME). Este programa deu início à geração termelétrica a gás natural em sistemas convencionais e de cogeração, abrindo espaço para a cogeração a partir do bagaço da cana. (ROCHA, 2010)

De acordo com a União da Indústria de cana-de-açúcar (ÚNICA), em 2013 a produção de cana-de-açúcar no Brasil alcançou 653,44 milhões de toneladas, sendo 41,496 milhões de toneladas deste total, referente ao Estado de Mato Grosso do Sul. Um fato importante do setor sucroalcooleiro é o aumento de 5,4% na qualidade do Açúcar Total Recuperável (ATR) na cana-de-açúcar, tal porcentagem corresponde à quantidade de açúcar disponível na matéria prima, subtraída das perdas no processo industrial.

É crescente o interesse no uso da bioeletricidade que utiliza o bagaço como matéria prima de energia, uma vez que o bagaço é resíduo da cana e, portanto não apresenta custos à usina. Sendo assim, é utilizado na geração simultânea de energia térmica, mecânica e elétrica, necessárias para o processamento industrial da cana. Este processo denominado de cogeração apresenta o grande diferencial da cana se comparada com outras fontes de energia, uma vez que esta não necessita de aporte energético externo para processo industrial.

Dessa forma, a utilização da biomassa para geração de energia pode vir a se constituir num apoio à oferta de energia, não apenas nos momentos de crise energética, mas como um incremento à oferta de energia dentro do sistema interligado brasileiro. O bagaço da cana-de-açúcar pode ser considerado o maior rejeito da agroindústria nacional, sendo que seu aproveitamento industrial vai desde composto para ração animal, fertilizante e biogás, à matéria-prima para compensados e para indústria química em geral. No entanto, hoje seu principal

aproveitamento é no processo de produção de energia (térmica e elétrica) no setor sucroalcooleiro, ainda com amplas possibilidades de utilização da palha e ponteiros da cana, diferentemente dos demais setores que não dispõem de subprodutos de processo, nos quais geralmente são utilizados combustíveis não renováveis, dentre eles o gás natural [Rocha, G. (2010)].

A figura 1 apresenta a estrutura da oferta interna de eletricidade no Brasil em 2013. Sabe-se que o Brasil apresenta uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável, mesmo quando somadas as importações. A geração hidráulica corresponde a 70,1% da oferta interna, desta forma, somando as importações, pode-se afirmar que 80% da eletricidade do Brasil é originada de fontes renováveis. (BEN, 2013)

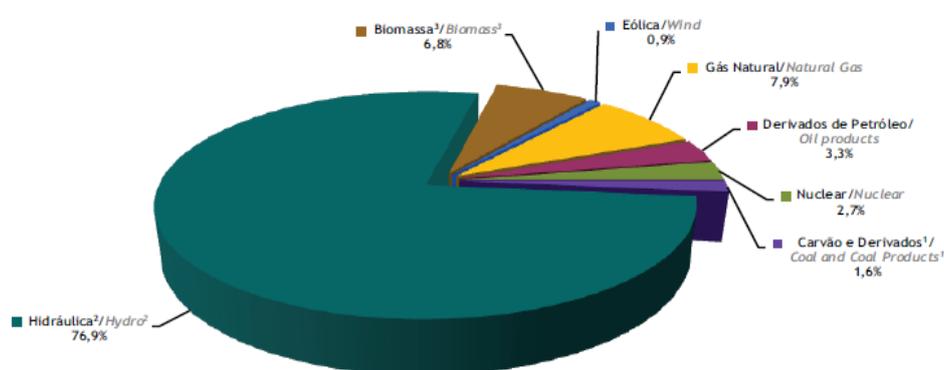


Figura 1 – Oferta Interna de Energia Elétrica por fonte – 2013 (Fonte: BEN, 2013)

Levando em consideração o consumo, o setor residencial apresentou crescimento de 2,1% e o industrial um ligeiro crescimento de 0,3% no consumo de energia elétrica, se comparada ao ano anterior. (BEN, 2013)

No ano de 2012, a capacidade instalada das centrais de geração de energia elétrica do Brasil era de 120.973 MW, somando as centrais de serviço público e autoprodutores, há um acréscimo de aproximadamente 3,8 GW. Do total, observa-se que 47,8% do acréscimo provinham das centrais hidráulicas, enquanto que as centrais térmicas responderam por 40,0% da capacidade adicionada. (BEN, 2013)

A capacidade instalada dos sistemas de cogeração no Brasil provenientes da biomassa era de 7.621 MW em 2013. (ANEEL). A tabela 1 apresenta os empreendimentos das usinas de cogeração no Estado de Mato Grosso do Sul, segundo o Banco de Informações de Geração da ANEEL.

Observa-se, tomando como base a tabela 1, que grande parte das usinas destacadas na mesma, apresenta destino de energia definido como Produção Independente de Energia – PIE, do total de 17 usinas, 12 são para este destino, totalizando 634.844 kW de potência outorgada. Algumas com Autoprodução de Energia, e em menor quantidade, as Unidades de Registro (ANEEL, 2012). As usinas sucroenergéticas são incluídas dentro da modalidade PIE, pois além de serem autossuficientes, elas têm excedente de energia que é comercializada na

rede mediante contratos previamente estabelecidos ou pela venda de energia no Mercado Atacadista de Energia – MAE. A referida tabela mostra também que é grande o número de usinas em operação no Estado em questão, as quais totalizam 754.624 kW de potência outorgada e aproximadamente 678.668 kW de potência fiscalizada.

USINAS do tipo UTE em Operação							
Usina	Potência Outorgada (kW)	Potência Fiscalizada (kW)	Destino da Energia	Proprietário	Município	Combustível	Classe Combustível
Sidrolândia (Ex-Santa Olinda)	25.000	4.600	PIE	100% para Eletron Centrais Elétricas Ltda	Sidrolândia - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Coopernavi	12.000	12.000	PIE	100% para Usina Navirai S.A. Açúcar e Alcool	Navirai - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Maracaju	10.940	10.400	APE	100% para LDC Bioenergia S.A	Maracaju - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Passa Tempo	10.000	10.000	PIE	100% para LDC Bioenergia S.A	Rio Brilhante - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Brasilândia	18.000	10.000	PIE	100% para Eletron Centrais Elétricas Ltda	Brasilândia - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Centro Oeste Iguatemi	4.000	4.000	REG	100% para Destilaria Centro Oeste Iguatemi Ltda	Iguatemi - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Energética Santa Helena	3.200	3.200	REG	100% para Energética Santa Helena Ltda.	Nova Andradina - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Safi	4.640	4.640	REG	100% para Safi Brasil Energia Ltda	Nova Alvorada do Sul - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Angélica	96.000	96.000	APE	100% para Adecoagro Vale do Ivinhema Ltda	Angélica - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
LDC Bioenergia Rio Brilhante (Ex. Louis Dreyfus Rio Brilhante)	90.000	90.000	PIE	100% para LDC Bioenergia Rio Brilhante	Rio Brilhante - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Monteverde	20.000	20.000	PIE	100% para Monteverde Agro-Energética S.A.	Ponta Porã - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Energética Vista Alegre	75.000	30.000	PIE	99,99% para Tonon Bioeletricidade MS Ltda 0,01% para Tonon Bioenergia S/A.	Maracaju - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Santa Luzia I	130.000	130.000	PIE	100% para Agro energia Santa Luzia Ltda	Nova Alvorada do Sul - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Unidade de Bioenergia Costa Rica	79.828	79.828	PIE	100% para Companhia Brasileira de Energia Renovável	Costa Rica - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
São Fernando Açúcar e Alcool	50.016	48.000	PIE	100% para São Fernando Açúcar e Alcool Ltda.	Dourados - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
Caarapó	76.000	76.000	PIE	100% para Nova América S.A. Industrial Caarapó	Caarapó - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa
São Fernando Energia I	50.000	50.000	PIE	100% para São Fernando Energia I Ltda	Dourados - MS	Bagaço de Cana de Açúcar	Biomassa

Tabela 1 – Empreendimentos de Cogeração – Mato Grosso do Sul

*APE – Autoprodução de Energia

*PIE – Produção Independente de Energia

*REG – Unidades de Registro

Segundo dados da ANEEL, há aproximadamente 1573 usinas termelétricas utilizando diversas classes de combustíveis no Brasil, totalizando 32.335.191,82 kW de potência. A tabela 1 juntamente com pesquisas e notícias encontradas, quantificam e reforçam o alcance e a importância que vem ganhando a cogeração nas usinas movidas a biomassa no âmbito nacional e no Mato Grosso do Sul. (ANEEL, 2012). Segundo a Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Energia, No Brasil há 308 usinas de açúcar e álcool, com um processamento médio de 1 milhão de toneladas de cana por usina.

2. Revisão Bibliográfica

Usinas termelétricas são uma opção tecnológica crescente na produção de energia elétrica nos países em desenvolvimento. Porém, pelo método convencional

de geração e suprimento de energia elétrica ao consumidor final, mais de um quarto da energia primária que alimenta a usina é desperdiçada. A maior fonte de perdas nos processos de conversão é o calor rejeitado nas imediações da água e do ar devido às restrições inerentes dos diferentes ciclos termodinâmicos empregados na geração de energia elétrica. Além do mais, consumidores podem estar longe dos pontos de geração, o que resulta em perdas adicionais em transmissão e distribuição da rede.

Como mencionado, a utilização da biomassa para geração de energia pode vir a se constituir num apoio à oferta de energia, desta forma, do lado econômico vê-se, além do aproveitamento do bagaço resultante da própria produção como combustível, também o fato de o açúcar e álcool requererem energia térmica e permitirem um rateio dos custos de produção com a eletricidade. É pertinente ressaltar características e definições do processo de Cogeração, uma vez que este é o responsável pela produção de calor e de energia elétrica conjugados.

O conceito de cogeração é baseado no princípio de cascada térmica no qual consiste a geração termelétrica *in situ*, onde uma fração substancial do calor rejeitado é recuperada para satisfazer demandas de aquecimento ou resfriamento do consumidor final. Existe, por tanto, uma considerável ênfase na eficiência global do ciclo.

Equipamentos de geração de calor e energia elétrica, ou comumente chamados de cogeração são amplamente reconhecidos em todo o mundo como uma alternativa atrativa às opções convencionais de produção de energia elétrica e calor devido ao seu relativo baixo capital de investimento, curto período de implementação, eficiente consumo de combustível e conseqüentemente, associado à baixa poluição ambiental. Sistemas e processos passados na Primeira Lei da Termodinâmica referem-se à conservação da energia e massa. (Bejan,1988). Por outro lado, pode-se dizer que a Segunda Lei da Termodinâmica governa os limites de conversão entre diferentes formas de energia.

Embora o conceito de cogeração seja conhecido desde início do século XX, este tem achado sua popularidade e renovado interesse apenas desde finais da década de 70 e começo da década de 80. O principal fator que contribuiu para este fenômeno foi a crise do petróleo, especificamente os dois choques de petróleo que levaram a uma espiral crescente o preço dos energéticos, em especial dos combustíveis fósseis, ainda, a disponibilidade de sistemas de cogeração em pequena escala tornaram o custo efetivo competitivo com as unidades convencionais de geração.

Cogeração em se tratando das usinas sucroalcooleiras é comumente realizada tendo por base sistemas cuja concepção parte do princípio de ciclos a vapor. A energia mecânica pode ser utilizada na forma de trabalho, como por exemplo, acionando moendas em usinas sucroalcooleiras, que é o caso; e a energia térmica utilizada com fonte de calor para um processo industrial, como por exemplo, produção de açúcar e/ou álcool (Bejan, 1988, Balestieri, 2002, Rocha, 2010).

Em relação à cogeração no setor elétrico brasileiro, observa-se que, com a crise do petróleo na década de 70, a cogeração ganhou importância mundial, mas apenas na década de 80 passou a ser priorizada no Brasil, com a intenção de minimizar os impactos ambientais.

O setor sucroalcooleiro merece uma posição de destaque no âmbito da geração de energia elétrica através da cogeração, uma vez que este pode contribuir muito para a produção de energia elétrica excedente para comercialização.

No Brasil, a definição de cogeração determina que tal forma seja mais eficiente que a geração térmica em bases convencionais. Portanto, a cogeração é sempre recomendável, quando se quer uma eficiência energética tecnicamente possível e economicamente atraente.

A tecnologia de cogeração é bastante antiga, no entanto teve seu emprego diminuído uma vez que as concessionárias tiveram grandes ganhos em geradores de grande porte e interligados por sistemas de transmissão. O interesse em aperfeiçoar a cogeração diminuiu, pois a necessidade de grandes escalas levou à criação de modelos de exploração monopolistas.

Surge assim o mais importante exemplo de Geração Distribuída (GD), quando consumidores que necessitavam de frio e/ou calor no processo para se ter excedentes de produção de energia competindo com o sistema público e energia gerada com maior eficiência.

Vale especificar que, segundo trabalho desenvolvido pelo Instituto Nacional de Eficiência Energética (INEE), para o Fórum de Cogeração em julho de 2001, Geração Distribuída é em geral considerada como qualquer fonte geradora que tem sua produção com maior parte destinada a cargas próximas ou locais, as quais não têm necessidade de transporte de energia por redes de transmissão.

Desta forma, de acordo com o mesmo trabalho do INEE citado acima, considera-se Geração Distribuída não somente no sentido de geração descentralizada de energia, mas também para qualquer uso, num sentido mais amplo, abrangendo também:

- a. Cogeração: já descrita anteriormente, como produção simultânea de energia térmica e elétrica, utilizando um único combustível.
- b. Frio/calor distrital: produção de água gelada ou quente ou vapor, simultaneamente, para distribuição comercial e para resfriamento ou aquecimento, respectivamente, e de energia elétrica.
- c. Armazenamento de energia elétrica para posterior reinjeção na rede.
- d. Fontes energéticas (virtuais): uso de geradores de emergência para geração normal.
- e. Redução da demanda.

A cogeração oferece uma série de vantagens e conveniências que a tornam uma prioridade para expansão, em especial no Brasil, o qual tem um sistema concentrado em unidades de elevada potência. Dentre as vantagens, podem-se citar as altas eficiências globais de conversão térmica, os quais são superiores aos

índices da geração térmica convencional. No que diz respeito ao meio ambiente, as vantagens estão na utilização de rejeitos e subprodutos de processo. (WALTER, 1994)

Desde o século XIX, o bagaço da cana já é utilizado para geração de vapor. Primeiramente, o vapor era utilizado no lugar do fogo, para a concentração do caldo. Logo após passou a ser utilizado também em motores a vapor, para geração de trabalho mecânico, os quais foram substituídos por turbinas a vapor.

Os sistemas de geração de vapor como fonte de calor e para produção de potência têm sido aprimorados. Os processos que requerem os maiores investimentos em uma usina de açúcar são a combustão e a geração de vapor. No entanto, com o aumento da capacidade realizada pela instalação de novas caldeiras, isso provoca um grande e desproporcional gasto econômico nas usinas.

Por este motivo, muitas pesquisas estão sendo realizadas com a intenção de maximizar a queima do bagaço, melhorar a utilização do calor radiante no equipamento e aumentar a geração através de novas tecnologias para os queimadores.

Extraído o caldo da cana, quando esta possui aproximadamente 50% de umidade, o bagaço é queimado na caldeira, nos ciclos a vapor. Conforme o teor de umidade decresce, o poder calorífico do bagaço aumenta, aumentando assim a capacidade de geração de vapor. Este processo pode ser realizado com a utilização de secadores para o bagaço, aproveitando o calor rejeitado pelo gás da chaminé. (ROCHA, 2010)

De forma geral, apesar da secagem do bagaço trazer um maior rendimento energético que o pré-aquecimento do ar, os custos são maiores. Portanto, os projetos devem ser analisados incluindo os aspectos econômicos e energéticos.

A geração de energia vinda da cana-de-açúcar apresenta hoje uma extensa contribuição para a substituição dos combustíveis fósseis uma vez que gera em média 9,7 TWh de energia elétrica e mecânica, a qual corresponde 3% da eletricidade gerada em todo o território nacional. No entanto, vê-se que em usinas da região da Grande Dourados, que o custo de geração dessa energia elétrica é mais alto que o valor negociado nos leilões, sendo assim, necessita-se uma quantificação energética para entender o porquê deste desequilíbrio.

Em média, apenas cerca de 15% da energia elétrica auto-produzida é exportada. A Figura 2 mostra estimativas da evolução da produção de cana e da capacidade instalada no Brasil até a safra 2021-2022. Segundo este diagrama espera-se atingir uma produção de 1 bilhão de toneladas de cana e se ter uma oferta de 12.000 MW de bioeletricidade, gerando uma demanda potencial de cerca de 400 turbinas a vapor com capacidade de geração de 30 a 40 MW cada (COGEN-SP, 2007).

Desta forma, a análise e estudo aprofundado de tais usinas apresentam-se de grande valia, uma vez que evita procedimentos dispendiosos e muitas vezes inviáveis.

Por fim, vale ressaltar que o setor energético do Brasil está passando por grandes mudanças, no entanto ainda existem barreiras. Mas ainda assim, observa-se que nos últimos anos houve importante aumento na disponibilidade de recursos disponíveis para implementar uma política de eficiência energética, dos quais o principal desafio é usá-los bem.

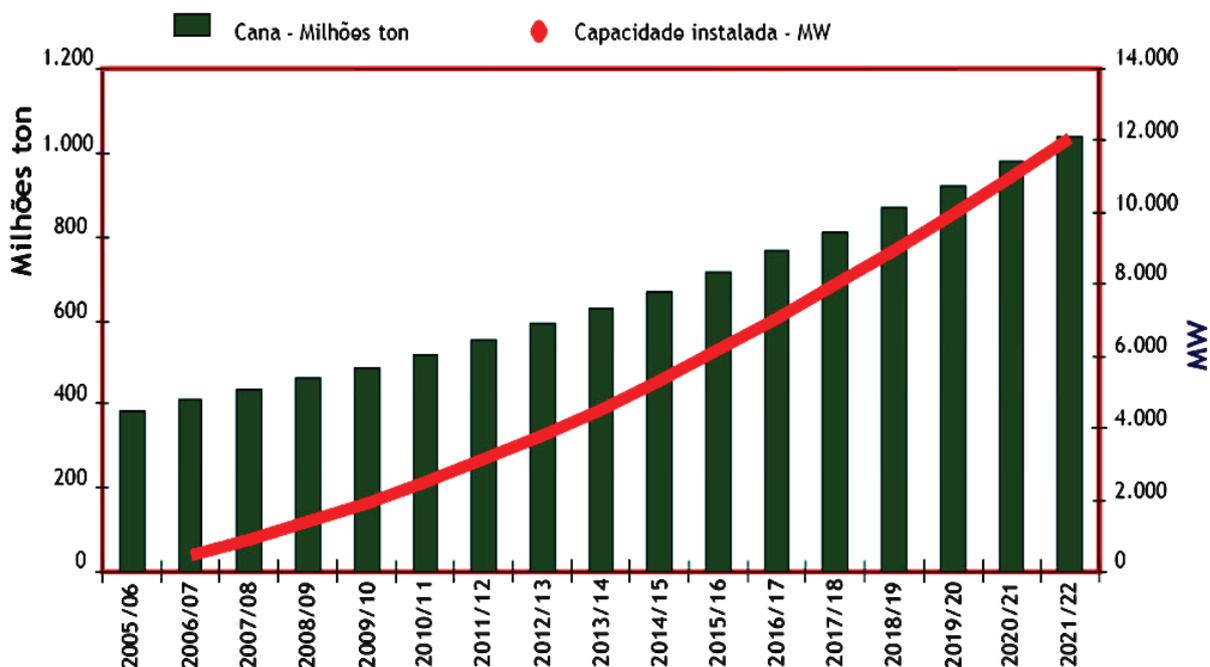


Figura 2: Estimativas da evolução da produção de cana e da capacidade instalada até a safra 2021-2022 (COGEN-SP, 2007)

Uma das principais preocupações, se não a mais debatida, é no que se refere aos custos e investimentos. Desta forma, segundo Rocha (2010), nas decisões de investimento, uma prévia avaliação econômica é uma tarefa de suma importância no âmbito empresarial, uma vez que decisões de investimento envolvem, para a empresa, valores significativos e com alcance de longo prazo. Desta forma, adota-se a análise de investimento com o intuito de avaliar uma alternativa de ação ou então escolher dentre elas a mais atrativa. Uma vez que a análise de investimento envolver uma decisão de grande porte, seja ele a instalação de novo empreendimento ou a ampliação de um já existente, por exemplo, seu prognóstico é decisivo para a rejeição ou não da proposta.

Segundo Gitman (1984), nas técnicas mais avançadas de análise de investimento de capital, no valor do dinheiro é considerado o fator tempo, envolvendo conceitos de fluxos de caixa que são supostamente conhecidos ao longo da vida útil do projeto.

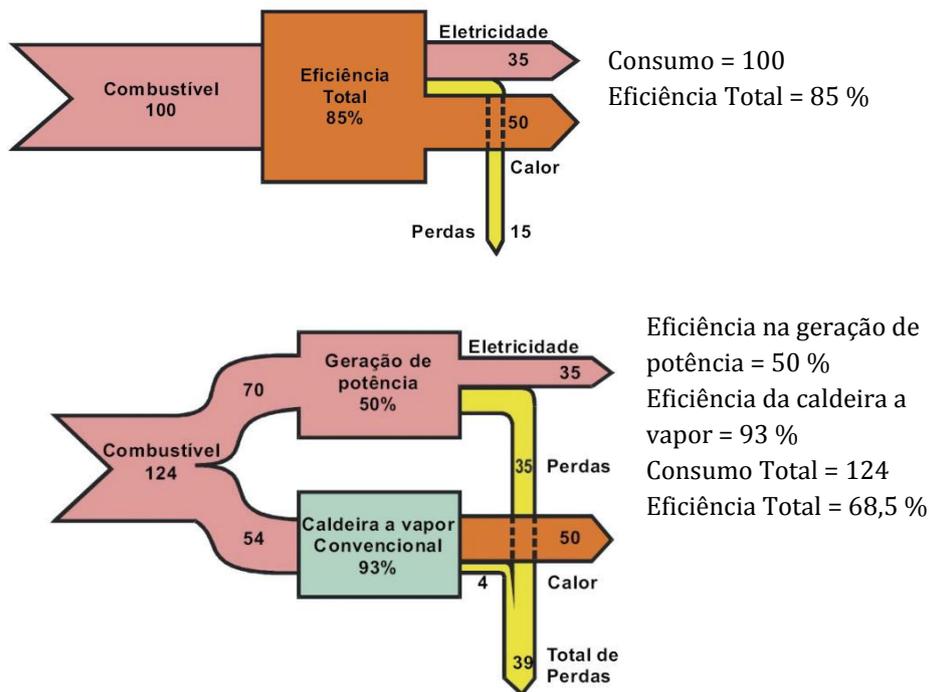
Já Horlock (1997), baseado no Valor Atual Líquido (VAL), preço da eletricidade, fluxos de caixa atualizados, preço do calor e períodos de *payback*, apresenta uma série de técnicas que avaliam projetos de cogeração.

Metodologia

2.1 Cogeração e Geração Distribuída

Cogeração é definida como a geração conjugada de potência mecânica e calor, em se tratando das usinas sucroenergéticas, esta é comumente realizada tendo por base sistemas cuja concepção parte do princípio de ciclos a vapor.

A figura 3 apresenta um exemplo, comparando o processo de cogeração de energia e a produção separada de eletricidade e vapor.



Economia de energia primária (combustível) = $(124 - 100)/124 = 19,3 \%$

Figura 3 – Comparação entre o processo de cogeração de energia e a produção separada de eletricidade e vapor. (Fonte: Takaki, 2006)

Segundo a figura acima, é importante ressaltar num primeiro momento que, se não houvesse cogeração, a quantidade de energia na entrada seria muito maior. A primeira parte da figura, referente ao processo de cogeração de energia, mostra que, nesse processo, tendo valor do combustível de 100 e utilizando-o totalmente, consegue-se uma eficiência total de 85%, da qual 35% refere-se à eletricidade e 50% ao calor, tendo apenas 15% de perdas.

A segunda parte da figura 1, referente à produção separada de eletricidade e vapor, tendo-se um combustível na escala de 124, dividido em 70 para geração de potência, com 50% de eficiência e 54 para caldeira a vapor convencional, compreendendo uma eficiência de 93%. Neste processo, a eficiência total

apresenta-se na faixa de 68,5%, uma vez que há um total de 39% de perdas, 35 vinda da produção de eletricidade e 4 da caldeira a vapor.

Por fim, observa-se que a utilização da técnica de cogeração, tem-se uma economia de energia primária (combustível) de aproximadamente 19,3%, fato que reforça mais uma vez, a importância de tal técnica uma vez que a referida economia de combustível resulta em economia energética e econômica, objetivo desta pesquisa.

Sendo assim, observa-se que a energia mecânica pode ser utilizada na forma de trabalho, como por exemplo, acionando moendas em usinas sucroalcooleiras, que é o caso e a energia térmica utilizada com fonte de calor para um processo industrial, como por exemplo, produção de açúcar e/ou álcool.

Geração distribuída refere-se à geração elétrica realizada junto ou próxima do(s) consumidor (es) independente da potência, tecnologia e fonte de energia. Esta, por sua vez, tem vantagem sobre a geração central, pois economiza investimentos em transmissão reduzindo as perdas. (INEE, 2012).

Assim, observa-se que tanto a cogeração quanto a geração distribuída, são processos que visam a utilização racional de energia. Em se tratando da cogeração, o rendimento do processo de geração de energia é elevado a partir da produção combinada, aproveitando-se melhor o conteúdo energético do combustível base. (COELHO, 1999)

O principal setor que utiliza o processo de cogeração é o sucroalcooleiro, utilizando o bagaço da cana-de-açúcar como combustível.

2.2 Ciclo Rankine e a Cogeração

Os conceitos de cogeração aplicam-se em especial às cadeias sucroalcooleiras, uma vez que no processamento da cana de açúcar há alta demanda de energia térmica, mecânica e elétrica. O bagaço, após a extração do caldo, é queimado em caldeiras para produção de vapor para obter as três fontes de energia. Como, do total de energia contida na planta de cana de açúcar, o álcool responde por cerca de um terço e o bagaço, os ponteiros e a palhada pelo restante, a cogeração é capaz de dobrar a energia obtida pela produção do álcool. (BIODIESEL, 2014)

Dos ciclos termodinâmicos existentes, o mais estudado e aplicado em processos de cogeração é o Ciclo Rankine e o Ciclo Combinado. No primeiro, utiliza-se uma caldeira, na qual a queima, no caso da cogeração o bagaço ou a palhada da cana, gera vapor a alta pressão. Este vapor é liberado através de sistemas mecânicos, movimentando turbinas para gerar energia elétrica e outras máquinas, transferindo calor para processos industriais. O ciclo se completa com o retorno do vapor condensado à caldeira para ser aquecido novamente. No caso do ciclo combinado, uma turbina a gás é que movimenta o gerador; o calor do gás é transferido para a água, que vaporiza e aciona um segundo gerador, onde ambos produzem energia elétrica. (BIODIESEL, 2014)

2.3 Análise Termo-Econômica

A análise de investimento tem por objetivo avaliar ou escolher uma alternativa de ação que seja a mais atrativa entre todas as existentes. Sendo assim, quando esta análise refere-se a uma decisão de grande importância, como por exemplo, ampliação de uma instalação já existente ou instalação de uma nova, o resultado calculado é o que decide a aceitação ou rejeição do empreendimento. É esta análise que separa o que tem melhores condições de remunerar adequadamente. (ROCHA, 2010)

Os projetos de energia são, em sua maioria, intensivos em investimentos. Dependendo do tipo de equipamento os investimentos podem variar de centenas para milhões de dólares. Desta forma, o interesse sobre a economia de energia conduziu ao desenvolvimento de técnicas baseadas na segunda lei da termodinâmica, em especial no que diz respeito à exergia, uma vez que o balanço de exergia de uma instalação permite identificar quais motivos e quais unidades influenciam na eficiência do sistema, através da irreversibilidade. No entanto, essas informações não são suficientes. (ROCHA, 2010)

Na prática, necessita-se de análise de mais três parâmetros, para se atingir uma economia efetiva de energia na instalação:

- Nem toda irreversibilidade pode ser evitada;
- As reduções locais na destruição da exergia não são equivalentes;
- As oportunidades de economia só podem ser especificadas através de um estudo mais detalhado dos mecanismos fundamentais da geração de entropia.

Para efeito de decisão de um projeto de central de cogeração, é de suma importância que algumas informações estejam disponíveis, informações estas referentes aos custos de investimento, de operação e manutenção, índices de confiabilidade, emissões de poluentes, razão potência/calor e eficiências por fabricantes, para cada classe de equipamentos, ordenados segundo potências elétricas normais.

2.3.1 Estudo de caso

A teoria de alocação dos custos apresenta uma maneira de se distribuir os custos entre os produtos. A Tabela 2 apresenta os custos dos equipamentos fornecidos pela Usina São Fernando.

Apesar dos preços terem sido fornecidos pela Usina sob estudo, vale ressaltar que não são valores fixos, uma vez que podem sofrer ajustes no decorrer do tempo.

Equipamentos	Custos Equipamentos (10 ⁶ R\$)
Caldeiras (2)	220
Gerador	8
Turbina	16
Redutores	1
Tubulações	7
Estruturas metálica e civil	20
Esteiras	30
Elétrica	50

Tabela 2 – Custos dos Equipamentos (FONTE: Usina São Fernando)

Partindo dos dados da tabela 2, pode-se fazer a análise de custos (análise econômica) para análise final. As taxas de custos para cada equipamento levam em conta o tempo de funcionamento dos equipamentos e o investimento de capital com operação e manutenção, sendo assim: (LEITE, 2003)

$$\dot{Z} = \frac{Z_k^a}{3600 \cdot t_{oper}}$$

Onde: \dot{Z} é a taxa de custo de equipamento (R\$/s)

Z_k^a é o custo anual de equipamento com amortização (R\$/ano)

t_{oper} é o tempo efetivo de operação (h)

O custo anual dos equipamentos, com amortização, é calculado a partir da seguinte equação:

$$Z_k^a = CI(f_a + f_{omf} + FC f_{omv})$$

Onde: CI é o custo de investimento de capital do equipamento (R\$)

f_a é o fator de amortização

f_{omf} é o percentual de custo anual associada à operação e manutenção (9%)

f_{omv} é o percentual de custo anual variável de operação e manutenção (1%)

FC é o fator de carga (0,75)

O fator de amortização é obtido considerando uma taxa de juros de 12% ao ano e um período de 20 anos, desta forma:

$$f_a = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^{n-1}}$$

Onde: i é a taxa anual de juros (12%)

n é o período de 20 anos

2.4 Abordagem Econômica

Os custos de produção são compostos por parcelas direta, referentes à matéria-prima e mão-de-obra bem como de parcelas indiretas, referentes à materiais como lubrificantes, materiais de limpeza e manutenção, reparos entre outros, mão-de-obra indireta como salários de supervisores, chefes, vigias e outros e também outros custos de produção como aluguel, energia elétrica, água, seguros, impostos e outros. Em termos de variabilidades, estes custos podem variar em função dos níveis de atividade e então são chamados de **custos variáveis**; no entanto, outros custos podem variar com o tempo e então são chamados de **custos fixos**. (BALESTIERI, et.al. 2002)

Para um projeto de central de cogeração, é de suma importância que sejam definidos os custos de produção de energia, de maneira a permitir uma comparação com os valores praticados pelas concessionárias elétricas e outros produtores independentes, verificando desta forma se é viável e conveniente a produção de excedentes que possam ser comercializados.

Em uma central térmica convencional, a única forma de energia desejada é a eletricidade, uma vez que esta é o produto de comercialização; no entanto, no caso da cogeração, onde se encontram disponíveis outras formas de energia, como vapor, água quente e/ou gelada, é preciso de uma partição dos custos envolvidos, e é da correta avaliação desses custos que se poderá determinar que um deles seja competitivo ou não.

A decisão de um projeto é feita com base em conceitos administrativos e financeiros, em concordância com as políticas de ação da empresa. Dentre as ferramentas que ajudam na tomada de decisão, o *payback* é um dos métodos utilizados. Este consiste no número de anos necessários para recuperar um investimento do fluxo líquido de caixa. É um método simples e que em geral não leva em conta taxas de juros, então é pouco preciso para decisões comparativas. Outro método conhecido é o *TIR* (Taxa Interna de Retorno), esta é obtida por tentativa, ou seja, arbitram-se valores sucessivos até que se obtenha um valor tal que iguale os valores atuais das receitas e das despesas. (BALESTIERI, et al. 2002)

A maioria dos modelos de planejamento de centrais de cogeração tem sua estrutura baseada no *Método do Valor Atual* como auxiliar à decisão econômica. Neste método, todos os custos, bem como os retornos obtidos da comercialização da energia elétrica, devem ser transportados para o ponto zero do fluxo de caixa e comparados a valores atuais obtidos.

No entanto, o método utilizado neste trabalho, será o *Valor Presente Líquido (VPL)*, uma vez que este método apresenta uma análise de projeto de investimento, definido como, dado uma taxa de atratividade e o tempo de duração, somatório dos valores presentes dos fluxos estimados de uma aplicação. Neste método, os fluxos positivos representam as entradas de caixa no período considerado e quando negativo, as saídas. Para que o investimento seja viável, é necessário que o VPL seja positivo, pois, valor final do VPL, representa o montante esperado do projeto até o

fim do período estimado, representado em valores atuais, e então, se positivo, significa que valor obtido pelo projeto no fim do período estimado pagará o investimento inicial. (SOUZA, et al. 2014)

Então, tem-se:

$$VPL = -A + (C - B) \cdot \left[\frac{(1 + i)^n - 1}{(1 + i)^n \cdot i} \right]$$

Onde: VPL - Valor presente líquido (R\$);

A - Investimento inicial do projeto (R\$);

B - Custos de manutenção e operação do projeto (R\$);

C - Renda bruta com a venda de energia elétrica (R\$);

D - Custo do bagaço (R\$);

i - Taxa de atratividade (%);

n - Vida útil dos equipamentos (anos);

Ainda neste âmbito, introduz-se o conceito de Taxa Interna de Retorno (TIR). Gitman (1984) comenta que tal técnica talvez seja a mais utilizada para se avaliar alternativas de investimento. A TIR é uma taxa de desconto que faz com que os valores das despesas sejam iguais aos valores dos retornos dos investimentos, ambos trazidos ao presente, quando aplicada a um fluxo de caixa. Ou seja, trata-se de um critério mais objetivo onde o projeto baseia-se no custo de capital para se tomar a decisão. Desta forma, se a TIR for menor que o custo do capital ou taxa de desconto adotada deve-se rejeitar o projeto, caso contrário, se for maior ou igual, o projeto deve ser aceito.

Para uma margem de custos de investimento, serão considerados no presente trabalho: custos de equipamentos (CE) e 1,5% dos custos de equipamentos. Logo:

$$\text{custos de investimento} = (CE + 1,5\% \cdot CE)$$

Segundo JANUZZI, podemos adotar que, além dos custos de capital deve-se incluir os custos de serviço da concessionária, dado pela soma entre os custos de operação e manutenção (COM), juros (J), taxa de depreciação de capital (TD), custos adicionais de gestão da demanda (CA) e custo do combustível (CC), desta forma, segue a equação abaixo, para cálculo do custo de serviço (TIR):

$$\text{custos de serviço} = COM + (J + TD + CA) \cdot CI + CC$$

Analisando cada item, observa-se que os custos com manutenção e operação já foram apresentados na Tabela 3; os custos com combustível pode ser estimado de acordo com informações fornecidas pela usina em questão considerando duas situações: se esta possui matéria prima para todo o período de produção de energia elétrica ou se tiver custo caso seja necessário a compra de fornecedores. Se não for necessária a compra, o custo de combustível não será adicionado na equação acima, caso contrário deve-se considerar.

No presente trabalho, faremos dois cenários: o primeiro considerando que a usina não tem a necessidade de compra de combustível, ou seja, ela possui matéria prima para todo o período de produção de energia elétrica; e o segundo considerando que há a necessidade de compra, neste, utilizaremos uma margem de compra de aproximadamente 20%, ou seja, 80% da matéria prima necessária a usina possui, desta forma, há compra de aproximadamente 20%. O restante dos custos para cálculo dos custos de serviço serão somados formando um total de 2%.

2.5 Resultados e Discussões

De acordo com as equações fornecidas para cálculos de \dot{Z} , taxa de custo de equipamento (R\$/s); Z_k^a , custo anual dos equipamentos; Z_k , taxa de custo do equipamento e Z_a , fator de amortização, as tabelas 3 e 4 apresentam os valores dos respectivos parâmetros:

Tabela 3 – Parâmetros para os cálculos (Fonte: Usina São Fernando, Dourados -MS)

	Equipamentos	Custos Equipamentos(milhões R\$)	Custos Manut. e Op. (milhões R\$/ano)
1	2 Caldeiras	220	8,07
2	Gerador	8	8,07
3	Turbina	16	8,07
4	Redutores	1	8,07
5	Tubulações	7	8,07
6	Estruturas metálicas e civil	20	8,07
7	Esteiras	30	8,07
8	Elétrica	50	8,07

Tabela 4 – Parâmetros Calculados

	T* (h)	fa*	Zka* (R\$/ano)	Zk* (R\$/s)
1	5400	0,1344	52889433	2,7206
2	5400	0,1344	3726633	0,1917
3	5400	0,1344	5581833	0,2871
4	5400	0,1344	2103333	0,1082
5	5400	0,1344	3494733	0,1798
6	5400	0,1344	6509433	0,3348
7	5400	0,1344	8828433	0,4541
8	5400	0,1344	13466433	0,6927

Os parâmetros da Tabela 4 foram calculados segundo equacionamento demonstrado anteriormente. Para a TIR, como dito anteriormente, teremos dois cenários: um considerando que a usina não tem a necessidade de compra de combustível, e outro considerando que ela compra uma parcela de combustível. Desta forma, segundo dados fornecidos pela Usina São Fernando, eles compram

bagaço no preço de 50,00 R\$/ton mais o frete. Para cálculo de frete, adotaremos 1,50 R\$ o km rodado, e desta forma, estabeleceremos um raio de 30 km para o percurso feito pelos caminhões. Então temos em média, considerando que os caminhões saem da Usina e percorrem 30 km para buscar e mais 30 km para trazer o bagaço, totalizando 60 km rodados, um gasto de aproximadamente 90,00 R\$ com o transporte do bagaço.

No entanto, a usina compra, em média, 15000ton de bagaço por mês, e como já dito, há um custo de 50,00 R\$/ton, totalizando 750.000,00R\$ por mês com a compra do bagaço. Considerando um período de aproximadamente 8 meses de safra, tem-se um custo de 6 milhões R\$/ano com a compra do bagaço. Adicionando o preço do transporte, que como dito anteriormente é de 90,00 R\$, mas cada caminhão carrega em torno de 65ton, totalizando então um custo de 20.769,23R\$ de transporte; para 8 meses, 166.153,84 R\$/ano. Logo, na tabela 5 temos os dois cenários descritos:

Tabela 5 - Cenários a serem estudados

	1° CENÁRIO	2° CENÁRIO
COM	8,07 milhões R\$/ano	8,07 milhões R\$/ano
CE	352 milhões R\$	352 milhões R\$
J+TD+CA	2%	2%
CC	SEM COMPRA DE COMBUSTÍVEL	6,17 milhões R\$/ano

Fazendo as devidas análises para o ambos os cenários, para o custo de investimento, uma vez que ambos possuem o mesmo custo de investimento, temos o seguinte valor:

$$CI_{1,2} = (352 \cdot 10^6 + 1,5\% \cdot 352 \cdot 10^6) = 357,3 \cdot 10^6 R\$$$

Para os custos de serviços, tem-se:

$$CS_1 = 8,07 \cdot 10^6 + 2\% \cdot 357,3 \cdot 10^6 = 15,216 \cdot 10^6 R\$/ano$$

$$CS_2 = 8,07 \cdot 10^6 + 2\% \cdot 357,3 \cdot 10^6 + 6,17 \cdot 10^6 = 21,386 \cdot 10^6 R\$/ano$$

Para o cálculo do VPL, com a equação presente neste trabalho, fez-se necessário o cálculo da renda bruta com a venda de energia (C). De acordo com a literatura, este valor varia entre 100 R\$/MWh a 500 R\$/MWh, no entanto, neste trabalho, utilizaremos três valores desta vargem: 100, 250 e 500 R\$/MWh. Para termos este valor apenas em R\$ devemos multiplicá-lo pela energia, logo:

$$E = P \cdot t \cdot f_c$$

Onde: P= potência gerada (250 kW)

t = tempo de operação plena (8 meses ou 5.760 horas)

f_c = fator de carga, uma vez que não há necessariamente operação de 24h (0,6)

Logo:

$$E = 250 \cdot 10^3 \cdot 5760 \cdot 0,6 = 864 MWh$$

Como dito anteriormente, multiplicando a quantidade de energia pelos valores fornecidos pela literatura, tem-se o seguinte:

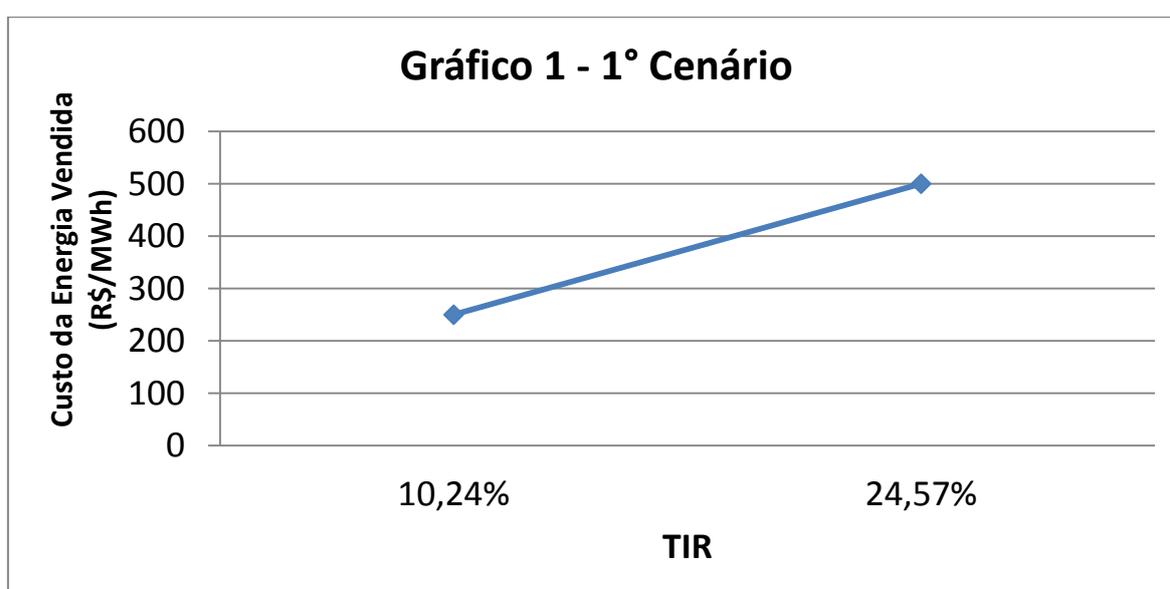
Tabelas 6 - Valores de VPL para variação do custo de venda da energia com variação de i para o 1° cenário

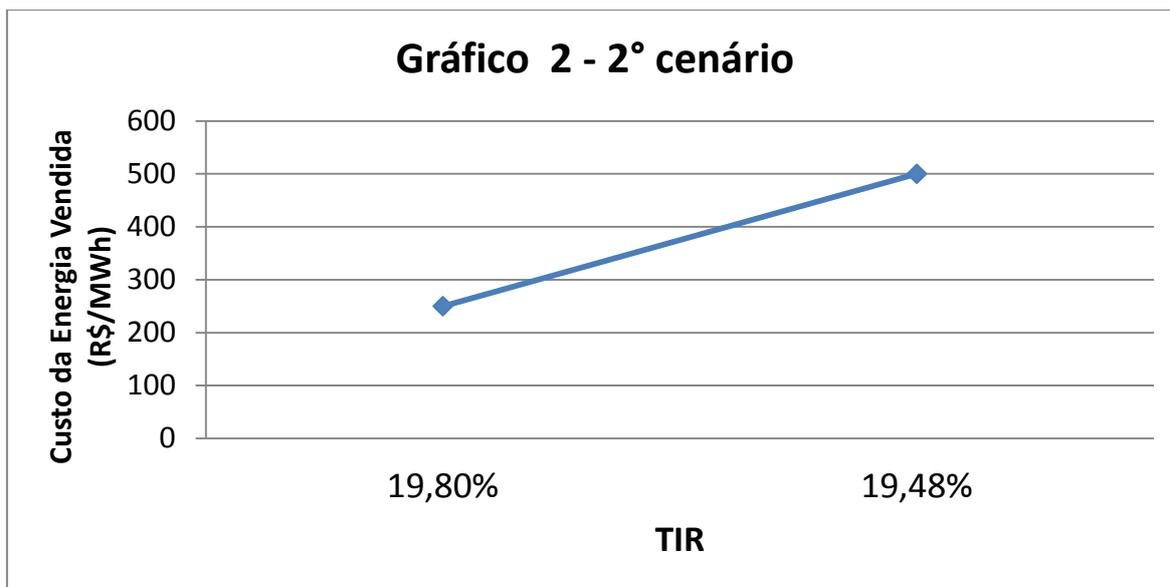
Sem a compra do Bagaço				
Custos (R\$/MWh)	Energia (MWh)	Custos (R\$)	VPL	VPL
100	183168	18316800	-239770011,3	-307402390,4
250	183168	45792000	75368368,21	-173609713,3
500	183168	91584000	600599000,6	-14036013,41

Tabela 7 - Valores de VPL para variação do custo de venda da energia com variação de i para o 2° cenário

Com a compra do Bagaço				
Custos (R\$/MWh)	Energia (MWh)	Custos (R\$)	VPL	VPL
100	183168	18316800	-310539425,2	-330298821,4
250	183168	45792000	4598954,288	-350989600
500	183168	91584000	-352659360	19332774,91

As tabelas 6 e 7 são referentes aos cálculos de VPL para os dois referidos cenários. Desta forma, é possível a plotagem dos gráficos das variações dos custos da venda de energia pelos respectivos valores da TIR. Observa-se, num primeiro momento, para ambos os cenários, que apenas os valores referentes a 250 e 500 R\$/MWh são viáveis de se calcular a TIR, uma vez que ambos os valores para 100 R\$/KWh são negativos.





CONCLUSÕES

Conclui-se num primeiro momento, sendo de suma importância ressaltar que os processos de cogeração são considerados sistemas que proporcionam aumento na eficiência energética no aproveitamento do combustível. De acordo com Rosa (1998), a conscientização e racionalidade da importância da cogeração devem-se à economia de combustível perante a configuração convencional utilizada composta por processos diferentes que produzem igual e separadamente as quantidades de energia elétrica, calor útil e trabalho.

Segundo pesquisas, o setor sucroenergético é o que mais utiliza o processo de cogeração. Na região centro-oeste, em especial no Estado de Mato Grosso do Sul, foco deste trabalho e futura segunda fase desta pesquisa, observou-se grande instalação de Usinas Sucro-alcooleiras, desta forma, como sequência, propõe-se trabalhar com dados coletados de duas Usinas da Região da Grande Dourados no referido Estado, uma vez que estas já estão produzindo excedentes de energia elétrica para comercialização no Sistema Integrado Nacional (SIN) nos leilões de energia elétrica. A preocupação e interesse pela pesquisa expandem-se economicamente observando-se além do aproveitamento do bagaço resultante da própria produção como combustível, também o fato de o açúcar e álcool requerem energia térmica e permitirem um rateio dos custos de produção com a eletricidade.

Com os dados requeridos e fornecidos pela usina, foi possível o cálculo do VPL e TIR para os dois cenários. Desta forma, o que se pode observar, com variações nos valores do custo da energia vendida entre 100 e 500 R\$/MWh, é que apenas com os valores de 250 e 500 R\$/MWh foi possível o cálculo da TIR. Para o primeiro cenário a TIR de 10,24% já viabiliza o empreendimento, inclusive sendo menor que a taxa de mercado que é de 12%; já para o segundo cenário os melhores valores da TIR são acima de 19%.

AGRADECIMENTOS

Ao CNPq pela bolsa concedida e à UFGD pela disponibilidade da infraestrutura.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=2&fase=3>. Acesso em: 05.08.2012
- BALESTIERI, J.A.P. Cogeração – Geração Combinada de Eletricidade e Calor. 1 ed. Florianópolis. Editora da UFSC, 2002, v.1. 279 p.
- BALESTIERI, J. A. P.; ERNST, M. A. B. Efeitos da Variação da Demanda Energética na Viabilidade Econômica de um Sistema de Cogeração. 6 f. Departamento de Energia – DEN, UNESP, 1999.
- BEJAN, A.; JOHN WILEY & SONS. Advanced Engineering Thermodynamics, New York, 1988, 850 p.
- BEN – Balanço Energético Nacional, 2013. Disponível em: https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2013.pdf Acesso em: 15.04.2013
- BIODIESEL. Nova Cana. Disponível em: <http://www.biodieselbr.com/energia/alcool/cogeracao-energia-etanol.htm> Acesso em: 18.05.2014 às 18h20min
- BRANDÃO, R.; CASTRO, N. J.; DANTAS, G. A.; LEITE, A. L. S. Bioeletricidade e a indústria de álcool e açúcar: possibilidades e limites. Rio de Janeiro: Synergia: Eletrobrás: GESEL, UFRJ, 2008.
- COELHO, S.T., Mecanismos para Implementação da Cogeração de Eletricidade a partir da Biomassa: um Modelo para o Estado de São Paulo. 1999. 275 f. (Tese de Doutorado) – IEE-USP, São Paulo, 1999.
- COGEN – Associação da Indústria de Cogeração de Energia – SP, 2007. Disponível em: <http://www.cogen.com.br/> Acesso em: 21.04.2014
- CTEnerg – Secretaria Técnica do Fundo Setorial de Energia. Geração de Energia Elétrica a partir de Biomassa no Brasil: situação atual, oportunidades e desenvolvimento. Disponível em: http://www.cgee.org.br/arquivos/estudo003_02.pdf.
- Instituto Nacional de Eficiência Energética – INEE. Disponível em: http://www.inee.org.br/forum_ger_distrib.asp
- GITMAN, J. L. Princípios da administração financeira. São Paulo: Harper & Row, 1984.
- HORLOCK, J. H. Cogeneration-combined heat and power (CHP): thermodynamics and economics. Florida: Krieger, 1997. 226 p.
- LEITE, C.P.; TRIBESS, A. Seleção de Centrais Termoelétricas utilizando Gás Natural e Bagaço de Cana. 16 f. (Dissertação de Mestrado), Departamento de Engenharia Mecânica, USP, São Paulo, 2003.

MORAN, M.J., SHAPIRO, H.N; Princípios de Termodinâmica para Engenharia. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

ROCHA, G.; Análise Termodinâmica, Termoeconômica e Econômica de uma Usina Sucroalcooleira com Processo de Extração por Difusão. Faculdade de Engenharia, UNESP. Ilha Solteira – SP, 2010.

ROSA, L.P., New Partnerships for Sustainable Development and Key Issues on Operationalising the Clean Developing Mechanism. Global Change Center. Rio de Janeiro, PPE-COPPE/UFRJ, 1998.

SILVEIRA, S.F.R.; SILVA, J.S.; PINTO, F.A.C.; REZENDE, R.C., Secagem e Armazenamento de Produtos Agrícolas: Composição do Custo de Secagem. Viçosa, pp.221-239, 2000.

SOUZA, D. B.; SOARES, J. A.; SOUZA, P. F. Análise Energética, Exergética e Econômica da Substituição de Caldeira e Turbina: Um Estudo de Caso de uma Usina do Oeste Paulista. FAEN – UFGD. Dourados, 2014.

TAKAKI, A.T., Análise do aproveitamento do gás natural em plantas de cogeração e trigeração de energia em indústrias frigoríficas. 159 f. (Dissertação de Mestrado), Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP, Ilha Solteira, 2006.

UNICA – União da Indústria de cana-de-açúcar. Moagem de cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol - safra 2013/2014. Disponível em: <http://www.unicadata.com.br/historico-de-producao-e-moagem.php?idMn=32&tipoHistorico=4&acao=visualizar&idTabela=1599&safr=2013%2F2014&estado=MS> Acesso em: 15.08.2014

WALTER, A. C. S. Viabilidade e perspectivas da cogeração e geração termelétrica no setor sucroalcooleiros. Tese (Doutorado). Unicamp. Campinas, p. 287. 1994.