

ESTUDO DE VIABILIDADE DE UMA USINA SOLAR TÉRMICA ASSOCIADA À QUEIMA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NA CIDADE DE SOBRAL - CEARÁ.

Danielle Kely Saraiva de Lima – danielle.kely@gmail.com

Universidade Federal do Ceará - UFC, Departamento de Engenharia Elétrica – DEE.

Fernando Pinto Ramalho – framalho@uece.br

Universidade Estadual do Ceará - UECE, Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas – MCFA.

Francisca Dayane Carneiro de Melo – dayane.fcm@gmail.com

Universidade Estadual do Ceará - UECE, Mestrado em Ciências Físicas Aplicadas – MCFA.

Camylla Maria Narciso de Melo – camyllamn Melo@gmail.com

Universidade Federal do Ceará - UFC, Departamento de Engenharia Elétrica – DEE.

Resumo. *O mundo necessita constantemente de aumentar sua oferta de energia visto o crescimento exponencial da população. Porém, é necessário limitar a utilização de combustíveis fósseis não renováveis que emitem gases poluentes para a atmosfera, e que hoje representam mais de 80% da energia primária mundial. As energias renováveis surgem como uma grande possibilidade oferecendo inúmeras maneiras de geração sustentável como, por exemplo, as usinas termoelétricas solares. Um destes sistemas utiliza concentradores parabólicos que absorvem a radiação solar transformando-a posteriormente em energia elétrica através de um ciclo Rankine convencional. O presente trabalho propõe a associação desse tipo de sistema com usinas de geração de energia elétrica através da queima de lixo, uma vez que a utilização comum dos equipamentos do ciclo de Rankine permite um aumento significativo na produção de energia com um acréscimo relativamente pequeno nos custos. Esta tecnologia é particularmente atrativa na Região Nordeste do Brasil devido ao grande potencial solar existente, à necessidade de geração local de energia e aos benefícios sociais e ambientais que ela oferece. Neste trabalho têm-se como objetivo fazer uma análise técnico-econômica da viabilidade de uma usina solar térmica, utilizando a tecnologia de sistemas concentradores parabólicos e tendo como combustível auxiliar a queima dos resíduos sólidos urbanos, sendo a mesma considerada para a cidade de Sobral no estado do Ceará, já que esta localidade oferece condições favoráveis para a implantação deste tipo de tecnologia.*

Palavras-chave: *Energia Solar, Usina Solar Térmica, Resíduos Sólidos Urbanos.*

1. INTRODUÇÃO

A tecnologia de concentradores parabólicos do tipo calha é a mais comprovada tecnologia solar térmica para a geração de energia elétrica do mundo. Isto é devido, principalmente, à sua larga escala comercial, constituída, entre outras, de centrais que funcionam no Deserto do Mojave, na Califórnia, desde 1984. Estas plantas variam de 14 a 80 MW e representam um total de 354 MW de capacidade instalada de geração elétrica. Os grandes campos de concentradores, alguns chegando a ocupar aproximadamente 485.000 m², ofertam energia térmica em grande quantidade para produzir vapor. (LABORATÓRIO SANDIA, 1999).

As duas primeiras plantas concentradoras parabólicas conhecidas como SEGS foram construídas em Daggett, Califórnia, entre 1984 e 1985, e têm respectivamente uma potência de 14 MW e 30MW. Da SEGS III até a SEGS VII, todos possuem 30 MW e foram montadas em Kramer Junction, Califórnia, entre 1986 e 1988. As duas últimas, a SEGS VIII e a SEGS IX, possuem 80 MW cada e se localizam em Harper Lake, Califórnia, construídas entre 1989 e 1990. Todas as nove SEGS foram concebidas, construídas e vendidas pela Luz International (EUA). (PATNODE, 2006)

De acordo com SOUZA Filho (2008), além dos Estados Unidos, as experiências mais significativas utilizando sistemas cilíndricos parabólicos se localizam na Espanha e em Israel. Na Espanha existe o campo Acurex, com 0,5 MW, o campo Ace 20 com 50 kW, o campo DISS com 0,5 MW e o campo Eurotrough, com 50 kW, todos em Almería. Já em Israel se localiza o campo DSG System com 0,5 MW.

A Fig. 1 apresenta a estrutura de funcionamento de uma usina solar que utiliza concentradores parabólicos, sendo que nesta figura o aquecimento suplementar é feito com gás natural.

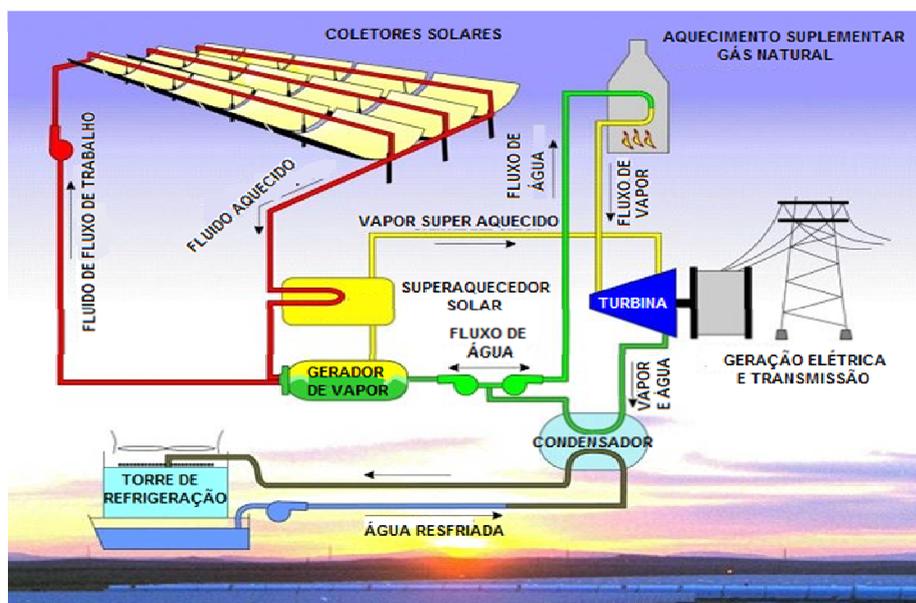


Figura 1 - Sistema de Geração de Energia utilizando coletores parabólicos (Adaptado).
Fonte: LABORATÓRIO SANDIA, (1999).

A cidade de Sobral foi escolhida para o estudo de viabilidade deste projeto por ser uma das maiores e mais bem estruturadas cidades do Ceará demandando uma grande quantidade de energia elétrica diariamente, possuindo radiação solar incidente plena durante todo o ano, favorável para a implantação de sistemas solares, além de possuir um sistema de coleta de lixo bem estruturado no município, entre outros fatores.

De acordo com o Perfil Básico Municipal de Sobral feito pelo Instituto de Pesquisa Econômica e Estratégica do Ceará (IPECE) em 2009, o consumo de energia elétrica total de Sobral no ano de 2007 foi de 373.285 MWh, sendo o maior consumidor o setor industrial, seguido do setor residencial, público, comercial e rural respectivamente.

A cidade de Sobral fica localizada a aproximadamente 230 quilômetros de Fortaleza, possui um clima tipicamente tropical, quente e seco, com uma temperatura média de 30 graus centígrados e com uma altitude de 70 metros. A cidade de Sobral está entre as maiores economias do estado, sendo que, de acordo com o IBGE, em 2006 seu PIB a preço de mercado corrente foi de 1.157.504 mil reais, estabelecendo um PIB per capita de 8.688 reais.

A Fig. 2 e a Fig.3 mostram a localização do município de Sobral e a radiação solar média incidente na parte de interesse da Região Nordeste do Brasil.

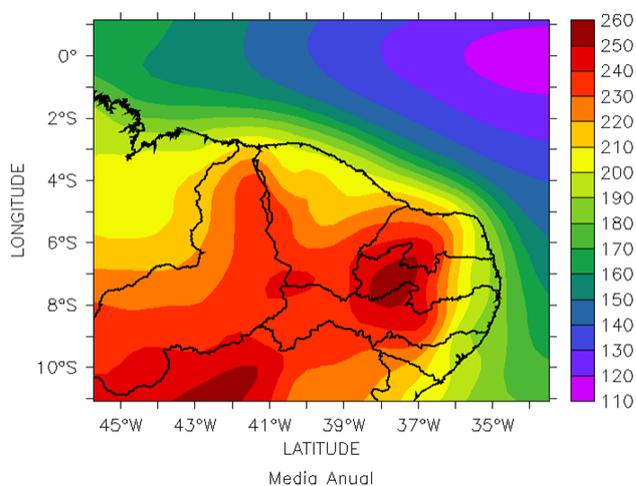


Figura 2 - Mapa do Estado do Ceará com destaque para o município de Sobral.

Figura 3 – Radiação solar média anual corrigida através de regressão linear considerando a fração de cobertura de nuvem e a radiação observada no topo da atmosfera (W / m^2). Fonte: Menezes Neto, 2007.

Disponíveis em: www.sobral.ce.gov.br/cidade/geografia.htm

Como mostrado anteriormente na Fig. 3, o estado do Ceará possui uma elevada radiação solar incidente, sendo que a cidade de Sobral possui em média uma radiação solar incidente de 210 a 220 W/m².

O local indicado para a construção da usina proposta localiza-se ao lado do aterro sanitário de Sobral situado a 8 km da cidade, local com área suficiente para a implantação da usina, com topografia relativamente plana e com linhas elétricas de transmissão próximas.

Em relação à disponibilidade de água podem ser construídos poços profundos. A quantidade de água necessária para alimentar o sistema diariamente é de aproximadamente 3 m³ por tonelada de lixo processada e 18.500 m³/MW/ano para manter a usina solar térmica em funcionamento.

Em 2008 com população de 180.046 habitantes (de acordo com dados do IBGE) foram produzidos aproximadamente 110 toneladas de lixo por dia, sendo que este valor reflete o fato que cerca de 83% da população sobralense é atendida pela coleta de lixo. Considerando o crescimento exponencial da população sobralense e o conseqüente aumento na produção de lixo urbano, dentro de poucos anos Sobral conseguirá atender a uma usina que processa diariamente 150 toneladas de lixo.

Alem disso, de acordo com o Decreto N° 6.017, de 17 de janeiro de 2007, regulamentado pela Lei Federal N° 11.107, de 6 de abril de 2005, que dispõe sobre normas gerais de contratação de consórcios públicos, municípios vizinhos poderão realizar consórcios afim de se resolver o problema do tratamento e da destinação final dos resíduos sólidos urbanos.

Os municípios de até 30 mil habitantes geram cerca de 0,5 kg de lixo por habitante-dia e os municípios com maior população geram um volume linearmente crescente, de modo que os de 500 mil habitantes geram por volta de 0,8 kg/hab/dia e os de 5 milhões de habitantes cerca de 1,0 kg/hab/dia, (MELLO, 2008).

De acordo com o Estudo de Viabilidade do Programa para o Tratamento e Disposição de Resíduos Sólidos no Estado do Ceará – Brasil, feito pelo PROINTEC - Programa Municipal de Incubação Avançada de Empresas de Base Tecnológica, em 2006 o lixo da cidade de Sobral teve a composição média apresentada na Tab. 1.

Tabela 1 - Composição Média do Lixo de Sobral

	%	Poder Calorífico (kcal/kg)	Quantidade de lixo (kg)
Orgânico	60	385	23100
Construção e Obra Civil	15	0	0
Papel e Papelão	4	525	2100
Plásticos moles	5	445	2225
Plásticos duros	10	445	4450
Vidro	3	0	0
Metais	3	0	0
Poder Calorífico Médio (kcal/kg)		318,75	

Se considerarmos que na pratica 50 % do papel / papelão e plástico da composição do lixo de Sobral podem ser reciclados, ainda assim o poder calorífico do lixo será em média 275 kcal/kg. A título de comparação, a população da cidade de Fortaleza gera cerca de 20 vezes a quantidade de lixo produzida em Sobral, representando uma escala muito superior do ponto de vista de uma eventual termelétrica de lixo que venha a ser instalada futuramente.

2 AVALIAÇÃO ECONÔMICA DA USINA PROPOSTA

Foi desenvolvida uma planilha de cálculo baseada nos dados obtidos nas várias fontes e referências listadas na Bibliografia, de forma a sintetizar os diferentes aspectos de interesse do ponto de vista técnico-econômico, resultando nas tabelas abaixo apresentadas, onde se toma por base que a usina termelétrica solar será capaz de gerar a mesma quantidade de energia térmica bruta por hora que a planta de lixo.

A usina proposta tem os seguintes critérios de design:

- Capacidade da Usina de Lixo: 150 toneladas de lixo por dia;
- Usina proposta pode funcionar 24 horas por dia;
Usina Solar – 8 horas
Usina de RSU – 16 horas
- Capacidade de Armazenagem de calor: 1 hora de funcionamento a plena carga;
- A Usina Solar tem a mesma capacidade pico da energia firme produzida na Usina de Lixo;

2.1 CARACTERÍSTICAS DA USINA SOLAR TÉRMICA ASSOCIADA Á USINA DE LIXO

Os dados apresentados na Tab. 2 foram obtidos através de informações cedidas pelo Coordenador de Limpeza da cidade de Sobral, pelo IBGE e pelo PROINTEC (2006).

Tabela 2 - Dados do Lixo de Sobral em 2008

População	180.000
Quantidade de Lixo coletado (ton/dia)	115
Porcentagem de Lixo coletado (%)	83,0
Quantidade de Lixo não coletado (ton/dia)	12,3
Quantidade total de lixo produzido (ton/dia)	127,3
Quantidade de lixo gerada por habitante por dia (kg)	0,7
Energia média por kg de lixo (kcal/kg)	318,75
Energia média por kg de lixo (J/kg)	1.334.543

Os dados apresentados na Tab. 3 foram obtidos através de informações apresentadas em PRICE (2003), como a eficiência do ciclo termodinâmico, e a partir dos dados já apresentados anteriormente.

Tabela 3 - Dados da Usina de Lixo Proposta para Sobral

Quantidade de Lixo (tons/dia)	150
Geração de Energia térmica bruta por dia (J/dia)	$2,0 \times 10^{11}$
Numero de horas de operação	16
Capacidade de queima por hora (ton/hora)	9,38
Potência Gerada térmica (MW)	3,48
Eficiência do Ciclo Rankine (%)	37,7
Potência Elétrica Bruta da Usina de Lixo (MWe)	1,31
Eficiência elétrica (%)	91
Potência Elétrica Líquida da Usina de Lixo (MWe)	1,19
Área Necessária (ha)	1,3

Os dados apresentados na Tab. 4 se baseiam em informações cedidas pelo NREL (2003) e SOLAR PACES (2010).

Tabela 4 - Características da Planta Solar Térmica

Potência Térmica - Gerada pelos campos de coletores (MWt)	3,48
Eficiência do Ciclo Rankine (%)	37,7
Potência Elétrica Bruta da Usina Solar (MWe)	1,31
Eficiência elétrica (%)	91
Potência Elétrica Líquida da Usina Solar (MWe)	1,19
Energia Bruta gerada pelo campo de coletores (MWht / m ²)	0,000318
Área de Coletores Necessária (m ²)	10928,8
Área de Coletores Necessária (ha)	1,09
Área de Terreno Necessário (ha)	3,64
Numero de Coletores do tipo LS2	47
Custo do campo de coletores (US\$ / m ²)	242
Custo do campo de coletores (R\$/m ²)	436
Capacidade de Armazenamento (h)	1
Máxima Energia de Estocagem (MWht)	3,48
Custo do Sistema de armazenagem de calor (R\$/kWht)	57,84

O sistema de armazenagem de calor para a usina solar foi dimensionado, neste caso, para manter a planta funcionando a plena carga pelo período de apenas 1 hora. Ao contrário do que se vê normalmente em plantas desse tipo, onde se utiliza uma capacidade de armazenagem de 5 a 6 horas, o uso do lixo como combustível de baixo custo associado a grande disponibilidade de sol durante todo o ano, a proximidade da Linha do Equador que faz com que as condições de operação sejam semelhantes tanto no inverno como no verão, permite que o sistema de armazenagem de calor seja dimensionado apenas para cobrir eventuais transientes como os decorrentes da passagem de nuvens e do ajuste de transição entre a operação exclusiva pelos coletores solares e o modo de operação exclusivamente pelo uso do lixo. Como o sistema de armazenagem de calor utilizando tanques de sais fundidos é relativamente caro, o sistema aqui proposto representa uma redução significativa no custo inicial de implantação da usina combinada.

2.2 CUSTOS

CUSTO DA USINA DE LIXO

De acordo com a Diretoria da USINA VERDE, os custos da Planta de lixo aqui considerada representam cerca de 40 milhões de Reais e incluem:

- Estação de recebimento, seleção e condicionamento do lixo para a queima;
- Caldeira específica para queima de lixo;
- Torre de refrigeração;
- Ciclo Rankine (turbina / gerador / condensador/ bomba de água / pré-aquecedores);
- Unidade de tratamento de gases;
- Unidade de recuperação de cinzas.

CUSTO DA USINA SOLAR

De acordo com PRICE (2003), o National Renewable Energy - NREL desenvolveu um modelo de custos detalhados para usinas de energia solar com concentradores parabólicos. O modelo usa citações de referência para o custo de cada elemento, aonde são utilizados fatores de escala para ajustar os custos de tamanhos diferentes dos casos de referência. A equação de escala tem a forma geral:

$$\text{Custo2} = (\text{C2}/\text{C1})^{0,7} \times \text{Custo1}$$

onde:

- Custo1 é o custo de referência para um equipamento de capacidade C1.
- C2 é a capacidade desejada para o equipamento de custo Custo2.
- O expoente varia para cada elemento de custo e é calculado a partir de duas citações de referência. No entanto, 0,7 é o valor usado pelo NREL para os equipamentos usuais, quando apenas uma citação está disponível.

A Tab. 5 mostra os custos aproximados de uma planta solar com concentradores parabólicos com potência elétrica líquida de aproximadamente 1,2 MW pico, sendo que os valores contidos nesta tabela foram estimados utilizando o modelo de custos desenvolvido pelo NREL.

Tabela 5 - Custo da Planta Solar de 1,2 MW pico

Custo total do Campo de Coletores (milhões de Reais)	R\$ 4,76
Custo de Estocagem	R\$ 196.427,97
Estrutura	R\$ 206.037,25
Aquecedor Auxiliar/Caldeira	R\$ 894.415,99
Turbina e Gerador	R\$ 3.270.841,66
Engenharia, Construção e Gestão de Projetos	R\$ 593.062,12
Restante da Planta	R\$ 1.901.719,45
Terreno (*)	0
TOTAL (Reais)	R\$ 9.920.877,50

(*) O terreno é aqui assumido como tendo custo zero considerando que o mesmo será doado pelos Governos Municipal e/ou Estadual, como é o caso, por exemplo, da Usina Solar Fotovoltaica em fase de implantação no município de Tauá no interior do Ceará.

CUSTO TOTAL DA USINA SOLAR (sem Ciclo Rankine)

Faremos a seguir o cálculo dos custos da usina solar incluindo apenas os equipamentos que não foram considerados anteriormente no cálculo do custo da usina de lixo, ou seja:

- Custo total do campo de coletores
- Preço da estrutura
- Aquecedor Auxiliar/Caldeira
- Custo de Estocagem

Utilizando os dados da Tab. 10, verificamos que os equipamentos complementares aqueles já considerados na Planta de Lixo representam um custo adicional de R\$ 5,86 milhões de Reais.

CUSTO TOTAL DE IMPLANTAÇÃO DA USINA DE RSU + SOLAR

Custo total de implantação da Usina Solar (sem o ciclo Rankine) (milhões de Reais)	R\$ 5,86
Custo total de implantação da Usina de RSU (milhões de Reais)	R\$ 40,0
Custo total de implantação da Usina Solar + a Usina de RSU (milhões de Reais)	R\$ 45,86

2.3 ENERGIA GERADA

A Tab. 6 faz a estimativa da quantidade de energia gerada pelas duas usinas associadas.

Tabela 6 - Energia Elétrica Gerada por ano

Energia Elétrica gerada por ano (MWh)	10.445
Usina de Lixo (MWh)	6.963
Usina Solar (MWh)	3.482

A energia gerada pela usina combinada lixo + solar é suficiente para atender a quase 11 mil casas de consumidores de baixa renda (até 80 kWh/mês) que representam uma percentagem significativa dos moradores de Sobral.

2.4 CUSTOS DE O&M**CUSTOS DE O&M DA USINA DE LIXO**

Os dados contidos na Tab. 7 mostram os custos de O&M da Usina de lixo, tendo como base estudos feitos pela USINA VERDE.

Tabela 7 - Usina de Lixo

Pessoal / Encargos Sociais / Despesas Administrativas (milhões de Reais / ano)	1,27
Manutenção Preventiva (milhões de Reais / ano)	0,83
Custos variáveis - insumos - (milhões de Reais / ano)	0,37
Total (milhões de Reais / ano)	2,47

CUSTOS DE O&M DA USINA SOLAR

Não incluído nos custos apresentados na Tab. 7 estão:

1. Manutenção dos coletores
2. Manutenção do Gerador de Vapor do sistema solar

Deve-se observar que o custo de O&M da planta de lixo inclui a maior parte dos custos, já que compreende:

- Equipamento para recebimento e preparação do lixo para a queima;
- Ciclo Rankine;
- Equipamento de limpeza dos gases;
- Sistema de Controle;
- Disposição dos resíduos da queima.

Assim, consideraremos um acréscimo de 15% nos custos de O&M da planta de lixo para incluir os equipamentos específicos da planta solar, obtêm-se o valor de R\$ 0,3705 milhões de Reais / ano.

CUSTOS DE O&M DA USINA DE LIXO + USINA SOLAR

Custo total por ano de O&M = R\$ 2,84 milhões.

CRÉDITOS DE CARBONO

USINA DE RSU

A usina de lixo faz jus ao recebimento de créditos de carbono por evitar, através da queima do lixo, a formação de metano (CH₄) que é um gás de forte efeito estufa. Para o cálculo da quantidade de CH₄ emitida por tonelada de lixo por ano foi utilizada a metodologia do IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change, de acordo com Bogner e Matthews (2003).

$$\text{CH}_4 \text{ emitido} = (A - R) (1 - \text{OX})$$

Onde:

R – Recuperação de CH₄

OX – Fração de CH₄ oxidada

$$A = (\text{MSWt} * \text{MSWf} * \text{Mcf} * \text{DOC} * \text{DOCf} * \text{F} * 16/12) \quad (1)$$

Sendo:

MSWt - Quantidade de Resíduos Sólidos do Município

MSWf – Fração que é depositada no Aterro

Mcf – Fração contida no aterro que é decomposta anaerobicamente

DOC – Fração biodegradável de carbono orgânico no aterro

DOCf – Fração de conversão de CH₄ para CO₂ no aterro

F - Fração de gás CH₄ no aterro

16/12 – Taxa de conversão de carbono em metano

Como a usina proposta tem capacidade de processamento de 150 ton/dia, a quantidade de resíduos sólidos do município considerada será a totalidade do lixo produzido, que teoricamente será enviada para a usina.

Os valores da Tab. 8 correspondem aos recomendados pelo IPCC, conforme apresentados por PARO, COSTA E COELHO (2008).

Tabela 8 – Valor dos parâmetros utilizados no cálculo dos créditos de carbono

MSWt	150
MSWf	1
MCf	0,6
DOC	0,12
DOCf	0,77
F	0,5
R	0
OX	0

Considerando a temperatura e pressão como 0°C e 1,013 bar respectivamente, a densidade do CH₄ é de 0,0007168 ton/m³. Sendo assim, a quantidade de CH₄ emitida é de 5,54 ton/dia, ou seja, 2.024 ton/ano, o que equivale a 2.823.047 ton/m³ de CH₄.

Vale salientar que o potencial de Aquecimento Global para o metano é de 21 vezes a tonCO₂eq/tonCH₄ e o preço do CER - Certified Emission Reduction é considerado para efeitos do presente estudo como US\$ 12,00/tCO₂eq, ou seja, R\$ 22,10/tCO₂eq. Desta forma, temos:

Total de CO ₂ equivalente (ton / ano)	42.494,8
Receita anual com a venda das CER (R\$ / ano)	917.886,82
Período de Créditos (anos)	25
Total Recebido (R\$)	22.947.170,40

USINA SOLAR

De acordo com Abreu (2009), o Cálculo das Receitas com a venda de RCEs – Reduções Certificadas de Emissões deve ser feito da seguinte maneira:

$$\text{Receita (R\$)} = \text{Redução nas Emissões (tCO}_2\text{e)} * \text{Preço da RCE (R\$ /tCO}_2\text{e)}$$

Onde a Redução nas Emissões (tCO₂e) equivale a:

$$\text{Emissões da Linha de Base} = \frac{\text{Energia Gerada pelo projeto em MWh} *}{\text{Fator de emissão da linha de base (tCO}_2\text{e /MWh)}}$$

Desta forma, temos que:

Energia Gerada pelo projeto em função apenas da parte solar (MWh/ano)	3.482
Fator de Emissão da Linha de Base (tCO ₂ eq/MWh)	0,202
Emissões da Linha de Base (tCO ₂ eq / ano)	703,4
Receita (R\$/ano)	15.547,16
Período de Créditos (anos)	25
Total Recebido (R\$)	388.678,95

Essa metodologia é a mesma aplicada hoje para empreendimentos de geração de energia elétrica através da conversão de energia eólica.

USINAS ASSOCIADAS

$$\text{Receita total anual derivada de créditos de carbono (R$/ano)} = \text{R\$ 933.079,48}$$

2.6 PRODUÇÃO DE TIJOLOS - USINA DE RSU

O material resultante da queima dos RSU é tratado, podendo ser integrado a outros materiais como o cimento para produzir tijolos. De acordo com a diretoria da Usina Verde, uma usina que queima 150 ton/dia de lixo gera material suficiente para a produção de 44.000 tijolos por mês com as seguintes características: Dimensões de: 0,20m x 0,40m x 0,20m e peso: 9 kg, sendo composto por, Cinzas: 6,5 kg (72,2 %), Cimento: 2,0 kg (22,2 %) e Água: 0,5 kg (5,6 %). Uma opção interessante para a destinação da produção destes tijolos seria a construção de casas populares.

2.7 RESUMO DOS RESULTADOS

O custo de uma planta de queima de lixo capaz de atender a cidade de Sobral queimando a totalidade do lixo em um período de 16 horas a cada dia é de cerca de 40 milhões de Reais. O custo adicional para incluir na referida usina de lixo uma usina solar térmica por calha parabólica é de cerca de 6 milhões de Reais (15,5% a mais). No entanto, essa planta solar deverá gerar energia por 8 horas adicionais representando um acréscimo de praticamente 50% e garantindo uma produção constante de eletricidade 24 horas por dia. Além disso a planta solar acrescenta relativamente pouco nos custos de O&M que existiriam de qualquer maneira considerando-se apenas a planta de lixo.

Quanto a tarifa necessária para a venda da eletricidade de forma a gerar um retorno econômico considerado satisfatório para o empreendimento, este deveria ser o objeto de um estudo mais amplo considerando o fluxo de caixa do investimento e aspectos fiscais, tributários e de engenharia financeira, o que foge do escopo do presente trabalho. No entanto, foi realizada uma análise grosseira que aponta para os seguintes resultados:

Considerando que um dos principais benefícios da usina combinada aqui proposta é a eliminação total do lixo, pode-se argumentar que mesmo um empreendimento desse tipo que não gerasse lucro, porém apresentasse um custo menor ou igual do que aquele que existirá de qualquer forma pela necessidade de deposição do lixo em aterro controlado, seria benéfica do ponto de vista governamental, social e ambiental.

Foi verificado de acordo com PARO, COSTA E COELHO (2008), que um aterro sanitário padrão capaz de atender a cidade de Sobral, tem um custo inicial por volta de 8,2 milhões de reais e um custo anual de O&M de cerca de 1,8 milhões de reais, valores esses bastante menores dos que os encontrados para a usina combinada de lixo+solar. Nestas condições, verificou-se que uma tarifa da ordem de R\$ 300 MWh seria capaz de pelo menos tornar nulo os custos adicionais associados a planta combinada, através de uma receita anual de 3 milhões de Reais. Esse valor de tarifa se aproxima dos praticados no PROINFA para a energia eólica (por volta de R\$ 240 por MWh) e dos valores reais de energia para as usinas térmicas convencionais recentemente contratadas pelo mecanismo de leilão, quando estas são demandadas a produzir energia para o sistema integrado, sinalizando que a usina solar+lixo aqui proposta seria na realidade menos custosa para o estado do que a implantação de um aterro sanitário padrão.

No entanto, como dito anteriormente, a análise acima é apenas indicativa e conservadora, de tal forma que uma análise mais detalhada provavelmente irá indicar uma viabilidade mais significativa do que a acima apresentada, principalmente se tomarmos em conta outros fatores externos, como programas de incentivo governamentais e o possível aumento do valor da tonelada equivalente de CO₂, aqui considerada como sendo US\$ 12,00/tonCO₂eq. Vale lembrar que historicamente esse valor já atingiu a casa de US\$ 20,00/tonCO₂eq e o contínuo aumento dos efeitos visíveis do fenômeno de aquecimento global pode significar valores ainda mais altos a serem praticados futuramente. Além disso o governo do Estado do Ceará está em processo de implantação de um Fundo de Incentivo a Energia Solar (FIES) para o qual empresas privadas atualmente beneficiadas por outros mecanismos fiscais de âmbito estadual irão contribuir, recebendo em troca um selo verde.

3 CONCLUSÕES

A implantação de uma usina termoeétrica solar associada a queima de resíduos sólidos urbanos é uma alternativa inovadora a nível mundial, e interessante do ponto de vista energético, haja visto que o sol é uma fonte de energia inesgotável e particularmente abundante na Região Nordeste do Brasil e os resíduos sólidos urbanos são produzidos diariamente em grande escala, proporcionando sustentabilidade e geração contínua de energia 24 horas por dia. Este tipo de sistema respeita o meio ambiente e contribui para evitar o processo de alterações climáticas.

A possibilidade de utilização da planta solar acoplada a planta de queima de lixo representa uma produção de energia cerca de 50% maior, com um acréscimo de custo de cerca de 15%, já que o ciclo Rankine é comum a ambas, o que torna a planta combinada mais atrativa do ponto de vista econômico.

Haveria um ganho de experiência muito grande na operação de uma planta solar concentradora associada com lixo, mesmo em escala de planta piloto, pois seria um projeto pioneiro no Brasil e no mundo, sendo que no Brasil não existe ainda nem ao menos uma usina solar com concentradores parabólicos operando comercialmente, o que contrasta

com as novas usinas desse tipo sendo implantadas a nível mundial e com a grande experiência já adquirida pela operação comercial de mais de 350 MW no deserto do Mojave por um período superior a 20 anos. Essa experiência piloto promoveria o desenvolvimento desta tecnologia no país, possibilitando a replicação futura de outras usinas desta natureza em escalas maiores (como na cidade de Fortaleza), com a possibilidade de criação de novas empresas e geração significativa de emprego.

Usinas com uma capacidade de produção maior do que o da usina proposta possibilitam também um retorno do investimento mais rápido, sendo, porém, que usinas piloto como a aqui proposta possibilitam determinar uma estratégia ótima de operação e design entre as formas de geração solar, diretamente dos campos de coletores, a partir dos tanques de armazenamento térmicos e através da queima direta do lixo. Como exemplo de otimização necessária, citamos a determinação ótima do ponto de vista técnico e financeiro da capacidade dos tanques de estocagem térmica versus o tamanho do campo de coletores, tendo em conta a possibilidade de utilizar parte da energia gerada pelo lixo como reserva térmica.

Outro grande benefício de usinas deste tipo é que substitui a utilização de aterros sanitários, que possuem uma vida útil de deposição de cerca de 20 anos, mas que precisam ser mantidos sob acompanhamento por 40 anos após o término do período de deposição, representando um ônus social, fiscal e ambiental para os governos a nível municipal e estadual por um período total de cerca de 60 anos.

A usina proposta tem o benefício de eliminar a produção de chorume e a contaminação dos lençóis freáticos, bem como elimina a produção do metano que seria gerado no aterro sanitário. Esse gás além de ser um importante promotor de efeito estufa, pode produzir incêndios espontâneos mesmo em aterros bem planejados. Por outro lado, a lavagem e filtragem dos gases resultantes da queima do lixo garantem que não serão emitidos gases poluidores em quantidades significativas para o meio ambiente.

Além da eliminação do lixo, a usina combinada aqui proposta irá gerar energia que teria de ser provida de outra forma numa região em crescimento como o Nordeste, com os relativos custos agregados. Em particular, no caso da Região Nordeste, a geração local de energia elétrica diminui os custos e perdas adicionais devido a transmissão de energia por longas distâncias como será o caso das novas usinas hidroelétricas atualmente em processo de implantação na Região Norte.

A cidade de Sobral possui características extremamente favoráveis à implantação de uma usina solar térmica associada à queima de RSU, aproveitando a energia proveniente do Sol e resolvendo a problemática da destinação final dos resíduos sólidos urbanos. Os resíduos resultantes da queima do lixo podem ser adicionados a cimento para a fabricação de tijolos que podem ser utilizados em programas de habitação do município, sendo que o fato da cidade de Sobral já possuir uma fábrica de cimento facilita o processo.

A usina combinada aqui proposta para a cidade de Sobral tem uma viabilidade menor do que uma usina de maior porte como o que seria o caso para atender a cidade de Fortaleza ou outras capitais no Nordeste. No entanto o porte necessário para atender a cidade de Sobral é ideal do ponto de vista de uma planta piloto para operação comercial que permitiria um grande aprendizado e o desenvolvimento dessa tecnologia a nível regional, inclusive com a participação de indústrias e mão de obras locais.

A análise feita neste trabalho visa permitir uma primeira idéia das possibilidades da associação de plantas solares de calha parabólica com usinas de queima de lixo, sendo que uma análise teórica aprofundada das estratégias de design e operação e dos custos associados da planta combinada, na linha das idéias aqui propostas, pode servir de base para uma tomada de decisão a nível governamental e empresarial da implantação futura dessa tecnologia na Região Nordeste, o que colocaria o Brasil na vanguarda mundial desse tipo de tecnologia, com ganhos sociais, ambientais e econômicos significativos.

REFERÊNCIAS

ABREU, Virgínia Brasil de. **Análise da Viabilidade Econômico-Financeira da Energia Eólica diante do Mercado de Créditos de Carbono**. XV SEMINÁRIO DE PLANEJAMENTO ECONÔMICO-FINANCEIRO, São Paulo, 2009.

BOGNER, J.; MATTHEWS, E.. **Global methane emissions from landfills: New methodology and annual estimates 1980–1996**. *Global Biogeochemical Cycles*, Washington, 2003.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ (IPECE). **Perfil Básico Municipal - Sobral**. Fortaleza, 2009.

LABORATÓRIO SANDIA. **Solar Parabolic Trough**. Novo México, 1999.

MELLO, Gustavo. **Notas sobre o Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil**. Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

PARO, André de Carvalho; COSTA, Fernando Cörner da; COELHO, Suani Teixeira. **Estudo Comparativo para o Tratamento de Resíduos Sólidos Urbanos: Aterros Sanitários x Incineração**. Revista Brasileira de Energia, São Paulo, p.113-125, 2008.

PATNODE, Angela M. **Simulation and Performance Evaluation of Parabolic Trough Solar Power Plants**. 2006. 271 f. Tese (Mestrado) - University Of Wisconsin-madison, Madison, 2006. Disponível em: <www.worldcat.org>. Acesso em: 01 out. 2008.

PRICE, H.; KEARNEY, D. **Reducing the Cost of Energy from Parabolic Trough Solar Power Plants**. In: **International Solar Energy Conference**, 2003, Hawai. National Renewable Energy Laboratory - NREL, 2003.

PROINTEC. **Estudo de Viabilidade do Programa para o tratamento e disposição de Resíduos Sólidos no Estado do Ceará - Brasil**. Minas Gerais, 2006.

SOLAR PACES. **Concentrating Solar Power Now**. Disponível em: <http://www.solarpaces.org/Library/docs/CSP_BrochureofGerman_BMU.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2010.

SOUZA FILHO, José Ribeiro de. **Projeto, Construção e Levantamento de Desempenho de um Concentrador Solar Cilíndrico Parabólico com Mecanismo Automático de Rastreamento Solar**. 2008. 91 f. Dissertação - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2008.

USINA VERDE S/A. **Tecnologia Usina Verde**. Disponível em: <<http://www.usinaverde.com.br>>. Acesso em: 27 out. 2009.

FEASIBILITY STUDY OF A SOLAR THERMAL POWER PLANT BURNS ASSOCIATED WITH MUNICIPAL SOLID WASTE IN THE CITY OF SOBRAL – CEARÁ.

***Abstract** The World needs a constant increase in the energy offer to cope with the exponential growth of the population. However, it is necessary to limit the use of fossil fuels that produce pollutant gases to the atmosphere and that represent more than 80% of the primary energy used today. The renewable energies are the best hope, offering several options of energy generation, like the solar-thermal power plants. One of those systems utilizes parabolic solar concentrators to absorb the solar radiation, transforming it in electric energy using a conventional Rankine cycle. The present work proposes the association of this type of system with power plants that burn urban solid residues (garbage) since the common use of the equipments of the Rankine cycle allows for a significant increase in the energy generated with a relatively small increase in costs. This technology is particularly interesting to the Brazilian Northeast Region due to the great solar potential available, the need for local energy generation, and to the socio-economical and environmental benefits that it offers. This work has the objective to make a technical-economic analysis of the viability of this type of technology considering the city of Sobral in the state of Ceará, Brazil, since this site offers optimal conditions for the implementation of this type of technology.*

Key words: Solar Energy, Solar Thermal Power Plant, Solid Waste.