

## ANÁLISE DA VIABILIDADE DE SISTEMAS DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DE SUBPRODUTOS DO SETOR SUCROALCOOLEIRO

### ANALYSIS OF THE FEASIBILITY OF SYSTEMS GENERATION OF ELECTRICITY FROM PRODUCTS IN THE SUGARCANE SECTOR

### ANÁLISIS DE LA VIABILIDAD SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICO A PARTIR SUBPRODUCTOS DEL SECTOR DE AZÚCAR Y ALCOHOL

Sibelis Aparecida Tibaldi França Rocha<sup>1</sup>, Jeferson Meneguim Ortega<sup>2</sup>, Paulo Irineu Koltemann<sup>3</sup>, Luciane Meneguim Ortega<sup>4</sup>

#### RESUMO:

A busca por combustíveis alternativos tem apresentado um crescimento acentuado por razões econômicas e ambientais. Um dos recursos renováveis, que têm suscitado grande interesse é a biomassa. No Brasil o cultivo da cana de açúcar tem crescido em aproximadamente 65% entre 2005 e 2013, a utilização dos resíduos do processamento, bagaço e vinhaça, com intuito de geração de energia elétrica (EE), constitui-se como alternativa de comercialização dos excedentes de EE provenientes deste processo. Este trabalho objetiva a elaboração de um modelo de simulação que permita analisar o processo de gestão em

sistemas de geração, sob a ótica do investidor, utilizando como combustível o bagaço e/ou a vinhaça considerando os aspectos técnicos, econômicos e regulatórios do setor elétrico brasileiro. A construção do modelo de simulação será baseada na técnica de dinâmica de sistemas, sendo utilizado como base para análise econômica um modelo, o qual contemple o uso do bagaço e a utilização de ambas (bagaço e vinhaça). Tomou-se como estudo de caso o setor sucroalcooleiro de Mato Grosso do Sul, contextualizando as diversas características dos mecanismos de inserção incentivada para fontes de energia alternativa renovável atualmente em curso. Resultando em um ambiente computacional capaz de analisar e diagnosticar as relações das variáveis de interesse e como cada uma interage com o modelo proposto.

**Palavras-chaves:** Vinhaça; Cogeração; Indústria Sucroalcooleira; Dinâmica De Sistemas.

<sup>1</sup> UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL – UFMS. E-mail: [sibelis.rocha@gmail.com](mailto:sibelis.rocha@gmail.com)

<sup>2</sup> UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL – UFMS. E-mail: [jmortega3@gmail.com](mailto:jmortega3@gmail.com)

<sup>3</sup> UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO SUL – UFMS. E-mail: [paulo.koltemann@ufms.br](mailto:paulo.koltemann@ufms.br)

<sup>4</sup> UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO – USP. E-mail: [luciane.ortega@usp.br](mailto:luciane.ortega@usp.br)

## **ABSTRACT:**

The search for alternative fuels has been intensified due to economic and environmental reasons. One of the renewable resources, which have aroused great interest, is biomass. In Brazil the cultivation of sugar cane has grown by approximately 65% between 2005 and 2013, the use of processing residues, bagasse and vinasse, with the purpose of generating electric energy (ee), is an alternative for commercialization of excess ee. This paper aims to develop a simulation model that allows analyzing the management process in cogeneration systems, from the perspective of the investor, using bagasse and/or vinasse as fuel, considering the technical, economical and regulatory aspects of the brazilian electricity sector. The construction of a modeling simulation methods will be based on the dynamics of the system being used and as an economical analysis, which contemplate the use of bagasse and both bagasse and vinasse. Was taken as a case study of the sugarcane sector of Mato Grosso do Sul, contextualizing the various characteristics of mechanisms used to encouraging use of alternative renewable energy sources. Resulting in a computing environment capable of analyzing and diagnosing the

relationship between variable percentual of interest, and how each interacts with the proposed model.

**Descriptors:** Vinasse; Co-Generation; Sugar Industry; System Dynamic.

## **RESUMEN:**

La búsqueda de combustibles alternativos ha mostrado un fuerte crecimiento por razones económicas y ambientales. Uno de los recursos renovables, que han atraído gran interés es la biomasa. En Brasil, el cultivo de la caña de azúcar ha crecido en aproximadamente un 65% entre 2005 y 2013, el uso de tratamiento de los residuos, el bagazo y la vinaza, con el propósito de la generación de energía eléctrica (EE), se estableció como la comercialización alternativa de exceso de EE de este proceso. Este trabajo tiene como objetivo el desarrollo de un modelo de simulación que permite analizar el proceso de gestión de los sistemas de cogeneración, desde la perspectiva del inversor, utilizando bagazo como combustible y / o vinaza teniendo en cuenta los aspectos técnicos, económicos y regulatorios del sector eléctrico brasileño . La construcción del modelo de simulación se basa en la técnica de la dinámica del sistema, se utiliza como base para el

análisis económico de un modelo, que contempla el uso de bagazo y el uso de ambos (bagazo y vinaza). Se tomó como un estudio de caso del sector de la caña de Mato Grosso do Sul, contextualizando las diferentes características de los mecanismos de inserción alentados por las energías alternativas renovables actualmente en curso. Resultando en un ambiente computacional capaz de analizar y diagnosticar la relación de las variables de interés y cómo cada uno interactúa con el modelo propuesto.

**Palabras clave:** Vinaza. Generación. Industria Azucarera. Los Sistemas Dinámicos.

## 1. INTRODUÇÃO

Há muito tempo, o crescimento do mercado exige melhoria da qualidade do fornecimento de energia elétrica associado ao ritmo de crescimento econômico do país. Assim existe uma exigência em estabelecer políticas energéticas que possibilitem a estabilidade regulatória necessária para atrair investimentos privados para desenvolvimento do setor elétrico (SE).

Esse quadro vem fortalecendo opiniões e promovendo decisões em favor da criação de oportunidades para

o avanço dos sistemas de Geração Distribuída, o qual pode contribuir para desobstruir as linhas de transmissões existentes e garantir uma maior confiabilidade no transporte de grandes blocos de energia entre as regiões. E mais ainda, a previsão do uso de veículos elétricos agravando a demanda por energia, o que levaria num aumento nos riscos associado ao fornecimento de energia elétrica. Além de permitir, segundo Rodrigues (2007), uma diversificação das tecnologias empregadas para produção de energia.

No final do século passado Coelho (1999) identificou barreiras tecnológicas, políticas, institucionais, econômicas e financeiras, que inviabilizavam o desenvolvimento de um programa de cogeração a partir do bagaço, que permitisse a comercialização de excedente de energia elétrica (EE) no Brasil.

Um dos primeiros trabalhos relacionados com o uso do biogás da vinhaça para transformação em eletricidade foi o de Almança (1994), que apresentou uma alternativa de aproveitamento desse resíduo. Para tanto, adotou a tecnologia de digestão anaeróbia de alta eficiência através de digestores de fluxo ascendente para a produção de biogás e, uma vez

purificado, o aproveitamento desse gás em motores e turbinas.

Segundo Salomom (2009), a produção de álcool no Brasil vem se firmando como principal fonte alternativa de energia. O aumento na produção da indústria canavieira gera consequentemente, uma maior quantidade de subprodutos, que representam um potencial significativo de uma fonte renovável no setor energético. O bagaço é aproveitado como fonte energética dentro da própria usina, já a vinhaça, principal efluente da produção de álcool, vem chamando a atenção das autoridades sanitárias e ambientais, que visam formas eficientes ao seu descarte, associada à busca por combustíveis renováveis, de modo que o processo de digestão anaeróbia desse composto tornou-se foco de pesquisas, a fim de se obter alternativas ao uso destes resíduos.

O Estado de Mato Grosso do Sul (MS) devido à expansão da indústria canavieira, pode contribuir para a descentralização da geração de energia pela cogeração a partir da biomassa, usando como fonte o bagaço da cana de açúcar e também a vinhaça na produção de biogás.

Conforme informações divulgadas pela Associação de

Produtores de Bioenergia de Mato Grosso do Sul (BIOSUL, 2013), o setor sucroenergético em Mato Grosso do Sul fechou a safra 2012/2013 com a exportação de 1.292 GWh de energia, um crescimento de 17% em relação a safra passada (2011/2012). Atualmente, das 24 usinas de cana de açúcar em MS, nove fazem a cogeração de eletricidade a partir do bagaço. Considerando a previsão para expansão do setor sucroalcooleiro no Estado, o parque de cogeração de EE pode passar de 3GW em 2015.

Neste contexto, a proposta deste trabalho é analisar além da modelagem do uso do bagaço da cana, a viabilidade de sistemas de cogeração de energia elétrica a partir do uso em conjunto com a vinhaça. A identificação e o equacionamento das diversas influências dos aspectos técnicos e econômicos associados à possibilidade de diferentes participações nos mercados de comercialização de EE tornam a análise dos riscos e das oportunidades associadas aos aspectos regulatórios um aspecto primordial no processo de tomada de decisão dos agentes geradores do setor sucroenergéticos.

## 2. COGERAÇÃO A PARTIR DA VINHAÇA

A vinhaça é o principal efluente da produção de etanol proveniente da cana de açúcar, Pereira (2004). Ela é composta por 93% de água, 7% de sólidos, tem mau cheiro, pH ácido, níveis elevados de sal (entre 24.000 a 80.000 mg/l) e material orgânico entre 4.000 a 64.000 mg/l. Este efluente tem também altas concentrações de potássio, cálcio, magnésio, enxofre e nitrogênio.

Luz (2010) a partir da avaliação termodinâmica e termoeconômica com o uso da análise exergética em seus resultados chegou à conclusão que a gaseificação da vinhaça possibilitava um aumento significativo na geração de EE da plantada da usina sucroalcooleira, para uma mesma moagem.

O biogás a partir da vinhaça é considerado um combustível gasoso que possui um conteúdo energético muito elevado e alto poder calorífico. É composto de: metano (CH<sub>4</sub>): 55 – 70% do volume de gás produzido; dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>): 30 – 45% do volume total; e traços de hidrogênio (H<sub>2</sub>), nitrogênio (N<sub>2</sub>), oxigênio (O<sub>2</sub>) e gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S), entre outros.

Para Salomon (2007) a biodigestão anaeróbia da vinhaça surge como uma alternativa de produção de

biogás como fonte energética considerando esta “nova vinhaça”. O processo de biodigestão não reduz o problema atual da vinhaça obtida pelo processo convencional, que é o alto teor de potássio, porém este processo reduz a carga orgânica que é um problema nas regiões onde se localizam as usinas, mas não foi analisada a morte das bactérias.

Há diversos tipos de tratamentos anaeróbios para a vinhaça, entretanto, de acordo como Granato (2002), o mais utilizado é o reator UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), já que este funciona em temperatura ambiente e permite a aplicação de uma alta carga orgânica ao reator, favorecendo os processos biológicos, segundo Helbel (2009).

De acordo com Nigri (2011), o processo de tratamento de vinhaça por reatores UASB, se dá da seguinte maneira: A vinhaça inserida no reator entra em contato com o leito de lodo causando a absorção de grande parte da matéria orgânica, proporcionando a formação de gases, principalmente o metano, pela atividade anaeróbia de microorganismos contidos no lodo. Esta etapa ocorre no compartimento denominado câmara de digestão. O reator possui um separador trifásico que



O DLC do investimento em tecnologia para produção de EE ilustrado pela Figura 1 apresenta três laços de realimentação negativos e um laço positivo que influenciam nos indicadores econômicos (VPL - Valor Presente Líquido, TIR - Taxa Interna de Retorno e PBD - Payback Descontado). Os laços negativos representam a influência a partir do próprio investimento nas tecnologias, no aumento do investimento na conexão e no aumento dos custos com as tarifas de uso dos sistemas de distribuição e/ou transmissão que aumenta as despesas resultantes do aumento da EE disponível para exportação.

O laço positivo representa o aumento das Receitas, com o aumento da produção de EE disponível para a exportação, automaticamente mais energia estará disponível para ser comercializada e conseqüentemente aumentando as receitas com contratos. E ainda os contratos de venda de energia resultante das diversas combinações de vendas nos diferentes ambientes e opções de biomassas (bagaço e/ou vinhaça).

Tomou-se como base para o desenvolvimento do simulador os trabalhos de Silva (2006) e de Oliveira (2010), os quais se basearam na

premissa básica de que a melhor opção de cogeração em MW médios (garantia física do empreendimento), será a que determinará um maior VPL, para cada cenário de investimento versus energia comprometida nos contratos registrados na Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE em relação a produção de EE a partir do bagaço.

A partir do resultado obtido da análise dos índices econômicos (VPL, TIR e Payback) resultantes da comercialização da energia gerada em cada opção tecnológica, este trabalho permite simular o reflexo do aproveitamento da vinhaça em conjunto com o bagaço na produção de EE.

O modelo de simulação foi construído utilizando-se o DLC apresentado na Figura 1 no *software* de simulação *Powersim Studio Enterprise 2003* integrado com o *Microsoft Excel* como base de dados, para implementação e simulação através dos DEF.

### 3.2 Modelagem Matemática

Através do equacionamento dos aspectos tecnológicos, de comercialização e mercado, e regulatórios na busca de resultado econômico, o modelo permite a

construção de um banco de dados (BD) que descreva a evolução destes indicadores econômicos TIR e VPL para diferentes participações nos mercados de comercialização de EE.

A modelagem matemática do módulo técnico, se inicia com o cálculo da Produção de Biogás (PB) pela biodigestão anaeróbica a partir da vinhaça, em m<sup>3</sup>/ano, a qual pode ser expressa como:

$$PB = CO \times E \times F \times 365 \quad (1)$$

Em que: E = % da eficiência de remoção de DQO, com 65%; F = Fator de conversão de biogás por DQO removido, considerado 0,35 N.m<sup>3</sup>/kg.

A carga orgânica (CO), em kg.DQO/dia pode ser expressa como o produto do volume de vinhaça produzida (VVG), em m<sup>3</sup>/ano, pela produção teórica de metano (DQO), adotado o valor fixo 24 lg/m<sup>3</sup>. Isto é:

$$CO = VVG \times DQO \quad (2)$$

Sendo o método para cálculo do Volume de Vinhaça Produzida (VVG) em relação à produção de álcool, dada em l/ano expressa pela equação abaixo:

$$VVG = 100 \times (VAV / AV\%) \times 365 \quad (3)$$

Em que: VAV = Volume de álcool por ano, em m<sup>3</sup>/dia; AV% = Fator de vinhaça adotado 12 m<sup>3</sup> de vinhaça/ m<sup>3</sup> de álcool.

A quantidade de energia do biogás (QEB):

$$QEB = PB \times PCIB \quad (4)$$

Em que: PCIB = Poder calorífico inferior do biogás, considerado 36.738kJ/m<sup>3</sup>.

A Produção de Energia Elétrica a partir do Biogás (PEEB), em W, utilizando o conjunto de turbinas é dado por:

$$PEEB = QEB \times E_1 \times \%VEE \quad (5)$$

Em que: E<sub>1</sub> = eficiência da turbina a gás, considerada 32%; %VEE = % de vinhaça utilizada para geração de EE.

Pela definição da ANEEL, a energia de referência (ER) de empreendimento de geração termelétrica movida a biomassa é calculada a partir do valor da potência instalada, em MW, do tipo de combustível utilizado, do valor esperado para cada mês do PCI, do consumo do combustível em kg/dia e do rendimento (razão entre a EE gerada e a energia térmica do combustível), ou seja:

$$E_i = PCI \times Q_i \times R_i \times \left( \frac{I}{86.400} \right) (kW_{\text{médio}}) \quad (6)$$

$$\bar{E} = \frac{\sum_{i=1}^{12} E_i}{12} (kW_{\text{médio}}) \quad (7)$$

$$ER = \frac{\bar{E}}{1.000} \times \left( 8760 \frac{h}{\text{ano}} \right) (MWh/\text{ano}) \quad (8)$$

Em que:  $E_i$  é a capacidade de produção de EE da usina termoelétrica (UTE) no mês;  $\bar{E}$  ( $kW_{\text{médio}}$ ) é o valor esperado da produção de EE no mês; ER (MWh/ano) é a energia de referência da UTE; PCI (hJ/kg) é o Poder Calorífico Inferior do bagaço ou/e da vinhaça;  $Q_i$  (kg/dia) é o valor da média mensal do consumo do bagaço de cana e biogás proveniente da vinhaça;  $R_i$  é o valor médio esperado do rendimento elétrico global da usina (adimensional).

A potência do gerador é calculada a partir dos valores empíricos estabelecidos para a Disponibilidade Energética Máxima do empreendimento (em MW médios), através das variáveis representadas na fórmula abaixo:

$$Disp\_Max = Pot * FC_{\text{max}} * (1 - TEIF) * (1 - IP) \quad (9)$$

Em que: Pot é a potência habilitada (kW);  $FC_{\text{max}}$  é o fator de potência disponível para fins de modelagem energética; TEIF é o índice esperado de

indisponibilidade forçada; IP é o índice médio de indisponibilidade programada.

No módulo técnico também é executado o processo de alocação mensal do montante anual de energia gerada (sazonalização da EE), seja de um contrato ou a energia assegurada de uma usina. No caso dos montantes contratados como Energia de Reserva, as opções de sazonalização seguiram os padrões adotados nos leilões de energia do Ambiente de Contratação Regulada - ACR. Cada usina informa a disponibilidade mensal de energia em MW med. As opções de sazonalização foram obtidas pela análise das garantias físicas sazonalizadas das 67 usinas que se cadastraram para o Leilão de Energia de Reserva de 2008, onde foram clusterizados os tipos básicos de sazonalização nas usinas de MS.

Adotando diferentes tecnologias para a geração de EE, combinada com a eletrificação do processo (picador, moagem, etc) e redução da demanda do vapor, tem-se os casos associado ao bagaço: Caso I e II – Contrapressão;

Caso III, IV e V – Condensação. A Tabela 1 apresenta os parâmetros associados a cada um dos casos

propostos, considerando o bagaço como energético:

**TABELA 1 - Hipóteses adotadas para a simulação de diferentes tecnologias do bagaço**

Parâmetro	Unidade	Caso I	Caso II	Caso III	Caso IV	Caso V
Pressão do Vapor	bar	22	40	65	92	120
Temperatura do vapor	°C	300	350	510	520	550
Demanda de vapor processo	kg/tcana	500	500	402	402	402
Eficiência nominal da Turbina Vapor	%	68	75	85	85	87
Geração específica - Excedente	kWh/tcana	15	35	70	80	100

Fonte: Relatório A&C 030/07

Quando se considera a vinhaça agregada ao bagaço, temos a Potência Instalada (PI) dada pelas equações 10 e 11:

$$PI = P_{bagaço} + P_{vinhaça} \quad (10)$$

$$P_{vinhaça} = n_{gerador} \times S \times CB \quad (11)$$

Em que:  $P_{bagaço}$ : Potência produzida pelo bagaço consideradas as opções tecnológicas da Tabela 1;  $P_{vinhaça}$ : Potência Ativa produzida pela vinhaça; CB: Quantidade de Biogás a ser utilizada pelo gerador dado a potência aparente, em  $m^3/hora$ ;  $n_{gerador}$ : quantidade de geradores e S: potência ativa do gerador à Biogás, em kW, conforme Tabela 2.

**TABELA 2 – Grupos Geradores a Biogás**

Modelo	Contínuo		Peso	Dimensões (mm)		Consumo
	Kva	Kw	Kg	Comp.	Larg.	( $m^3/h$ )
SG - 25B	25	20	520	1300	700	11
SG - 40B	40	32	545	1300	700	17
SG - 50B	50	40	545	1300	700	22
SG - 75B	75	60	1200	2500	900	33
SG - 90B	90	72	1300	2500	900	40
SG - 100B	100	80	1300	2500	900	44
SG - 125B	125	100	1950	3200	1100	55
SG - 150B	150	120	2120	3200	1100	66

Fonte: Grupo FOCKINK, Outubro de 2012. www.fockink.ind.br

No Módulo de Comercialização e Mercado são considerados os diversos cenários de simulação estabelecendo-se um percentual de energia a ser comercializado em cada mercado. A receita proveniente da venda em cada mercado é estabelecida a partir das projeções dos preços considerando-se os contratos firmados nos leilões realizados pela ANEEL desde 2008, a expectativa de aumento e/ou retração de preços, alterações regulatórias ou de acordo com a percepção empreendedora do investidor.

Como no Brasil há uma enorme quantidade de rios, a maior parte da EE disponível é proveniente de grandes usinas hidrelétricas, neste contexto, é importante observar a tendência hidrológica do futuro para se definir quando comercializar EE no Ambiente de Contratação Livre - ACL, pois o comportamento do preço nesse ambiente é inversamente proporcional ao nível dos reservatórios das hidrelétricas, (PELLEGRINI, 2009).

Observados as restrições legais (comercialização de energia exclusivamente em um dos mercados: ACR, ACR-ER - Ambiente de Contratação Regulada – Energia de Reserva), na busca pela melhor solução para comercialização, foram definidos

diferentes cenários de comercialização de EE, desconsiderando o PROINFA - Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica, pois este somente se caracterizou como um ambiente de comercialização para aqueles que participaram até 2010 na 2ª edição: Ambiente 1: ACR, ACL e GD - Mercado de Geração Distribuída, e Ambiente 2: ACR-ER, ACL e GD.

Dessa forma a receita global de cada mercado de comercialização de EE é determinada pelo somatório das receitas mensais obtidas pelos valores comercializados em cada mercados dos dois ambientes, conforme detalhado na equação 12,

$$REC_k = \sum_{i=1}^n (ICB(i) \times DISP_{med-k}(i)) \quad (12)$$

Em que:  $REC_k$ : é o somatório do valor obtido no período de “n” meses de simulação pela comercialização nos ambientes k: ACR, ACR-ER, ACL ou GD em R\$; n: é o número total de meses do horizonte de simulação; i: é o mês corrente da simulação;  $ICB(i)$ : é o preço simulado para o mês “i” com venda nos leilões A-3 ou A-5 do mercado ACR, venda nos leilões de Energia de Reserva – ER, energia elétrica no mercado ACL, ou a comercialização direta com a

distribuidora no GD em R\$/MWh; e  $DISP_{med-k}(i)$ : é a disponibilidade mensal da usina comprometida em contratos no ACR nos leilões A-3 ou A-5; no ACR-

A partir das observações do PLD - Preço de Liquidação das Diferenças considera-se a expectativa de aumento nos preços de energia no ACR, estabeleceu-se como padrão de reajuste do preço do MW em função do índice de precipitação de quatro regiões do Brasil: Sudeste e Centro Oeste – SE/CO, Sul – S, Norte – N e NE – Nordeste. O valor do MW no ACL é definido como:

$$Preço_{ACL[m]} = PLD_{Med[m]} - (PLD_{Med[m]} \times P_{mês[m]}) \quad (13)$$

Em que:  $P_{mês[m]}$  é o índice de precipitação observada no mês para o tipo de sazonalização escolhido;  $PLD_{Med[m]}$  é o valor médio do PLD no mês, mais previsão considerando a expectativa de aumento nos preços de energia nesse mercado.

As penalidades previstas no artigo 6º da Resolução ANEEL nº 109, de 26 de outubro de 2004 (Convenção da Comercialização) dada pela equação 14 e as receitas provenientes das liquidações do mercado de curto prazo a serem contabilizadas pela CCEE, conforme a equação 12 com  $k = ACL$ :

ER, nos leilões de Energia de Reserva, contratos no ACL, ou contratos obtidos pela comercialização direta com a distribuidora no GD em MW médios.

$$Penalidade = E \times Máx(\bar{X}_{PLD}, VR) \quad (14)$$

Em que: E é o montante de insuficiência de lastro;  $X_{PLD}$  é a média ponderada mensal dos PLDs dos períodos de apuração em que se verificou a insuficiência de lastro; VR é o valor médio ponderado de aquisição de energia proveniente de novos empreendimentos de geração.

Segundo a CCEE (2012), o PLD é utilizado para valorar a energia comercializada no mercado de curto prazo e se faz pela utilização dos dados considerados pelo ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico para a otimização da operação do SIN - Sistema Interligado Nacional. Logo o valor do PLD utilizado no modelo foi considerado a partir da evolução do valor médio em carga leve, média e pesada, calculado pelas médias de valores divulgados semanalmente para o submercado Sul no período de 2009 a 2012.

Neste trabalho a Garantia Física Operacional – GFO pode ser alterada dada a possibilidade da morte das

bactérias que interrompe a produção de biogás pela biodigestão anaeróbica, e assim disponibiliza menor quantidade de EE para exportação e consequentemente gerando penalidade pelo não cumprimento do contrato no período do ocorrido. Gerando a necessidade de recorrer ao ACL para suprir a EE que não foi despachada. Logo esta característica foi modelada para suprir tal queda na produção de energia contratada, considerando a morte das bactérias no começo, meio e fim do período de 15 anos e a combinação dessas opções. E assim determinar qual a contratação ótima da geradora no ACR que minimiza o custo associado às penalidades e prejuízos por subcontratação no ACL.

No Módulo Regulatório são simulados os custos atribuídos pela regulação do setor elétrico e, consequentemente, imputados aos agentes de geração de energia elétrica. Os custos tratados neste módulo são: uso dos sistemas de distribuição e transmissão; encargos dos sistemas de distribuição e transmissão; conexão aos sistemas de distribuição e transmissão; contratação de energia para entressafra; e fiscalização ANEEL. Os aspectos regulatórios além dos já citados, terão influência na penalidades quando for interrompido o fornecimento de EE

contratada.

O Módulo Econômico do simulador foi projetado para retornar a solução das equações dos principais indicadores que determinam o retomo do investimento a partir do fluxo de caixa (FC), tais como Laponi (2006): o VPL, o PBD e a TIR. A análise econômica estabelecida para o modelo considerou o FC como o elemento básico para a avaliação dos projetos de cogeração, para cumprir o objetivo do simulador, considerou-se como função objetivo maximizar o VPL, para isso aplicou-se a equação 16:

$$Max(VPL) = Max\left(\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} - I\right) \quad (16)$$

Sujeito as restrições regulatórias, de contratos, conexão, etc.

Em que: I: é o valor do investimento inicial;  $FC_t$ : é o montante de caixa recebido e gasto pela usina, específico para os custos relacionados à cogeração de EE, no mês t (Fluxo de Caixa); k : é valor da taxa requerida de juro, ou seja, a taxa mínima de atratividade (TMA) escolhida; e n: é o número total de meses(180) do horizonte de simulação.

A avaliação de projetos pelo método da TIR é a taxa de desconto que iguala o VPL dos FC de um projeto a zero. Este trabalho adotou a proposta de Lapponi (2006) para tomada de decisão do investimento.

Quando a TIR for maior que a taxa mínima de atratividade (TMA -  $k$ ), o VPL será maior que zero, ou seja, não será necessário completar todo o prazo da simulação para recuperar o investimento inicial. Nesses casos haverá um prazo menor que o prazo da simulação  $n$ , para isso denominou *Payback* Descontado (PBD). Para aplicar o método PBD, é necessário definir o tempo máximo tolerado (TMT) definido pela empresa, em nosso caso 15 anos, para recuperar o capital investido e remunerado. Também é necessário que haja apenas uma mudança no sinal dos FC.

Baseado nestes indicadores será fornecido ao investidor dentre os cenários simulados qual apresenta o melhor retorno do investimento, bem como, os demais cenários de comercialização de EE que apresentam a TIR superior a TMA, a qual representa uma medida de lucratividade dos projetos. Como não podemos garantir que o VPL dos resultados das simulações do modelo dos diferentes

ambientes de comercialização de EE se apresenta de maneira ordenada, optamos por utilizar o método de busca exaustiva.

### **3.3 Metodologia para Obtenção dos Dados**

Na formação do BD que serviu de base para a implementação do modelo e para a montagem dos cenários de simulação foi obtidos por meio de pesquisas bibliográficas, simulação e pesquisa documental do setor de geração, transmissão e distribuição. Os dados utilizados no simulador são: dados de contratos; dados de conexão e dados da central termelétrica.

Os parâmetros para o estabelecimento dos dados de simulação especificados para os insumos que alimentarão a usina termelétrica em relação ao bagaço foram estimados a partir dos valores obtidos pelas médias das usinas que atualmente operam no MS. Parâmetros em relação à vinhaça dos dados de simulação especificados foram citados nas equações de 1 a 5, com exceção do Fator de álcool e açúcar - porcentagem da produção de álcool em relação ao açúcar das usinas sucroalcooleiras, estes estão em média de 30% de açúcar e 70% de etanol, dependendo do mercado interno e externo esses valores variam.

E temos ainda razão da vinhaça/álcool - Proporção de vinhaça em relação ao álcool produzido em litros. Fator de produção de vinhaça em média é de 12m<sup>3</sup> de vinhaça/m<sup>3</sup> de álcool, segundo (VAN HAANDEL, 2008); Razão álcool /tcana - Rendimento de litro de álcool por tonelada de cana, próximo de 70l; Especificações do gerador: consta do volume máximo do reservatório próximo de 5400m<sup>3</sup>/dia.

#### 4. RESULTADOS

Foram utilizados na análise econômica diferentes opções de tecnologia do bagaço pelo tipo de caso, conforme Tabela 1 e as informações da vinhaça: EE a partir do biogás da vinhaça: 100%; grupo gerador: SG100B - 80 kW; preço do biodigestor: R\$ 13.500.000,00.

Para os diferentes casos apresentados pela Tabela 1 os seguintes

parâmetros permaneceram fixos, dado a característica do estado de MS e do impacto no Fluxo de Caixa (FC): Safra: moagem anual estimada de 3 milhões de toneladas de cana; Comprimento da LT para conexão da usina: 10 km; Tensão de conexão: 138 kV.

Para simulação utilizou-se tabelas como a Tabela 3, onde se apresentaram os resultados de cada um dos casos testados para o grupo gerador SG25B. Nessas tabelas foram levados em consideração o comportamento dos tipos de grupos geradores (SG25B a SG150B conforme a Tabela 2) com os cinco casos de tecnologia do bagaço da Tabela 1, com escolha de mercado (ACR, ACR-ER, ACL e GD) em %, a garantia física em MW, a EE anual para exportação em MWh e é mostrado seu comportamento econômico (investimento previsto em EE) em R\$ para cada cenário.

**TABELA 3 - Bagaço e Vinhaça-Simulação sem morte de bactérias e sem financiamento do biodigestor-SG25B**

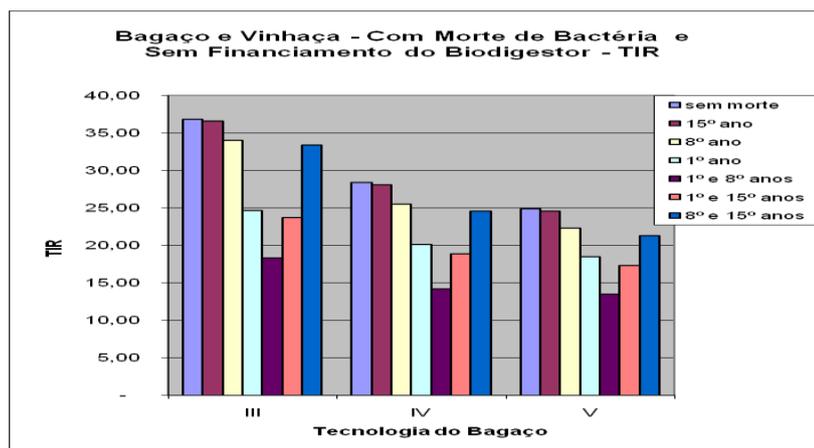
Variáveis do Modelo	I	II	III	IV	V
EE anual para exp. (MWh)	104.684,03	164.503,47	269.187,50	299.097,22	359.930,56
Garantia Física (MW)	11,95	18,75	30,73	34,14	40,97
Inv. Previsto em EE (R\$)	62.694.005,25	103.082.716,75	174.467.765,35	239.121.828,43	303.478.660,37
VPL (R\$)	10.577.177,31	16.737.236,44	27.094.457,85	3.366.809,03	444.854.004,09
TIR (%)	21,20	20,90	20,61	15,53	14,39
PBD (Meses)	89,00	92,00	94,00	124,00	-
Com. no ACR (%)	-	-	-	-	-
Com. no ACR-ER (%)	-	-	-	-	-
Com. no ACL (%)	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
Com. no GD (%)	-	-	-	-	-

O primeiro cenário a ser simulado foi de cogeração onde verificou-se a comercialização em diferentes ambientes de contratação, com o comportamento de todos os 8 tipos de grupos geradores da Tabela 2 e com os 5 casos de tecnologia do bagaço, sem a morte das bactérias e sem o financiamento do biodigestor no período. Verificou-se que o caso I seria o mais beneficiado com a introdução do biogás a partir da vinhaça, sendo estes as usinas tradicionais do final dos anos 90; o caso II são as usinas convencionais que sofreram modificações para aumentar a quantidade de energia excedente, enquanto a partir do caso III refletem as condições das novas usinas sucroalcooleiras funcionando ou a serem implantadas.

No cenário 2 foi considerado a simulação com o comportamento dos 5 casos de do bagaço, sem a morte das bactérias no período, mas com o

financiamento do biodigestor, de quatro grupos geradores: SG25B, SG75B, SG100B e SG150B, e é feita a comparação através da TIR para cada caso. Verificou-se que a TIR aumenta com o financiamento do biodigestor em todos os casos de tecnologia nos grupos geradores escolhidos.

No cenário 3 a simulação é baseada no grupo gerador SG100B - 80 KW, com a morte das bactérias no início, meio e final do período e em conjunto essas combinações, sem o financiamento do biodigestor. Pela Figura 2 percebe-se que o caso III entre os três últimos foi o de maior TIR, com a variação em relação à morte das bactérias no período estudado, mostrando-se o melhor caso.



**FIGURA 2 – Comparação da TIR com morte das bactérias nas opções de tecnologia III, IV e V do bagaço e sem financiamento do biodigestor.**

O cenário 4 é baseado na simulação no grupo gerador SG100B - 80 KW, com a morte das bactérias no início, meio e final do período, com capital externo para o financiamento do biodigestor retornado TIR superior ao do cenário 3.

A avaliação do cenário 5 foi simulada na primeira parte com variação do fator de álcool em relação à produção de açúcar (%), considerando 100% de vinhaça para produção EE e da eficiência de remoção de DQO (65%). Ainda no cenário 5 tem-se uma segunda parte, onde foi simulada a variação do percentual de vinhaça para produção EE e da eficiência de remoção de DQO. É fixado o fator de álcool em relação à produção de açúcar em 100 %. Verificou-se que os percentuais de vinhaça para produção EE e da eficiência de remoção de DQO pouco

influencia na TIR em todas as opções tecnológicas consideradas.

A simulação com as potências incentivadas de 50 MW e 70MW em horizonte de 15 anos conectado à Rede Básica e à Instalação de Transmissão de interesse exclusivo de Centrais de Geração para Conexão Compartilhada (ICG), corresponde a comparação entre as potências, a qual mostrou que somente no caso I obteve alguma variação na TIR com a mudança de potência descrevendo assim o cenário 6.

O cenário 7 simula a variação da porcentagem do PLD utilizada para comercializar a EE excedente, definindo o mercado a ser usado para comercialização, utilizando o biodigestor SG100B.

Por fim definiu-se o cenário 8 considerando a simulação com alteração na política de descontos nas tarifas de

conexão em projetos de cogeração. Como o desconto atribuído a TUST é um incentivo governamental a entrada de fontes alternativas, esta pode ser de 50 a 100% de descontos para empreendimentos com potência de até 30MW, avaliamos as tecnologias com desconto de 100%. Verificou-se quando comparamos com nosso caso base de 50% da TUSD que houve pouca alteração nos indicadores econômicos.

## 5. DISCUSSÃO

Este trabalho apresenta a influência dos aspectos técnicos, econômicos e regulatórios no processo de tomada de decisão associado ao investimento na geração de energia elétrica utilizando biomassa (bagaço e vinhaça).

Através do simulador, políticas governamentais podem ser avaliadas antecipadamente prevendo quais tecnologias devem ser incentivadas e como remunerar adequadamente o investidor, antes de realizar alterações na legislação. Os resultados da simulação de uma usina inserida no Estado de Mato Grosso do Sul, demonstra o impacto dos aspectos regulatórios.

O cenário 2 simulado, considera o financiamento ou não do empreendimento por projetos de mecanismo de desenvolvimento limpo (MDL), a geração de EE para consumo da usina, a comercialização de EE excedente e a comercialização dos créditos de carbonos no mercado de MDL. Percebe-se um aumento na TIR com o financiamento do biodigestor em todos os casos de tecnologia nos grupos geradores escolhidos.

As penalidades pela insuficiência de energia para exportação motivada pela morte das bactérias, objeto do cenário 3, podem alterar significativamente o retorno do investimento, dessa forma é importante para o administrador, a previsão da geração de excedentes de EE no sistema de cogeração para não comprometer a viabilidade do projeto.

Percebe-se pelo cenário 5, na análise bioquímica que leva em consideração as variáveis de percentuais de vinhaça para produção EE, da eficiência de remoção de DQO praticada pela usina e do fator de produção de álcool que tem pouca ou quase nenhuma influência na TIR nas opções tecnológicas estudadas. Quando analisada a sensibilidade à alteração da potência instalada da usina no cenário 6,

verificou-se que a conexão por meio da ICG é uma das opções mais viáveis no Estado de Mato Grosso do Sul.

Para o cenário 7 foi observado que valores menores que 97% do PLD o ambiente de comercialização mais favorável é o GD, o qual não altera os valores de VPL e nem do PBD, apesar das opções de investimento no mercado de Energia de Reserva e dos leilões do ACR ainda se mostrarem as melhores do mercado pela segurança no retorno da receita, mas os preços praticados a partir de 2012 pelo ACL está mudando este cenário. Em MS 80% da energia gerada é comercializada através de contratos bilaterais com uma comercializadora por preço fixo e abaixo dos ambientes de comercialização, com isso expõe o investidor ao risco de lucros menores.

Das várias simulações em conjunto com a análise de sensibilidade, os resultados obtidos demonstraram que a influência de fatores como as variações no reajuste da TUSD e o desconto na TUST não apresenta alteração na TIR desejada, sendo necessárias outras alterações na legislação para que estes empreendimentos sejam viáveis do ponto de vista do investidor. Sendo esta uma das alternativas, dentre as

analisadas a mais atrativa para o investidor, com o governo alterando a legislação em relação a essas taxas e assim viabilizando a venda de EE que contribuiria de forma significativa no aumento ou redução do risco na implementação dessa alternativa, e conseqüentemente, na competitividade de agregar o biogás da vinhaça para a produção de EE nas usinas sucroalcooleiras.

Conclui-se que se o empresário que quer ter êxito na colocação da energia nos diferentes mercados para venda de seus excedentes de EE, as empresas necessitam simular as diversas formas de contratação disponíveis, enfatizando o desenvolvimento de ferramentas computacionais que avaliam a exposição ao risco associado no processo de tomada de decisão.

## REFERÊNCIAS

1. ALMANÇA, R. A. Avaliação do use da vinhaça da cana-de-açúcar na geração de energia elétrica (Estudo de caso). Dissertação (Mestrado). Programa Inter-unidades de Pós-Graduação em Energia - PIPGE - Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994.
2. ANDRADE, A. L.. Pensamento sistêmico: um roteiro básico para perceber as estruturas da realidade

- organizacional. PPGEP/UFRGS, Porto Alegre, RS, Brasil. REAd – Revista Eletrônica de Administração. Edição 5, v.3, nº 1, 1997.
3. BIOSUL – Associação dos Produtores de Bioenergia de Mato Grosso do Sul. Disponível em: [http://www.biosulms.com.br/images/mapa\\_biosul\\_final\\_grande.jpg](http://www.biosulms.com.br/images/mapa_biosul_final_grande.jpg). Acesso em: 07/03/2013
  4. CCEE - Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. Disponível em: <http://www.ccee.org.br/>. Acesso em: 24/10/2012
  5. COELHO, S. T.; BOLOGNINI, M. F.; ZYLBERSZTAJN, D. Policies to improve biomass-electricity generation in Brazil. Renewable Energy, ELSEVIER, Inglaterra, v. 16, n.4, p. 996-999, 1999.
  6. GRANATO, E. F.; SILVA, C. L. Geração de energia elétrica a partir do resíduo: vinhaça. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial - UNESP - Universidade Estadual Paulista – Bauru - S. P., 2002.
  7. HAANDEL, A. Van. Integrated energy production and reduction of the environmental impact at alcohol distillery plants, Engenharia Civil da UFPB, Campina Grande, PB; 2008
  8. HELBEL, A. F.; ANDRADE, L. R. Caracterização e tratamento de efluentes gerados por destilaria de álcool. Fundação Universidade Federal de Rondônia – UNIR. Departamento de Engenharia Ambiental, Ji-Paraná–RO, 2009
  9. LAPONI, J. C. Matemática Financeira: redesenho organizacional para o crescimento e desempenho máximos. Elsevier, Rio de Janeiro. 2006.
  10. LUZ, T. P. A.; BONAN, L. F. B.; RODNEI P.; RAMOS, R. A. V. Avaliação Termodinâmica e Termoeconômica do Aproveitamento Energético da Vinhaça num Sistema de Cogeração de Energia de uma Usina Sucroalcooleira. DINCON'10 – 9th Brazilian Conference on Dynamics, Control and their Applications – Serra Negra, SP, 2010.
  11. NIGRI E. M.; LEITE W. O.; FARIA P. E.; ROMEIRO E. Filho. Produção Integrada: Aplicação de Novas Tecnologias e Formas de Gestão Para Diminuição de Custos e Impactos Ambientais no Processo de Produção de Cachaça, Anais do 6º Congresso Brasileiro De Engenharia De Fabricação, Caxias do Sul – RS, Brasil, 2011.
  12. OLIVEIRA, J. A. A. de; ROCHA, S. A. T. F.; ORTEGA, J. M. Computational Environment for Simulation and Optimization Process Decision-Making Systems Cogeneration from the perspective

- of sustainability for the sugar biofuel industry. ICOMOS 2010 – VF - 1st International Conference on Modelling and Simulations. VIRTUAL FORUM. July 12th - 26th. 2010.
- 13. PELLEGRINI, L. F.; OLIVEIRA JR, S. de.** Exergy Analysis of Sugarcane Bagasse Gasification. *Energy*, v. 32, n.4, p. 314-327, 2007.
- 14. PEREIRA, S. Y.; SZMRECSANYI, T., VEIGA, A. de A. Filho, OLIVEIRA, M.D. M., IRITANI, M. A., PEREIRA, P. R. B., GUTJAHR, M. R.** Os estudos dos impactos da vinhaça no solo e na água subterrânea, ênfase na EDR - Ribeirão Preto - uma análise da situação atual do conhecimento e perspectivas. ICTR – Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia Em Resíduos e Desenvolvimento Sustentável - Costão do Santinho – Florianópolis – S C. 2004.
- 15. RODRIGUES, F. F. C.; BORGES, C. L. T.; FALCÃO, D. M.** Programação da contratação de energia considerando geração distribuída e incertezas na previsão de demanda. *Revista Controle & Automação*. Volume: 18. nº 3. Julho, Agosto e Setembro de 2007.
- 16. SALOMON, K.R.; LORA, E.E.S.; MONROY, E.F.C.** Custo do biogás proveniente da biodigestão da vinhaça e sua utilização, *Anais do 8º Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica, Cusco, Peru.* 2007.
- 17. SALOMON, K. R.; LORA, E. E. S.** Estimate of the electric energy generating potential for different sources of biogas in Brazil. *Biomass & Bioenergy*, v. 33, p. 1101-1107. 2009.
- 18. SILVA, P. P.; ORTEGA, J. M.** Advantages, Incentives and Obstacles to Cogeneration of Electric Power derived from Sugarcane Bagasse in the State of Mato Grosso do Sul, *Book of Proceedings, Rio 6 – World Climate & Energy Event.* 2006.

Sources of funding: No  
Conflict of interest: No  
Date of first submission: 2015-04-06  
Last received: 2015-04-06  
Accepted: 2015-04-07  
Publishing: 2015-04-30