

ESTUDO DE VIABILIDADE DE COGERAÇÃO EM UMA PLANTA DE ESTERILIZAÇÃO POR ÓXIDO DE ETILENO: ABM – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METALURGIA E MATERIAIS¹

*Marcos Antônio Andrade de Oliveira²
Manoel Antonio da Fonseca Costa Filho³*

Resumo

Este trabalho tem o objetivo de desenvolver um estudo preliminar de viabilidade técnica e financeira para a utilização de uma unidade de cogeração para suprir a demanda de energia elétrica e térmica para um processo de esterilização por EtO (óxido de etileno), adicionalmente suprir a demanda de gás inerte requerida. A água de refrigeração para o processo é produzida a partir de um chiller de absorção que utiliza a água residual quente proveniente do motor diesel. O calor residual restante a cerca de 60 °C pode ser utilizado para aquecimento da câmara e vaporização do óxido de etileno. Em modelos de cogeração, o CO₂ é normalmente disposto diretamente para a atmosfera, mas aqui, pode ser utilizado como matéria-prima para o processo, depois capturado por um lavador de gases, o que normalmente faz parte do processo. O CO₂ (que não tem custo neste projeto) é uma opção mais barata do que o nitrogênio utilizado normalmente e transportado por caminhões para a planta de esterilização, eliminando, assim, outra fonte de emissões de CO₂.

Palavras-chave: Eficiência energética; Cogeração; Esterilização química; Óxido de etileno; Indústria farmacêutica.

TECHNICAL AND ECONOMICAL FEASIBILITY STUDY FOR USING A COMBINED HEAT & POWER FOR ETHYLENE OXIDE STERILIZATION PROCESS

Abstract

This project aims at developing a technical and economical feasibility study for using a combined heat & power (CHP) unit to supply electricity and thermal energy for an EO (ethylene oxide) sterilization process, additionally supplying the required inert gas. Cooling water is produced from the waste hot water from the diesel engine through an absorption chiller. The remainder waste heat at about 60 °C can be used for chamber heating and ethylene oxide vaporization. In CHP designs, the CO₂ is usually disposed directly to the atmosphere, but here it can be used as feedstock to the process, after captured by a scrubber, which must exist in the process. The cheapest option is CO₂ (which has no cost in this project) to the nitrogen (normally used for process safe) that is transported by trucks to the sterilization plant, thus eliminating another source of CO₂ emissions.

Key words: Energy efficiency; Combined heat & power (CHP); Chemical sterilization; Ethylene oxide; Pharmaceutical industry.

¹ *Contribuição técnica ao 34° Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 28° Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 28 a 30 de agosto de 2013, Vitória, ES.*

² *Engenharia Eletrônica. MSc. Coordenador de Projetos. Laboratórios B.Braun S.A..*

³ *Engenharia Mecânica. , D.Sc.Professor Adjunto, UERJ.*

1 INTRODUÇÃO

O custo operacional de um processo industrial é aspecto fundamental para a viabilidade de uma planta produtiva, a redução deste custo é um objetivo a ser perseguido constantemente pela área de engenharia. Uma parcela normalmente expressiva do custo operacional é o custo com energia onde se destacam a energia elétrica e a térmica.

Sempre que se inicia um estudo de redução de custos com energia em um processo industrial a Cogeração é uma possibilidade. Quando o processo a ser otimizado possui uma demanda térmica além da elétrica a cogeração pode ser uma solução viável. Uma unidade de cogeração produz como subproduto o CO₂, embora este subproduto seja indesejável na maioria dos casos, o CO₂ é um gás inerte e pode ter uso industrial, como no caso de indústrias de bebidas.

A esterilização por óxido de etileno é um processo industrial que demanda energia elétrica (motores elétricos e sistema de controle), energia térmica (aquecimento da câmara, vaporização do óxido de etileno, bomba de vácuo e geração de vapor) e gás inerte (nitrogênio ou CO₂).

1.1 Delimitação da Pesquisa

O trabalho foi focado no processo de esterilização por EtO embora o excedente de energia possa ser aproveitado em outros processos na planta industrial (Figura 1).

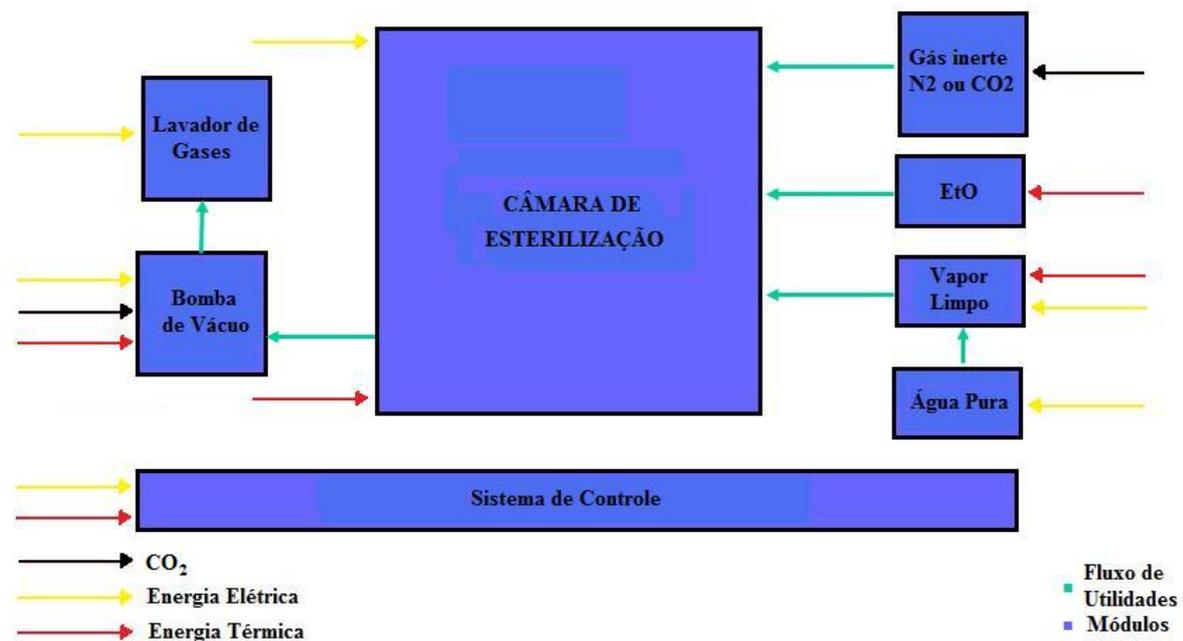


Figura 1 - Fluxograma simplificado.

1.2 Revisão de Literatura

1.2.1 Cogeração

A Cogeração é definida como um processo de produção e utilização combinada de calor e eletricidade, proporcionando o aproveitamento de mais de 70% da energia térmica proveniente dos combustíveis utilizados nesse processo. Embora utilize processos de aproveitamento de calor que tipicamente provém dos gases de escape

de um Ciclo Brayton à semelhança de sistemas a Ciclo Combinado, estes processos são essencialmente distintos na prática e aplicação: Ciclo Combinado possui dois ciclos termodinâmicos, normalmente Brayton-Rankine e produz eletricidade como produto final.⁽¹⁾

As turbinas a gás (Ciclo Brayton) são adequadas para grandes demandas de eletricidade, acima de 10 MW. Para demandas menores do que 10 MW podem ser usados motores a combustão interna (Ciclo Otto – gás natural ou Ciclo Diesel – óleo diesel). Com a crescente melhoria dos rendimentos das microturbinas, no seu estudo de viabilidade técnica estas também podem ser consideradas.

Por mais eficiente que seja um gerador termelétrico, a maior parte da energia contida no combustível usado para seu acionamento é transformada em calor e perdida para o meio-ambiente.⁽²⁾

Trata-se de uma limitação física que independe do tipo de combustível (diesel, gás natural, carvão, etc.) ou do motor (a combustão interna, turbina a gás ou a vapor etc.). Por esta razão, no máximo 40% da energia do combustível usado em um gerador podem ser transformados em energia elétrica (Figura 2a).⁽²⁾

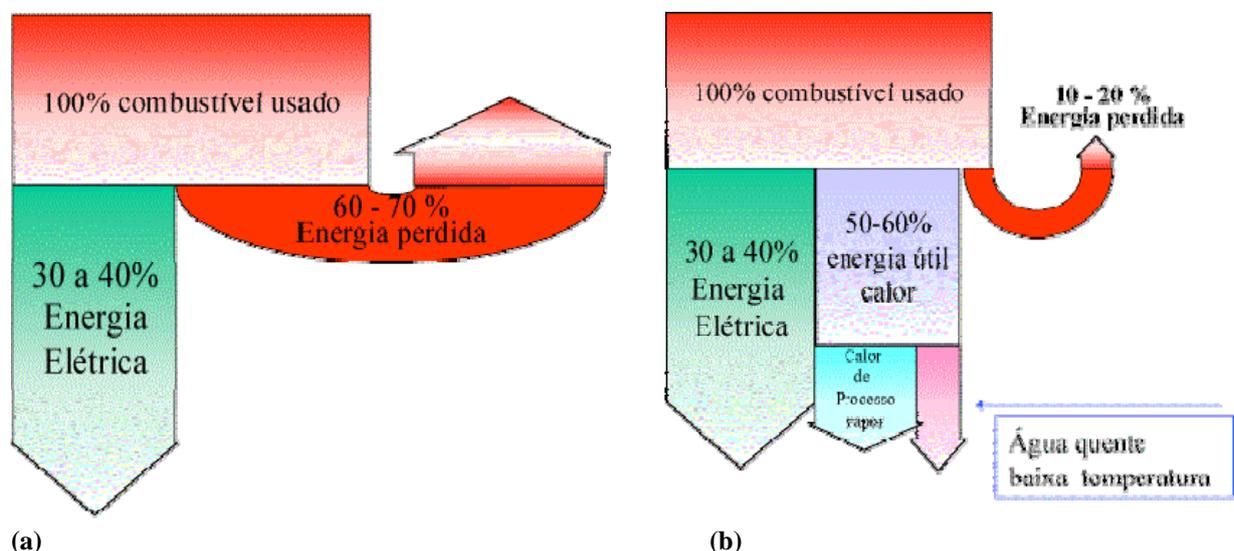


Figura 2 – (a) Eficiência da Geração; (b)- Eficiência da Cogeração ⁽²⁾

Como muitas indústrias e prédios comerciais necessitam de calor (vapor ou água quente), foi desenvolvida uma estratégia denominada cogeração, em que o calor produzido na geração elétrica é usado no processo produtivo sob a forma de vapor.⁽²⁾

A vantagem desta solução é que o consumidor economiza o combustível que necessitaria para produzir o calor do processo. A eficiência energética é bem mais elevada, por tornar útil até 85% da energia do combustível (Figura 2b).⁽²⁾

O inconveniente da cogeração é que o calor só pode ser usado perto do equipamento, o que limita estas instalações a unidades relativamente pequenas se comparadas com os geradores das concessionárias ⁽²⁾.

Até meados do século XX, a cogeração chegou a ser muito usada nas indústrias, perdendo depois a competitividade para a eletricidade produzida pelas concessionárias nas grandes centrais geradoras com ganhos de escala. Assim, a cogeração ficou limitada a sistemas isolados (plataformas marinhas) e indústrias com lixos combustíveis (canaveira e de papel e celulose, por exemplo). ⁽²⁾

Nos últimos quinze anos, porém, um novo modelo do setor elétrico voltou a estimular a produção elétrica local que fosse mais eficiente e de baixo custo, levando ao aperfeiçoamento da tecnologia da cogeração, inclusive para pequeno porte ⁽²⁾. A necessidade de reduzir emissões de CO₂ também incentivou a adoção deste processo eficiente. Hoje, na Holanda e na Finlândia, a cogeração já representa mais de 40% da potência instalada.⁽²⁾

1.2.2 Óxido de etileno

O óxido de etileno é um gás que mata bactérias (e seus endosporos), mofo, e fungos, e pode conseqüentemente ser usado para esterilizar substâncias que sofreriam danos por técnicas de esterilização por calor (úmido ou seco). A esterilização por óxido de etileno para a preservação de especiarias foi patenteada em 1938 pelo químico estadunidense Lloyd Hall, e é ainda usada com este fim. Adicionalmente, óxido de etileno é largamente usado para esterilizar suprimentos médicos tais como ataduras, suturas, e instrumentos cirúrgicos. A imensa maioria dos materiais médicos é esterilizada com óxido de etileno. Os métodos preferidos têm sido a tradicional câmara de esterilização, onde uma câmara é preenchida com um misto de óxido de etileno e outros gases os quais são depois removidos por exaustão.⁽³⁾

1.2.3 Lavador de gases

Os processos de esterilização por EtO (óxido de etileno) necessitam do uso de um lavador de gases para retenção do EtO que é evacuado da câmara após a exposição do produto a ser esterilizado. A fase do ciclo de esterilização que é responsável pela retirada do EtO da câmara e do produto é chamada de lavagem, ou ainda inertização após a admissão de EtO, nesta fase a câmara é submetida a sucessivas evacuações e a admissões de nitrogênio ou CO₂ (neste estudo), também pode ser utilizado o ar atmosférico nas últimas admissões. O perfil da pressão no interior da câmara durante um ciclo de esterilização pode ser visto na Figura 3.

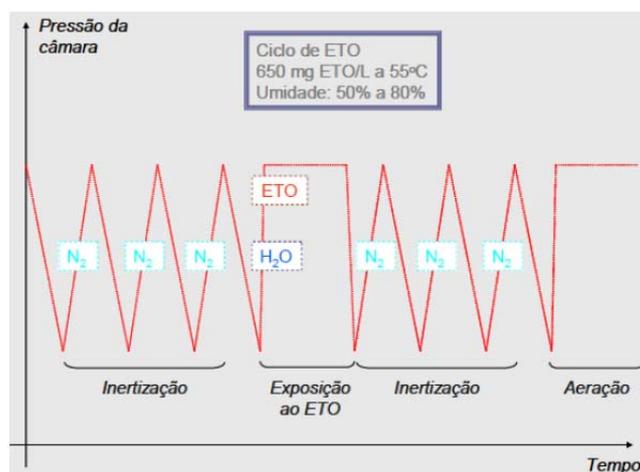


Figura 3 - Ciclo de Esterilização.⁽⁴⁾

Os lavadores utilizados em uma planta de esterilização por EtO utilizam uma solução ácida de H₂SO₄ (ácido sulfúrico) em uma concentração de 2 a 3%, obtendo-se um pH em torno de 1,5. Este mesmo lavador pode ser ajustado para ter uma maior eficiência na captura do CO₂, inclusive, pela adição de outros produtos químicos na solução de lavagem.

Alguns produtos químicos podem ser adicionados no lavador de gases responsável pela captura do EtO, de modo a aumentar a eficiência de captura de CO₂.⁽⁵⁾

2 DADOS DE ENTRADA

Este estudo parte de uma definição de uma planta de esterilização com três câmaras de esterilização com 52 m³ cada, com base neste cenário a Tabela 1 foi elaborada.

Tabela 1 - Descrição das demandas energéticas do processo

Consumos	
Potência Elétrica de (3 Câmaras) [kW]	450
Consumo de Vapor (3 Câmaras) [kg/h]	2100
Ar Condicionado (sala de controle) [TR]	4,0
Água Gelada Bomba de Vácuo (3 Câmaras) [m ³ /h]	7,5
Elevação de temperatura da Água Gelada [°C]	10
Calor gerado pela bomba de vácuo ($Q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$) [kW]	29,132
Calor gerado pela bomba de vácuo (3 Câmaras) [TR]	26
Potência térmica total de refrigeração (BBV + AC) [TR]	30
Potência térmica de outros processos [TR]	60
Potência térmica total [TR]	90
Potência Térmica (COP 0,7) [kW]	450
Razão Térmica (Heat Rate) [%]	50,0
Consumo de CO ₂ (inertização) [Nm ³ /d]	1206

2.1 Escolha da Tecnologia dos Equipamentos

O primeiro passo é a escolha da tecnologia de geração: motor a combustão interna ou turbinas ou ainda motores a vapor, a melhor tecnologia depende da faixa de potência e da relação entre potência elétrica e térmica. Para a geração destinada a cogeração o foco deve estar na característica de combinação de geração combinada de calor e energia elétrica, ou seja, AFC (Acoplamento de Força e Calor), ou ainda em Inglês, CHP (Combined Heat and Power). Na Tabela 2 podemos ver a relação de equipamentos mais indicados segundo a faixa de potência elétrica e na Tabela 3 segundo a razão entre calor e energia elétrica e eficiências.

Tabela 2 - Faixas de potência elétricas dos geradores ⁽⁶⁾

Faixa de Potência	Tecnologias
< 5 kWel	Gás natural, Stirling, células combustível
10 –50 kWel	Motores de combustão (gás, óleo), microturbinas
50 -200 kWel	Motor de combustão, microturbinas, motores a vapor
200 kWel -1 MWel	Motores de combustão, pequenas turbinas a gás (500kWel)
>1MWel	Turbinas a gás e vapor, grandes motores de combustão

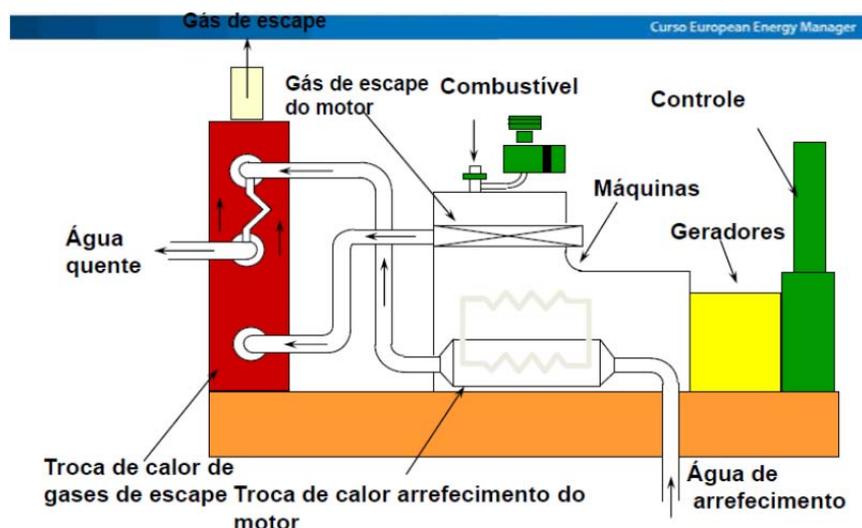
Tabela 3 - Rendimentos e eficiência dos geradores ⁽⁶⁾

Tipo	Rendimento Elétrico	Rendimento Térmico	Eficiência Total
Motor a gás	30-42%	44-52%	80-90 %
Motor a diesel	34-45%	40-48%	80-90 %
Motor a vapor	12-17 %	50-72%	75-85%
Turbinas de vapor	12-18 %	50-72%	75-85 %
Turbinas de gás	15-20%	50-70%	75-85%
Stirling	20-30%	60-70%	80-90 %
Turbina-ORC	11-15%	50-75%	75-85%

A partir dos dados de entrada e das tabelas acima apresentadas será usado um motor de combustão interna como propulsor neste projeto de Cogeração. Na Tabela 4 têm-se uma comparação entre o motor a gás natural e motor a Diesel, a partir desta tabela definiu-se o uso do motor Diesel neste projeto. Um desenho ilustrativo pode ser visto na Figura 4.

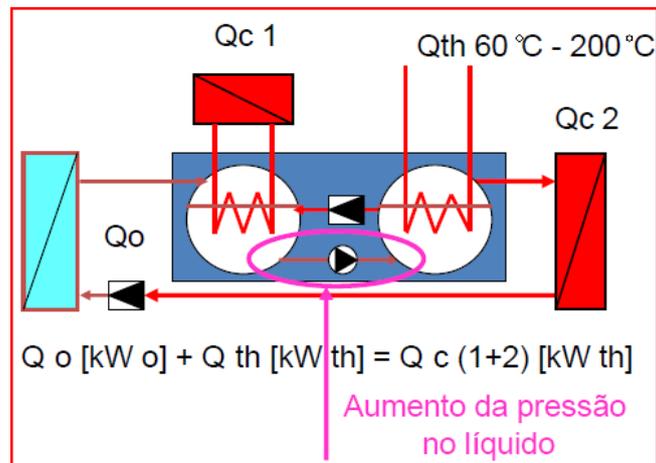
Tabela 4 - Comparação entre motores diesel e gás ⁽⁶⁾

	Diesel	Gás Natural
Emissões (sem recuperação)	Maior	Menor
Risco de desabastecimento	Menor	Maior
Custos Investimento	R\$ 650 –800 / kW	R\$ 1.100 –1.400 / kW
Custos Manutenção	R\$ 35 –50 por MWh	R\$ 20 –25 por MWh
Custos por energia gerada	R\$ 0,50 / kWh	Variável com consumo
Armazenamento	Sim	Não

**Figura 4** - Motor diesel para cogeração. ⁽⁶⁾

Neste projeto a produção de água gelada para climatização será feita através de um chiller de absorção a partir da água quente produzida pelo motor diesel, cujo

diagrama de blocos pode ser visto na Figura 4. Um chiller de absorção para esta faixa de temperatura tem um COP em torno de 0,7.



Q_o = carga térmica = calor absorvido no evaporador; Q_{c1} = calor removido do absorvedor; Q_{th} = calor fornecido ao gerador = calor motriz; Q_{c2} = calor removido do condensador; $Q_o + Q_{th} = Q_{c1} + Q_{c2}$ = Balanço de energia aplicado ao ciclo, desprezando o trabalho de bombeamento para elevar a pressão do líquido

Figura 5 - Diagrama de um Chiller de Absorção.⁽⁶⁾

A sobra de calor não utilizado pelo chiller de absorção a aproximadamente 60°C (*waste heat*) pode ser usada no aquecimento da câmara de esterilização e vaporização do EtO que possui um set-point de 55 °C.

2.2 Custos Energéticos (Concessionária)

Neste capítulo serão estimados os custos de energia elétrica deste processo, com três câmaras na tarifa azul A4. Na Tabela 5 estão descritos os consumos horários médios e as demandas, na Tabela 6 estão descritos os tempos de operação do sistema e tarifas utilizadas, na Tabela 7 os custos de energia. Na Tabela 8 estão descritos os consumos e custos do processo com o uso de nitrogênio como gás inerte.

Tabela 5 - Consumo elétrico do processo

Demanda Elétrica [kW]	450
Consumo Elétrico Médio [kWh]	135
Potência Térmica (EtO + Outros Processos) [TR]	90
Demanda Térmica (COP 3) [kW]	105
Consumo Térmico Médio (COP 3) [kWh]	42
Demanda Elétrica Total [kW]	555
Consumo Elétrico Médio Total [kWh]	177
Emissão de CO ₂ [ton/ano] (0,054kg CO ₂ por kWh)	61

Tabela 6 - Tempo de operação e tarifas elétricas

Tempo mensal em ponta [h]	66
Tempo mensal em fora ponta [h]	462
Tarifa consumo ativo faturado Fora Ponta [R\$]	R\$ 0,18605
Tarifa de demanda faturada Fora Ponta [R\$]	R\$ 27,28
Tarifa consumo ativo faturado Ponta [R\$]	R\$ 0,28519
Tarifa de demanda faturada Ponta [R\$]	R\$ 82,15

Tabela 7 - Custos de energia - A4 Azul

Custo horário do consumo ativo faturado Fora Ponta [R\$]	R\$ 32,93
Custo da demanda faturada Fora Ponta [R\$]	R\$ 15.141,09
Custo horário do consumo ativo faturado Ponta [R\$]	R\$ 50,48
Custo da demanda faturada Ponta [R\$]	R\$ 45.595,33
Custo mensal do consumo ativo faturado Fora Ponta [R\$]	R\$ 15.214,92
Custo mensal da demanda faturada Fora Ponta [R\$]	R\$ 15.141,09
Custo mensal do consumo ativo faturado Ponta [R\$]	R\$ 3.331,78
Custo mensal da demanda faturada Ponta [R\$]	R\$ 45.595,33
Custo Anual Total [R\$]	R\$ 951.397,50

Tabela 8 - Custos com nitrogênio

Consumo de CO ₂ [Nm ³ /d]	806
Consumo de CO ₂ [Nm ³ /mês]	20956
Custo do Nitrogênio [R\$/Nm ³]	R\$ 1,00
Custo Mensal com Nitrogênio (26 dias) [R\$]	R\$ 20.956,00
Custo Anual com Nitrogênio [R\$]	R\$ 251.472,00

2.3 Custos Energéticos (Usina)

Neste capítulo serão estimados os custos da usina de Cogeração e geração de água gelada com o Chiller de Absorção. Na Tabela 9 estão as estimativas dos custos de geração na usina elétrica, na Tabela 10 as estimativas dos custos com a geração de água gelada e na Tabela 11 os custos totais.

Tabela 9 - Custos de geração na usina

Custos de Investimento do Gerador (/ kW)	R\$ 800,00
Custos de Manutenção por MWh de energia instalada	R\$ 50,00
Custos da energia gerada (/ kWh)	R\$ 0,50
Custo de Investimento do gerador elétrico (500 kW)	R\$ 400.000,00
Custos Mensal de Manutenção do Gerador (177 kWh)	R\$ 5.522,40
Custos por energia gerada / h	R\$ 88,50
Custos Mensal de Energia	R\$ 55.224,00
Custo Mensal Total da Geração Elétrica	R\$ 60.746,40

Tabela 10 - Custos de geração de água gelada

Custos de Investimento Chiller de absorção / TR	R\$ 1.600,00
Custos de Manutenção Chiller de absorção por kWh	R\$ 0,03
Custos Mensal de Manutenção do Chiller (447 kW)	R\$ 8.367,84
Custos de Investimento Chiller de absorção (100 TR)	R\$ 160.000,00

Tabela 11 - Custos totais da cogeração

Custo de Investimento Total	R\$ 560.000,00
Custo Mensal da Cogeração + Chiller	R\$ 69.114,24
Custo Anual da Cogeração + Chiller	R\$ 829.370,88
Emissão de CO ₂ [g/kWh] ⁽⁷⁾	550
Emissão de CO ₂ [kg/mês]	39204
Emissão de CO ₂ [ton/ano] (sem lavagem)	470
Eficiência do Lavador	91%
Emissão de CO ₂ [ton/ano] (com lavagem)	42
Geração de CO ₂ para o processo [m ³ /mês]	77624

2.4 Economia

Neste capítulo serão estimadas as economias da usina de Cogeração e geração de água gelada com o Chiller de Absorção, o resumo desta estimativa está descrito na Tabela 12.

Tabela 12 - Viabilidade econômica da cogeração

Custo Mensal Energia Convencional	R\$ 79.283,13
Custo Mensal Com Nitrogênio	R\$ 20.956,00
Custo Energia + Nitrogênio Sem Cogeração	R\$ 100.239,13
Custo de Energia Com Cogeração	R\$ 53.219,60
Custo de Energia Com Cogeração e Chiller	R\$ 69.114,24
Economia Mensal	R\$ 31.124,89
Economia Anual	R\$ 373.498,62
Custo de Implementação	R\$ 560.000,00
Pay-Back Simples [meses]	18
TMA (taxa de atratividade)	15%
VPL (ciclo de vida de 10 anos)	R\$ 1.143.046,23
TIR (anual - ciclo de vida de 10 anos)	66%
Emissão de CO ₂ evitada [ton/ano]	18

3 CONCLUSÃO

Este projeto se mostra interessante pelo ponto de vista econômico, no entanto, mais do que isso, também se mostra também interessante pelos aspectos ambientais. O CO₂ que normalmente é descartado diretamente no ar atmosférico em projetos de Cogeração pode ser utilizado como matéria prima no processo e capturado pelo lavador de gases, que obrigatoriamente existe no processo. A opção mais barata ao CO₂ (que não possui custo neste projeto) é o Nitrogênio que é transportado por

caminhões até as plantas de esterilização, eliminando mais uma fonte de emissão de CO₂.

Existe ainda outro aspecto interessante que é a redução de matérias primas e com isso a diminuição de riscos externos a continuidade e estabilidade do processo. As utilidades serão resumidas ao óleo Diesel e água potável, o gás inerte (nitrogênio ou CO₂) e a água gelada estão inclusas no processo.

O próximo passo é a escolha dos equipamentos, obtenção das cotações e detalhamento do projeto, de modo a refinar os cálculos financeiros.

REFERÊNCIAS

- 1 Meherwan P. Boyce, **Handbook for Cogeneration and Combined Cycle Power Plants**. 2002
- 2 INEE, **Instituto Nacional de Eficiência Energética**. Disponível em : <http://www.inee.org.br/forum_co_geracao.asp>. Acesso em 19 Maio de 2012.
- 3 P. P. McClellan. **Manufacture and Uses of Ethylene Oxide and Ethylene Glycol**. Ind. Eng. Chem. 42: 2402–2407. DOI:10.1021/ie50492a013. 1950.
- 4 Air Liquide. "**Esterilização por Óxido de Etileno**". Disponível em :< http://www.br.airliquide.com/file/otherelement/pj/esterizacao_oxido_de_etileno47295.pdf>. Acesso em 19 Maio de 2012.
- 5 Campos, Lena; Maia, Ana; Menezes, Lúcia; Souza, Célio. ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental - VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. **Eficiência de Remoção de CO₂ Em Um Lavador de Gases: Efeito da Concentração das Soluções de Lavagem Sobre A Quantidade De CO₂ Absorvido**. Vitória - ES. 2002
- 6 Hendrik Wernick, **Produção combinada eletricidade e calor**. EUREM. 2012
- 7 Associação Brasileira de Energia Nuclear. **Análise comparativa das alternativas energéticas quanto às emissões diretas e indiretas de CO₂**. Disponível em: <http://www.zonaeletrica.com.br/downloads/20080410_ibama_3.pdf> Acesso em abril de 2010.