

Monografia de Graduação

Estudo técnico-econômico de um sistema de cogeração a gás natural em pequena escala

Ronaldo Carvalho Campelo

Natal, março de 2003

CAMPELO, R. C. – Estudo Técnico-Econômico e Otimização de um Sistema de Cogeração a Gás Natural em Pequena Escala. Monografia, UFRN, Departamento de Engenharia Química, Programa de Recursos Humanos – PRH 14/ANP. Áreas de Concentração: Engenharia de Processos e Modelagem e Simulação, Natal/RN, Brasil.

Orientador: Prof. PhD. Pagandai Vaithinathan Pannir Selvan

Resumo

Este trabalho busca desenvolver um projeto de cogeração de energia em pequena escala, ou seja, aproveitar duas formas de energia (elétrica e térmica) produzidas a partir da queima de um mesmo combustível (gás natural), tudo em pequena escala. O processo se dá basicamente a partir de um motor de combustão interna no qual se dá a queima do gás natural. Os gases produzidos na combustão deixam o motor a uma temperatura alta e, ao passarem por um trocador de calor, esquentam a água até que esta sai do equipamento em forma de vapor. A energia mecânica é aproveitada através de um gerador que fica acoplado ao motor. Este por sua vez produz energia elétrica que deve ser utilizada da melhor forma. A água utilizada para gerar o vapor já entra no trocador pré-aquecida, pois ela advém do motor no qual faz o resfriamento. Este procedimento faz com que a eficiência global do processo aumente, pois se aproveita uma parte da energia do combustível que seria perdida na água de resfriamento. Para que essa eficiência seja a maior possível, é importante observar qual motor será utilizado no processo, pois é nesse ponto que será definido quanto de energia será perdida (por irradiação, convecção e/ou condução) e quanto será aproveitada. De um modo geral, estima-se um aproveitamento para esse tipo de processo acima de 90% da energia total do combustível. Todo processo é realizado com a ajuda de softwares de simulação de processos da indústria química e petroquímica.

Palavras Chaves:

- Cogeração, gás natural e otimização.

Abstract

This work searches to develop a project of cogeneration of energy in small scale, or either, to take advantage of two forms of energy (electric and thermal) produced from the burning of one same fuel (natural gas), everything in small scale. The process take place basically in an engine of internal combustion where natural gas is burned. The gases produced in the combustion leave the engine at a high temperature and, passing through a heat exchanger, heat the water until it leaves the equipment in vapor form. Mechanical energy is used to advantage through a generator that is connected to the engine, this for its produces energy electric that must be used of the best form. The used water to generate the vapor enters in the preheated exchanger already, therefore it come from of the engine in which makes the cooling. This procedure makes with that the global efficiency of the process increases, therefore one has left of the energy of the fuel that would be lost in the cooling water is not more. So that this efficiency is the possible greater, it is important to observe which engine will be used in the process, therefore it is in this point that will be defined how much of energy she will be lost (for irradiation, convection and/or conduction) and how much it will be used to advantage. In a general way, an exploitation for this type of process above of 90% of the total energy of the fuel is esteem. All process is carried through with the aid of softwares of simulation of processes of the chemical and petrochemical industry.

Agradecimentos

Agradeço a Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis-ANP, que através da comissão gestora PRH14 contribuiu financeiramente para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO	I
ABSTRACT	II
CAPÍTULO 1	1
<i>Introdução</i>	<i>1</i>
CAPÍTULO 2	2
<i>Gás Natural</i>	<i>2</i>
<i>Definição e Ocorrência</i>	<i>2</i>
<i>Composição do Gás</i>	<i>3</i>
<i>Características e Propriedades</i>	<i>3</i>
<i>Cogeração</i>	<i>4</i>
<i>Definição</i>	<i>7</i>
<i>Tipos de Sistemas de Cogeração</i>	<i>7</i>
<i>Motores a Gás</i>	<i>8</i>
<i>Descrição da Tecnologia</i>	<i>8</i>
<i>Fabricantes e produtos</i>	<i>12</i>
<i>Aplicações da Cogeração</i>	<i>14</i>
<i>Estudo de Projeto</i>	<i>14</i>
<i>Sistema Proposto para o estudo de caso</i>	<i>14</i>
CAPÍTULO 3	15
<i>Balanco de Massa e Energia (SuperPro Designer)</i>	<i>15</i>
<i>Simulação do Processo e Sistema Proposto</i>	<i>15</i>
<i>Estudo de Viabilidade Técnico-Econômico (@Risk)</i>	<i>18</i>
<i>Análise Paramétrica do Sistema Proposto Baseado no</i> <i>Método de Simulação Estocástica</i>	<i>20</i>
<i>Obtenção dos Modelos para o Motor a Gás</i>	<i>22</i>
<i>Simulação do Motor e do Trocador de Calor</i>	<i>22</i>
<i>Simulação Determinística</i>	<i>23</i>
CAPÍTULO 4	25
<i>Conclusão</i>	<i>25</i>
<i>Trabalhos Futuros</i>	<i>26</i>
<i>Referência Bibliográfica</i>	<i>27</i>

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Investimento nas tecnologias de micro-geração de eletricidade nos EUA.....	5
Figura 2 - Projeção dos custos de produção de eletricidade nos EUA, para o período de 2000 a 2015	6
Figura 3 - Motor de quatro tempos.....	10
Figura 4 - Motor de dois tempos	10
Figura 5 - Flowsheet do sistema proposto.....	15
Figura 6 - Flowsheet do processo de cogeração em pequena escala com geração de vapor.....	17
Figura 7 - Relatório econômico gerado pelo simulador Super ProDesigner.....	18
Figura 8 - Gráfico da potência (kW) do motor, valores experimentais e calculados para cinco valores diferentes de rotação do motor em RPM.....	22
Figura 9 - Histograma do lucro simulado.....	24
Figura 10 - Gráfico do lucro em função do número de rotações a pressão constante.....	25

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Características dos dois tipos de motores.....	11
Tabela 2 - Manutenção necessária aos motores de êmbolos para geração de energia	12
Tabela 3 - Tipos de motores e seus fabricantes.....	13
Tabela 4 - Característica gerais de um motor da SenerTec.....	13
Tabela 5 - Especificação do motor-gerador	15
Tabela 6 - Correntes de entrada e saída da SC- I	16
Tabela 7 - Distribuição da energia no sistema de cogeração e rendimento global.....	19
Tabela 8- Codificação de variáveis	21
Tabela 9 - Parâmetros dos modelos matemáticos do motor.....	22
Tabela 10 - Resultados da simulação do motor.....	23
Tabela 11 - Resultados da simulação do trocador de calor	23
Tabela 12 - Resultado das simulações determinísticas	24

Capítulo 1

Introdução

Tendo em vista a importância que as fontes energéticas naturais e não-renováveis têm para o homem, se torna cada vez maior a preocupação com a conservação delas. Aliado a este fato, a globalização da economia exige das empresas maior competitividade, ou seja, produtos com mais características de qualidade (menor preço, mais qualidade intrínseca, melhor atendimento, menor prejuízo ambiental, etc.), o que requer processos bem dimensionados e otimizados, visando a melhoria do rendimento energético do ciclo produtivo.

Nesse contexto estão inseridos os sistemas de cogeração, que consistem na utilização simultânea da energia mecânica (potência mecânica) e da energia térmica provenientes de uma única fonte de energia primária (ex: gás natural). Esses sistemas são conhecidos como CHP (Combined Heat Power), sendo mais comum tais denominações quando a potência mecânica é utilizada na geração de energia elétrica. O avanço tecnológico e a preocupação com o rendimento energético dos processos permitiram que a energia térmica sob a forma de calor, antes desperdiçada, pudesse ser aproveitada como insumo energético em diversos processos, tais como: geração de vapor a baixa pressão, aquecimento direto e/ou indireto em plantas de processos ou conforto ambiental (para refrigeração ou aquecimento de ambientes).

Em função do aumento de sua oferta no mercado e dos seus efeitos menos poluentes, o gás natural tem ocupado um espaço cada vez maior como fonte primária de energia, seja no setor industrial, seja no setor terciário, principalmente para uso em sistemas de cogeração voltados para produção de energia elétrica.

O sistema de cogeração é composto basicamente pelos seguintes componentes: (a) motor de combustão interna; (b) gerador elétrico; e (c) sistema de recuperação de calor. O núcleo do sistema é o motor de combustão interna. Ele é responsável pela transformação da fonte de energia primária, o gás natural, em potência mecânica e calor. O calor que é dissipado para os gases e para a água de refrigeração do motor é parcialmente recuperado, correspondendo em torno de 46% da energia do combustível. Já a energia aproveitada para geração de eletricidade é cerca de 33%, o que totalizaria um aproveitamento em torno de 79% da eficiência global de energia.

Embora a tecnologia tenha proporcionado grandes avanços no campo da cogeração, ainda tem-se um alto investimento para o sistema em pequena escala, além de se ter grandes flutuações no custo, uma vez que o preço do gás está atrelado ao dólar. Assim, este trabalho busca solucionar esse problema de maneira computacional, utilizando o método Monte Carlo de simulação estocástica.

Neste trabalho, apresentam-se aspectos técnicos e econômicos preliminares da cogeração de energia com motor de combustão interna (MCI) disponíveis a nível nacional em pequena escala. O calor gerado pela combustão é aproveitado para gerar vapor, que por sua vez é empregado em diversas circunstâncias, dependendo da indústria.

Na simulação são utilizados softwares com modelos computacionais para processos, no qual se introduz a condição desejada de operação (mais provável de ocorrer) e de alimentação (vazões e concentrações). Nesse caso, tendo em vista que o projeto é de pequena escala, essas condições foram ajustadas de forma que a quantidade de energia elétrica gerada não fosse muito grande. Realizada a simulação, os softwares terão dimensionado os equipamentos e a partir daí pode-se elaborar um modelo econômico de produção que envolva custo, investimento e retorno.

Capítulo 2

Gás Natural

Definição e Ocorrência

O gás natural é, como o próprio nome indica uma substância em estado gasoso nas condições ambiente de temperatura e pressão. Por seu estado gasoso e suas características físico-químicas naturais, qualquer processamento desta substância, seja compressão, expansão, evaporação, variação de temperatura, liquefação ou transporte exigirá um tratamento termodinâmico como qualquer outro gás.

O gás natural é encontrado em reservatórios subterrâneos em muitos lugares do planeta, tanto em terra quanto no mar, tal qual o petróleo, sendo considerável o número de reservatórios que contém gás natural associado ao petróleo. Nestes casos, o gás recebe a designação de gás natural associado. Quando o reservatório contém pouca ou nenhuma quantidade de petróleo o gás natural é dito não associado.

Composição do Gás

A composição do gás natural bruto é função de uma série de fatores naturais que determinaram o seu processo de formação e as condições de acumulação do seu reservatório de origem. Os processos naturais de formação dos gás natural são a degradação da matéria orgânica por bactérias anaeróbias, a degradação da matéria orgânica e do carvão por temperatura e pressão elevadas ou da alteração térmica dos hidrocarbonetos líquidos.

A matéria orgânica fóssil é também chamada de querogêneo e pode ser de dois tipos: querogêneo seco, quando proveniente de matéria vegetal e querogêneo gorduroso, quando proveniente de algas e matéria animal. A transformação da matéria orgânica animal ou querogêneo gorduroso não sofreu o processo de cozimento e deu origem ao petróleo. Nos últimos estágios de degradação do querogêneo gorduroso, o petróleo apresenta-se como condensado volátil associado a hidrocarbonetos gasosos com predominância do metano. Por esta razão é muito comum encontrar-se reservas de petróleo e gás natural associados.

Assim, o gás natural como encontrado na natureza é uma mistura variada de hidrocarbonetos gasosos cujo componente preponderante é sempre o metano. O gás natural não associado apresenta os maiores teores de metano, enquanto o gás natural associado apresenta proporções mais significativas de etano, propano, butano e hidrocarbonetos mais pesados.

Além dos hidrocarbonetos fazem parte da composição do gás natural bruto outros componentes, tais como o dióxido de carbono (CO_2), o nitrogênio (N_2), ácido sulfídrico (H_2S), água (H_2O), ácido clorídrico (HCl), metanol e impurezas mecânicas. A presença e proporção destes elementos depende fundamentalmente da localização do reservatório, se em terra ou no mar, sua condição de associado ou não, do tipo de matéria orgânica ou mistura do qual se originou, da geologia do solo e do tipo de rocha onde se encontra o reservatório, etc.

Características e Propriedades

O manuseio do gás natural requer alguns cuidados, pois ele é inodoro, incolor, inflamável e asfixiante quando aspirado em altas concentrações. Geralmente, para facilitar a identificação de vazamentos, compostos à base de enxofre são adicionados ao gás em concentrações suficientes para lhe dar um cheiro marcante, mas sem lhe atribuir características corrosivas, sendo este processo de adição chamado de odorização.

Por já estar no estado gasoso, o gás natural não precisa ser atomizado para queimar. Isso resulta numa combustão limpa, com reduzida emissão de poluentes e melhor rendimento térmico, o que possibilita redução de despesas com a manutenção e melhor qualidade de vida para a população.

As especificações do gás para consumo são ditadas pela Portaria N° 41, de 15 de abril de 1998, emitida pela Agência Nacional do Petróleo (ANP), a qual agrupou o gás natural em 3 famílias, segundo a faixa de poder calorífico. O gás comercializado no Brasil enquadra-se predominantemente no grupo M (médio), cujas especificações são:

- Poder calorífico superior (PCS) a 20 °C e 1 atm: 8.800 a 10.200 kcal/m³;
- Densidade relativa ao ar a 20 °C: 0,55 a 0,69;
- Enxofre total: 80 mg/m³ máximo;
- H₂S: 20 mg/m³ máximo;
- CO₂: 2 % em volume máximo;
- Inertes: 4 % em volume máximo;
- O₂: 0,5 % em volume máximo;
- Ponto de orvalho a 1 atm: -45 °C máximo;
- Isento de poeira, água condensada, odores objetáveis, gomas, elementos formadores de goma, hidrocarbonetos condensáveis, compostos aromáticos, metanol ou outros elementos sólidos ou líquidos.

Cogeração

Analogamente ao que aconteceu na indústria das telecomunicações, em que as grandes operadoras de redes fixas estão a perder terreno para as recém-nascidas operadoras móveis, a liberalização do mercado e as novas tecnologias irão certamente transformar a indústria de produção e distribuição de eletricidade. Há até quem se referencie a esta mudança como “A Revolução Elétrica”.

Em alternativa às grandes centrais e às redes de distribuição em alta tensão, a produção descentralizada de eletricidade, e em particular a micro-geração, ganha cada vez mais razões para se impor como uma solução para o futuro:

- Novas tecnologias permitem produzir eletricidade com elevada qualidade de uma forma eficiente no local de consumo final, eliminando as perdas por transporte e custos inerentes às redes de distribuição em alta tensão;

- Essas novas tecnologias utilizam em sua maioria o gás natural, resultando assim em menores emissões de CO₂ em comparação aos casos em que se utilizam outros tipos de combustível (particularmente nas grandes centrais térmicas onde o combustível utilizado é o carvão);

- Existe a possibilidade de facilmente aproveitar o calor libertado na produção de eletricidade (que de outra forma seria desperdiçado), contribuindo assim para um aproveitamento mais eficiente dos recursos energéticos;

- Com estas novas tecnologias o fornecimento de eletricidade é feito com grande viabilidade, o que representa uma grande vantagem para as empresas de “e-business” já que qualquer falha no fornecimento de eletricidade pode resultar em avultados prejuízos para estas.

A liberalização do mercado da eletricidade abriu portas para o aparecimento de empresas especializadas na prestação de serviços de energia, as denominadas ESCOs (Energy Services Companies). Por outro lado, assiste-se a um forte crescimento do investimento no desenvolvimento das novas tecnologias de geração local de eletricidade. Um exemplo ilustrativo é o caso dos EUA, em que no período de 1995 a 1999 se verificou um impressionante aumento no investimento, conforme se pode verificar na Figura 1.

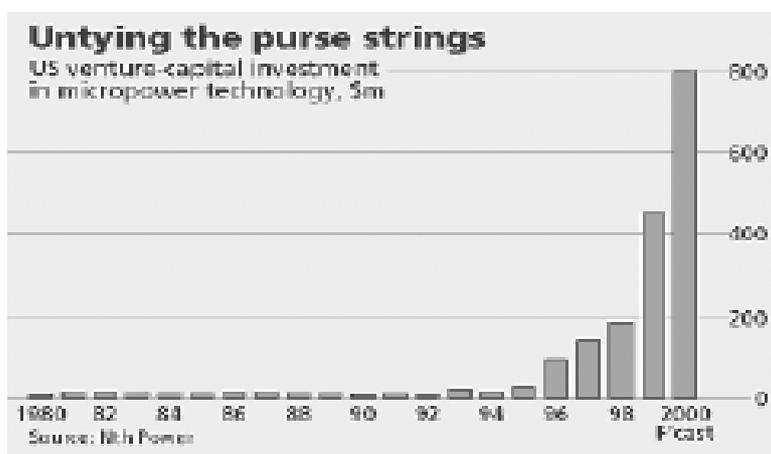


Figura 1 - Investimento nas tecnologias de micro-geração de eletricidade nos EUA

A dinâmica empresarial existente na indústria dos equipamentos para micro-produção de eletricidade é impressionante. Fusões, parcerias, compras de empresas e de patentes acontecem com enorme velocidade, transmitindo a idéia de uma grande excitação por parte dos fabricantes e distribuidores. Ninguém parece querer ficar de fora do negócio da micro-geração.

As principais tecnologias para a produção descentralizada de eletricidade (disponíveis ou em fase de desenvolvimento) são:

- Motores de combustão interna
- Micro-turbinas
- Pilhas de combustível
- Painéis solares fotovoltaicos
- Turbinas a gás industriais
- Centrais a carvão pulverizado

A Figura 2 ilustra uma projeção (2000-2015) dos custos de produção de eletricidade nos EUA, segundo o Electric Power Research Institute.

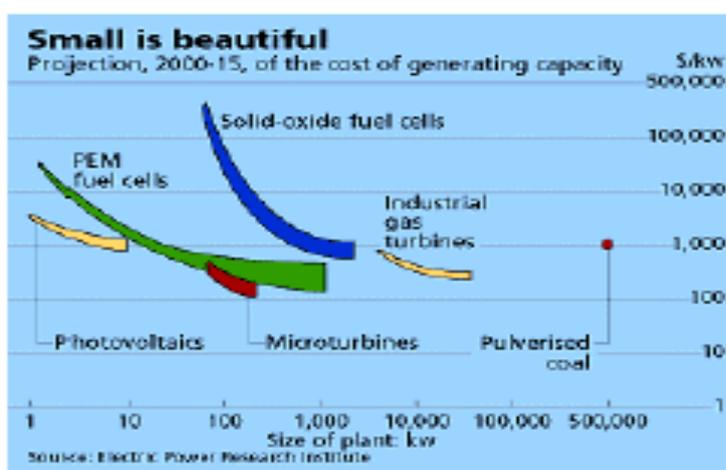


Figura 2 - Projeção dos custos de produção de eletricidade nos EUA, para o período de 2000 a 2015

De acordo com as necessidades energéticas ou vantagens econômicas, os equipamentos para micro-geração descentralizada de eletricidade podem ser utilizados de diferentes formas:

- *Consumo base (baseload)*: O equipamento funciona continuamente à sua potência nominal (rendimento máximo), inferior à potência necessária para satisfazer a totalidade das necessidades;

- *Picos de consumo (peak shaving)*: O equipamento funciona apenas para cobrir os picos de consumo,

- *Equipamento auxiliar de segurança (standby)*: Sistema de segurança que permite fornecer a potência total necessária quando ocorrem falhas inesperadas na rede elétrica;

- *Fornecimento ininterrupto de eletricidade (UPS)*: Sistema que fornece sempre uma potência constante independentemente do que se passe com a rede elétrica;

- *Geração portátil*: Sistema de produção de eletricidade que facilmente pode ser transportado para diferentes locais.

Definição

Cogeração pode ser definida como sendo a produção conjunta de trabalho mecânico e calor utilizável a partir da queima do mesmo combustível. O trabalho mecânico é em geral usado para acionar um gerador elétrico, mas poderá ter outras finalidades como o acionamento de compressores ou a propulsão de navios. O calor é quase sempre utilizado para geração de vapor para processo, ou água quente para aquecimento. Para alguns países, a definição precisa do conceito de cogeração assume uma importância elevada, pois lá foram criados programas de incentivo para tais sistemas. Como exemplo cita-se os Estados Unidos, onde a legislação criada, chamada de PURPA (Power Utilities Regulatory Policies Act) de 1978, além de definir claramente cogeração, estabelece as condições para um sistema ser enquadrado e, portanto obter os benefícios. Segundo o PURPA, cogeração é a produção combinada de eletricidade e calor obtida pelo uso seqüencial de energia a partir de um combustível.

Tipos de Sistemas de Cogeração

Os sistemas são basicamente separados em dois grandes grupos, em função da seqüência de utilização da energia, podendo ser de "topping cycle" e "bottoming cycle". Nos sistemas tipo "topping cycle", o energético, (gás natural, por exemplo) é usado primeiramente na produção de energia elétrica (ou mecânica) em turbinas ou motores a gás e o calor rejeitado é recuperado para o sistema térmico. Nos sistemas com "bottoming cycle" o energético produz primeiramente vapor, que depois de utilizado para produção de energia mecânica (e/ou elétrica) em turbinas a vapor, é repassado ao processo.

Sistemas de cogeração com turbinas a vapor e turbinas a gás, associam a produção de energia elétrica em dois ciclos, primeiramente em turbinas (ou motores a gás) e depois em turbinas a vapor. O vapor gerado nas caldeiras de recuperação é parcialmente utilizado em turbinas a vapor, com extração do vapor de baixa pressão para o processo. Estes sistemas são particularmente interessantes nos casos onde o uso do vapor é intermitente, sendo o mesmo empregado na geração de mais energia elétrica quando da baixa utilização de vapor no processo.

A escolha de uma das soluções acima é função do perfil de necessidades elétricas e térmicas de cada aplicação. Os sistemas "topping cycle" são de emprego mais

amplo e mais difundidos, podendo empregar turbinas ou motores a gás (ou a diesel). Em um ciclo deste tipo, o calor dos gases de descarga de uma turbina pode ser empregado:

- a) para geração de vapor, normalmente em pressões até 40 bar, com amplo uso para instalações industriais e comerciais;
- b) para geração de água quente, muito utilizado nos países nórdicos para aquecimento distrital;
- c) para uso direto em processos industriais, como secagem, fornos, etc;
- d) para uso em sistemas de refrigeração por absorção (empregando vapor).

Motores a Gás

Os motores a gás são disponíveis para aplicação em sistemas de cogeração, sendo que vários fabricantes dispõem de modelos especificamente preparados para este tipo de aplicação.

Em geral, eles apresentam uma eficiência elétrica maior do que as turbinas a gás, conseguindo converter algo ao redor de 32% a 40% da energia do combustível em energia mecânica, enquanto as turbinas conseguem tipicamente de 22% a 35% (turbinas de maior porte conseguem atingir eficiências maiores, chegando em alguns casos a 40%). [Guimarães]

Eles possuem características específicas diferentes dos motores para uso em regime de emergência, devido principalmente à operação em regime contínuo e ao sistema de resfriamento, apropriado para permitir a recuperação de calor. Nas turbinas a gás, todo o calor a ser recuperado está disponível nos gases de descarga o que não acontece nos motores a gás. Neste caso uma considerável parte da energia térmica é liberada pelo sistema de resfriamento do bloco, do óleo e do *after-cooler*. O restante sai pelos gases de descarga.

Descrição da Tecnologia

Nos motores de êmbolos, usualmente conhecidos como motores de combustão interna, a energia química contida no combustível é convertida em energia mecânica. Se existir um alternador acoplado, esta energia mecânica poderá ser convertida em eletricidade.

A mistura ar-combustível antes da combustão e os produtos da combustão são os fluidos de trabalho. A potência mecânica disponível é obtida após ocorrer a transferência de energia entre estes fluidos e os componentes mecânicos do motor. Existem muitos tipos de motores de combustão interna. Os parâmetros normalmente

utilizados para os caracterizar são os seguintes:

1. *Aplicação*: Transportes, produção de energia elétrica, cogeração.
2. *Desenho do motor*: Motores de êmbolos (por sua vez subdivididos em motores em linha, em V, etc.), motores rotativos (tipo Wankel, etc.).
3. *Ciclo*: Ciclo de quatro tempos ou ciclo de dois tempos.
4. *Desenho e localização das válvulas*: *Overhead*, *underhead*, válvulas rotativas, etc.
5. *Combustível*: Gasolina, fuel-oil, gás natural, GLP, hidrogênio, gasóleo, álcoois, etc.
6. *Método de preparação da mistura*: Carburador, injeção indireta, injeção direta.
7. *Desenho da câmara de combustão*.
8. *Método de Ignição*: Ignição por faísca, ignição por compressão.
9. *Método de controle da carga*: controle do caudal da mistura ar-combustível ou do combustível apenas.
10. *Método de arrefecimento*: Arrefecimento a água, arrefecimento a ar, etc.

Os motores de ignição por faísca (ou motores de explosão) funcionam segundo o ciclo Otto e utilizam gasolina ou combustíveis gasosos. Neste tipo de motores a energia de ativação necessária para iniciar a combustão é fornecida através da libertação de uma faísca entre os eletrodos de uma vela.

Nos motores de ignição por compressão, usualmente denominados por motores Diesel, o combustível utilizado é o gasóleo ou um *fuel* mais pesado (menos refinado). O ar introduzido na câmara de combustão (cilindro) sofre uma compressão muito superior à que ocorre nos motores Otto. Como consequência, a sua temperatura atinge um valor suficientemente elevado para iniciar a combustão de uma forma espontânea.

Devido à sua simplicidade, robustez e elevada razão potência/peso, estes dois tipos de motores são utilizados nas mais variadas situações, como por exemplo, nos transportes (terrestres, marítimos e aéreos) e na produção de eletricidade. A maioria dos motores funciona segundo o ciclo de quatro tempos, conforme representado na Figura 3.

O ciclo de dois tempos foi desenvolvido de forma a obter uma maior potência por unidade de volume do motor e um desenho de válvulas mais simples. A Figura 4 representa o tipo mais simples de motores de dois tempos.

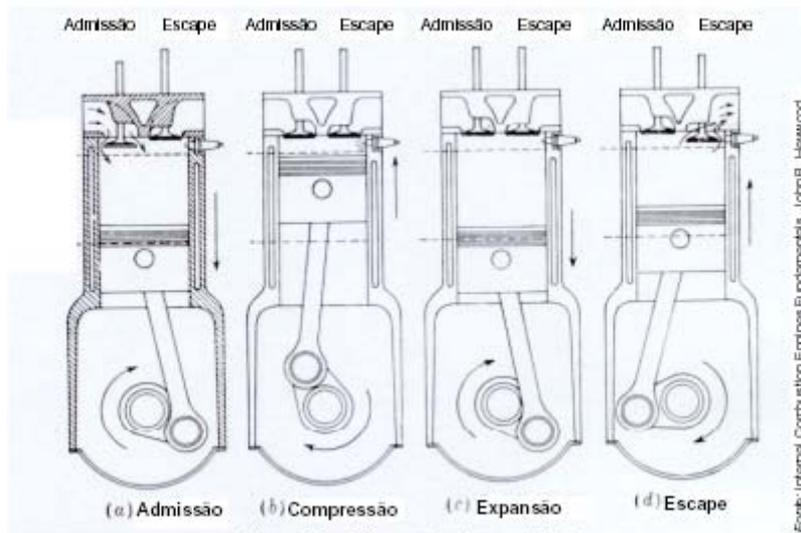


Figura 3 - Motor de quatro tempos

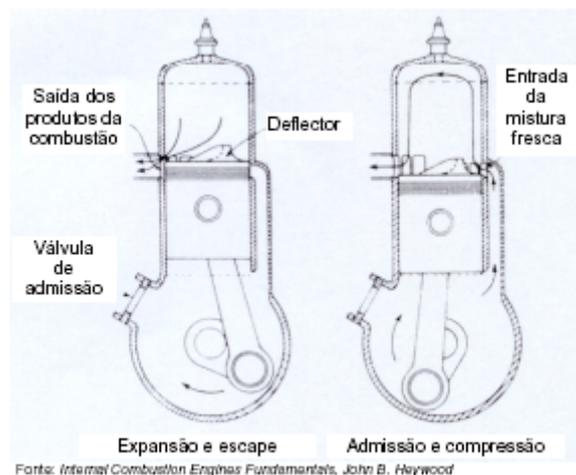


Figura 4 - Motor de dois tempos

Os turbocompressores são utilizados para aumentar a potência máxima que pode ser obtida num ciclo de combustão e conseqüentemente a potência por unidade de peso do motor. A potência que o motor pode fornecer depende da quantidade de combustível queimado por ciclo e por cilindro e também da quantidade de ar fresco que é introduzida em cada ciclo. Através de um aumento na densidade do ar, antes da entrada deste no cilindro, consegue-se aumentar a potência do motor. Um turbocompressor utiliza a energia contida nos gases de escape para acionar um compressor acoplado a um mesmo veio.

Outra forma de aumentar a densidade do ar é diminuir a sua temperatura, o que pode ser conseguido utilizando *intercoolers* e *aftercoolers*, que nada mais são do que permutadores de calor.

A Tabela 1 resume as características dos motores de ignição por faísca e por compressão.

Tabela 1- Características dos dois tipos de motores

Formas de Ignição	Combustíveis	Novas características
FAÍSCA	Gasolina Álcool (metanol, etanol) Hidrogênio Gás natural GLP ...	<ul style="list-style-type: none"> •Turbocompressão •Aftercooling / Intercooling •Gestão eletrônica do motor •Manutenção eletrônica do motor •Quatro válvulas por cilindro •Válvulas com controle variável •injeção direta •Tratamento dos gases de escape
COMPRESSÃO	Diesel (gasóleo) Biodiesel Óleo de pirólise ...	<ul style="list-style-type: none"> •injeção eletrônica hidráulica •injeção mecânica •Mudança de injeção indireta para direta •Turbocompressão •Aftercooling / Intercooling •Gestão eletrônica do motor •Manutenção eletrônica do motor •Quatro válvulas por cilindro •Tratamento dos gases de escape

Fonte: "Opportunities for Micro power and Fuel Cell / Gas Turbine Hybrid Systems in Industrial Applications", Arthur D. Little Inc

Os motores de êmbolos para produção de eletricidade têm as seguintes características gerais:

- Ignição por compressão ou por faísca
- Ciclo de dois ou quatro tempos
- Arrefecimento a água
- Possibilidade de produção combinada de eletricidade e calor
- Gama de potências: 5 kW →60 MW

Para este tipo de utilização, as necessidades de manutenção atuais e previstas para o ano 2010 estão indicadas na Tabela 2, segundo Arthur D. Little.

Tabela 2 - Manutenção necessária aos motores de êmbolos para geração de energia

Manutenção	Combustível usado	Potência do motor [kW]	Ano 2000 (horas)	Ano 2010 (horas)
Mudança do filtro de óleo	Gás natural	0 – 400	2000	10000
		401 – 1000	5000	20000
	Diesel	301 – 1000	1000	-
Mudança de óleo	Gás natural	0 – 400	2000	4000
		401 – 1000	2500	5000
	Diesel	301 – 1000	1000	-
Mudança das velas	Gás natural	0 – 400	4000	8000
		401 – 1000	5000	10000
Mudança dos injectores	Diesel	301 – 1000	5000	10000
Revisão geral	Gás natural	0 – 400	48000	75000
		401 – 1000	60000	120000
	Diesel	301 – 1000	20000	30000

Fonte: "Opportunities for Micropower and Fuel Cell / Gas Turbine Hybrid Systems in Industrial Applications", Arthur D. Little Inc

Fabricantes e produtos

A maioria dos fabricantes possui uma gama muito completa de motores abrangendo um vasto leque de potências. Apresenta-se na Tabela 3, de uma forma resumida, a oferta existente por parte dos principais fabricantes.

Parece interessante notabilizar o fato de que recentemente vários fabricantes de motores apostaram no desenvolvimento de pequenos módulos de micro-(co)geração equipados com motores de potência reduzida, capazes de satisfazer a totalidade das necessidades de eletricidade e calor de uma casa unifamiliar ou, no caso de montagem de vários módulos, de um edifício residencial multifamiliar, de um hotel ou de uma pequena empresa.

Um exemplo desses equipamentos é o proposto pela SenerTec, cujas características gerais estão indicadas na Tabela 4.

Tabela 3 - Tipos de motores e seus fabricantes

Fabricante	Tipo de combustível					Gama de potências [MW]												
	Diesel	Heavy Fuel	Dual Fuel	Gás Natural	GPL	0	0.25	0.50	0.75	1.0	5.0	10.0	20.0	30.0	40.0	50.0	60.0	70.0
Caterpillar	*			*		#####												
Coltec Industries	*	*	*	*			#####											
Cooper Cameron	*		*	*	*		#####											
Cummins	*			*	*	#####												
Daewoo	*					#####												
Daihatsu	*					#####												
Deere & Co.	*			*		####												
Detroit Diesel	*			*		#####												
Deutz AG	*			*	*	#####												
EMD GM	*						#####											
Fiat / Iveco	*					####												
Ford Power	*			*	*	###												
GEC Alsthom	*	*	*	*				#####										
GM Powertrain	*			*	*	###												
Isuzu	*					####												
Jenbacher				*	*	#####												
Komatsu	*					#####												
Kubota	*					###												
MAN	*		*	*		#####												
Mercedes-Benz	*					#####												
Mitsubishi	*			*		#####												
MTU	*					#####												
Niigata	*		*	*		#####												
Perkins	*			*	*	#####												
Peugeot / Citroen	*					##												
PowerLine Systems				*		!												
Rolls Royce	*							#####										
SEMT Pielstick	*	*						#####										
SenerTec				*		!												
Scania	*					####												
Volvo Penta	*			*		#####												
Waukesha				*		#####												
Wartsila	*			*				#####										
Yanmar	*					#####												

Fonte: "Opportunities for Micropower and Fuel Cell / Gas Turbine Hybrid Systems In Industrial Applications", Arthur D. Little Inc (adaptado)

Tabela 4 - Característica gerais de um motor da SenerTec

Fabricante /Produto	Potência elétrica	Rendimento elétrico	Potência Térmica	Rendimento cogeração	Combustíveis	Dimensões	Peso
SenerTec/HK A	5.5 kW	27 %	12.5 kW	90 %	Gás natural; GLP; Biodiesel; fuel óleo.	1060x720x1000	520 kgf

Aplicações da Cogeração

O campo de aplicação dos sistemas de cogeração é bastante vasto, tanto no setor industrial quanto no terciário. Os usuários com o maior potencial de aplicação e rentabilidade são aqueles que operam seus sistemas em regime de 24 horas, com elevado consumo de eletricidade e calor. Na área industrial são possíveis, por exemplo, os seguintes usos:

- · Geração de vapor de baixa, média e alta pressão.
- · Calor direto da turbina para ar de alimentação de fornos
- · Secagem de grãos e de produtos
- · Aquecimento de óleos e fluidos industriais

No setor terciário pode-se aplicar a Cogeração em hotéis, hospitais, centros de processamento de dados, shopping centers, edifícios comerciais, etc. Nestes casos o calor de descarga poderá ser empregado para geração de vapor e/ou água quente para aquecimento (ambiental ou de água predial), para cozinhas, etc.

Para o condicionamento de ar, empregando-se unidades de absorção a base de água - brometo de lítio, pode-se substituir os compressores de refrigeração com grande redução de demanda, além da economia de energia.

Uma das aplicações interessantes é a utilização do vapor para geração de frio a baixa temperatura (até -60°C), com o emprego de unidades de absorção de projeto especial, empregando amônia e água.

Estudo de Projeto

Sistema Proposto para o estudo de caso

Para a realização deste trabalho foram utilizados diversos softwares, entre os quais, SuperPro Designer, @Risk for Excel e Statistica com a finalidade de realizar a simulação do sistema de cogeração com geração de vapor em pequena escala. Antes de se iniciar a simulação propriamente dita, realizou-se a síntese do processo e para isso foi necessário pesquisar a respeito dos equipamentos mais adequados e suas variáveis de operação. O sistema consiste basicamente de dois equipamentos principais: o motor-gerador e o trocador de calor. A idéia é aproveitar ao máximo a energia produzida pela combustão do gás natural, aumentando o rendimento energético. Para isso, a água que será utilizada para gerar vapor é a que sai da jaqueta de resfriamento do motor e por isso, já está pré-aquecida (82°C). A alta temperatura dos gases de escape também se

deve à combustão do gás natural que transfere grande quantidade de energia para os gases de exausto.

Com o intuito de tornar o trabalho mais prático, foi realizada uma pesquisa no mercado para se obter um motor que satisfizesse as condições do sistema e fosse viável economicamente para pequenas instalações. Uma outra vantagem obtida foi conseguir junto ao fabricante todos os dados necessários para fazer a modelagem matemática do motor-gerador e assim deixar os resultados mais reais, pois, caso contrário, teria que ser realizado a modelagem convencional (tratada pelas equações termodinâmicas para o ciclo de Carnot), sem a utilização dos *softwares*, pois os simuladores não possuem suas características como equipamento em seus bancos de dados.

A seguir são mostrados um *flowsheet* do sistema proposto (Figura 5) e a especificação do motor-gerador proposto para atender as necessidades elétricas e térmicas (Tabela 5).

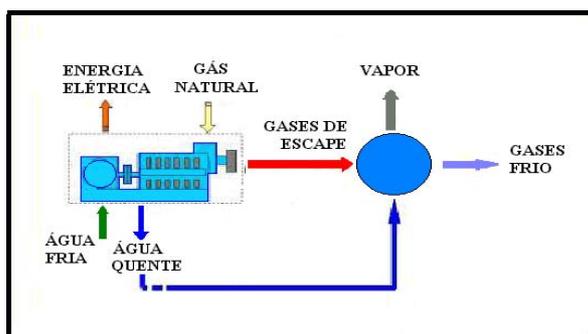


Figura 5 - Flowsheet do sistema proposto

Tabela 5 - Especificação do motor-gerador

Fabricante	Dresser Waukesha
Modelo	F11G
Preço	R\$ 95.000,00
Razão de compressão	10:1
Cilindros	6 em linha
Volume da jaqueta	27 L
Consumo médio entre 1200 e 1800 rpm para um gás com PCS de 37,25MJ/m ³	22,28 m ³ /h

Capítulo 3

Balço de Massa e Energia (SuperPro Designer)

Simulação do Processo e Sistema Proposto

Para a realização deste trabalho foi utilizado o software SuperPro Designer nas versões 3.0 (completa) e 4.5 (demonstrativa) com a finalidade de realizar a simulação do sistema de cogeração com a geração de vapor em pequena escala. Antes de se iniciar a simulação propriamente dita, realizou-se a síntese do processo e para isso foi

necessário pesquisar a respeito dos equipamentos mais adequados e suas variáveis de operação.

Uma vez que o simulador não dispõe de um equipamento que desempenhe as funções do motor-gerador, foi necessário delimitar duas superfícies de controle (SC) para o sistema, a fim de se realizar o balanço de massa e energia. A primeira superfície envolve todas as entradas e saídas do motor (SC-I) e a segunda (SC-II), as entradas e saídas do trocador de calor, sendo que as suas entradas coincidem com as saídas do motor. A SC-I teve seus cálculos realizados de modo manual. Já para a segunda, foi utilizado o SuperPro Designer.

A composição do gás natural adotada corresponde, em média, à do gás processado em Guamaré-RN e para a combustão foi considerado 10% de ar em excesso. Como a composição do gás é muito variável, mudando até em um mesmo poço, admitiu-se, para o poder calorífico superior (PCS) do gás, o valor que ele tem no mercado: cerca de 9400 kcal/m³. A Tabela 7 mostra as correntes de entrada e saída para a SC-I, com suas composições e vazões (considerando, para base de cálculo, 1 m³ de gás natural). Para que fosse calculada a vazão da água de refrigeração (que é a mesma tanto para fria quanto para quente) foi adotado um modelo de distribuição de energia elaborado por Rosa e Silva (2000), sendo comprovado posteriormente que esse modelo não era adequado para o sistema. A vazão correta só pôde ser determinada mais tarde com os modelos obtidos com dados de operação do motor fornecidos pelo fabricante.

Tabela 6 - Correntes de entrada e saída da SC- I

CORRENTES	COMPOSIÇÃO (fração percentual)							VAZÃO (m ³ /h)
	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₃ H ₈	N ₂	CO ₂	O ₂	H ₂ O	
GN	0,8856	0,0917	0,0042	0,0120	0,0065	-	-	1
AR	-	-	-	0,7671	-	0,2329	-	8,6
GASES	-	-	-	0,6952	0,0986	0,0192	0,1870	9,504
ÁGUA FRIA	-	-	-	-	-	-	1	?
ÁGUA QUENTE	-	-	-	-	-	-	1	?

Já para a SC-II, os cálculos foram todos realizados pelo simulador, sendo dimensionados os equipamentos e obtido um relatório econômico preliminar sobre a viabilidade do projeto. Na Figura 6, a seguir, é mostrado o *flow sheet* do processo elaborado no SuperPro Designer para a realização do dimensionamento dos equipamentos a partir dos balanços de massa e energia realizados por ele.

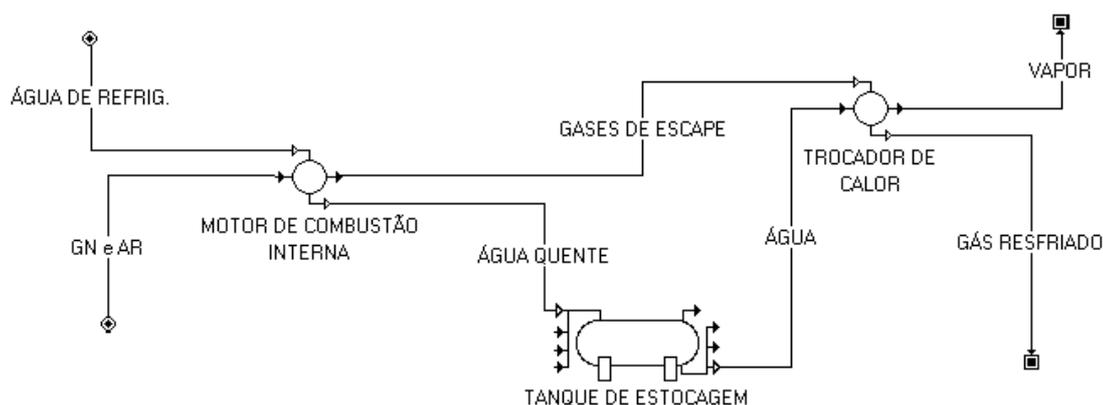


Figura 6 - Flowsheet do processo de cogeração em pequena escala com geração de vapor

Para que o sistema proposto forneça a quantidade de energia desejada, cerca de 80 kW, considerou-se o balanço energético proposto por Rosa & Silva (2000), além dum gerador com eficiência de 95%. Considerando o PCS do gás e suas reações estequiométricas de combustão, chegou-se a uma vazão de 18,35m³/h de gás natural e 172,857 m³/h de ar em condições normais de temperatura e pressão. Na câmara de combustão, a temperatura dos gases atinge até 700°C, porém a saída dos gases está em torno de 430°C. No sistema de resfriamento, a água utilizada entra a uma temperatura em torno de 85°C, troca calor com os gases na câmara de combustão através de camisas, saindo em torno de 98°C ou mais, sendo seu ΔT limite menor do que 20°C. Sua vazão foi calculada segundo o modelo $Q = m \cdot Cp \cdot \Delta T$, onde o valor de Q é dado segundo o balanço energético típico, ou seja, Q corresponde a 22% do PCS do gás natural.

Saindo do motor a corrente de água quente segue para um tanque de estocagem adiabático que, trabalhando em regime estacionário, poderá fornecer água quente a várias partes do processo, uma delas é o trocador de calor, responsável pela transformação dessa água em vapor. A água troca calor com os gases provenientes da combustão do gás. O vapor gerado pode atingir cerca de 115°C e pode ser aproveitado para secar frutas, constituir um sistema de refrigeração, dentre outras.

Eventualmente poderá ser desenvolvido, o que não é muito difícil, uma forma de aproveitar a energia que ainda resta nos gases de escape após a geração de vapor. Estuda-se a possibilidade dela ser utilizada para aquecer a água de resfriamento que entra no motor.

Quanto à parte econômica do processo, já foi realizada uma pesquisa preliminar de mercado a fim de determinar o modelo do motor mais adequado, o preço de mercado do gás natural e da energia elétrica. Está sendo providenciada também a determinação de um modelo de trocador (de placas) que seja constituído por um material que resista à corrosão provocada pela alta temperatura dos gases de escape.

Dessa forma, sabendo que o preço da energia elétrica é de R\$0,10 e o do gás natural, segundo a distribuidora do estado (Potigás), pode ser adquirido por R\$ 0,3253/m³, pode-se realizar um balanço econômico preliminar. Para esse balanço utilizou-se também o simulador SuperPro Designer, que nos fornece como saída um texto com o resultado da análise realizada. A Figura 4 mostra parte deste relatório.

EXECUTIVE SUMMARY (2002 prices)		
TOTAL CAPITAL INVESTMENT	158000	\$
CAPITAL INV. CHARGED TO THIS PROJECT	158000	\$
OPERATING COST	58000	\$/year
PRODUCTION RATE	990000	kg/year of S-106
UNIT PRODUCTION COST	0.059	\$/kg of S-106
TOTAL REVENUES	130000	\$/year
GROSS MARGIN	54.91	%
RETURN ON INVESTMENT	35.91	%
PAYBACK TIME	2.78	years
IRR AFTER TAXES	25.55	%
NPV (at 7.0 % interest)	204000	\$

Figura 7 - Relatório econômico gerado pelo simulador Super ProDesigner

Estudo de Viabilidade Técnico-Econômico (@Risk)

Como forma de determinar as possibilidades de se obter lucro com o projeto, ou seja, tornar o projeto viável economicamente, foi realizado um estudo para se determinar em que condições o motor-gerador deve operar. Para isso foram realizadas, a partir de dados empíricos fornecidos pelo fabricante do motor-gerador, regressões matemáticas com auxílio do software Statistica, utilizando-se o método quasi-Newton. As variáveis de saída (dependentes) do motor servem como variáveis de entrada para o

trocador de calor, são elas: a energia no exausto (E_G), o consumo de gás natural (C_{GN}), a temperatura dos gases de exausto (T_G), a energia transmitida para a água de resfriamento (E_A) e a vazão de gases no exausto (V_G). Todas elas dependem de duas variáveis (independentes) de operação do motor: o número de rotações (rpm) e a pressão (bar). Os modelos obtidos são como mostrado na equação (1), onde b_i ($i=1,2,3,4,5$) são parâmetros, x é o número de rotações (rpm) e y a pressão (bar).

$$E_G = b_0 + b_1 x + b_2 y + b_3 x y + b_4 x^2 + b_5 y^2 \quad (1)$$

Com esses modelos foi possível fazer simulações (num total de oito) com valores aleatórios de pressão e rotação dentro dos limites do motor, incluindo o máximo e o mínimo. Em seguida, foi possível determinar o rendimento global do sistema (Tabela 2), ou seja, o aproveitamento da energia gerada pela combustão do gás natural.

De posse dos resultados dessas simulações, também foi possível simular, utilizando o software SuperPro Designer 4.5, a troca de calor entre os gases do exausto e a água de resfriamento do motor, que segundo o fabricante, em condições padrões, sempre deixa a jaqueta com 82°C. Dessas simulações foi possível obter a quantidade de vapor gerado, considerada, juntamente com a energia elétrica, neste caso, como produto.

Tabela 7 - Distribuição da energia no sistema de cogeração e rendimento global

Ensaio	Pressão (bar)	Rotações (rpm)	Energia Elétrica	Energia da Jaqueta	Energia do Exausto	Rendimento global aprox. do sistema
1	1,72	1200	19,8%	47,7%	26,8%	94,3%
2	2,00	1250	21,4%	46,5%	26,2%	94,0%
3	3,50	1300	26,9%	41,4%	25,4%	93,7%
4	4,00	1350	28,1%	40,1%	25,5%	93,7%
5	4,50	1450	29,0%	38,7%	26,0%	93,8%
6	5,50	1550	30,5%	36,6%	26,9%	94,1%
7	6,00	1700	30,9%	35,2%	28,0%	94,2%
8	6,74	1800	31,6%	33,9%	28,9%	94,4%

Para realizar uma simulação do trocador de calor no software utilizou-se a seguinte seqüência:

- Iniciou-se, utilizando bancos de dados do simulador SuperPro Designer, as substâncias e os agentes de transferência de calor que são utilizados durante o processo;
- Selecionaram-se os equipamentos utilizados no processo;
- Discriminaram-se as informações sobre as correntes de entrada (obtidas na simulação do motor) e os parâmetros de processo;
- Efetuou-se a simulação do processo, realizando automaticamente os cálculos de balanço de massa, balanço energético e informações das correntes de saída.

Assim, foram realizadas oito simulações para o trocador de calor, onde as variáveis das correntes de entrada correspondem as de saída do motor.

Análise Paramétrica do Sistema Proposto Baseado no Método de Simulação Estocástica

Para se determinar qual a melhor condição de operação do sistema, é necessário primeiramente determinar em quais condições o sistema pode operar de forma que dê lucro, ou seja, operando sob determinadas condições o sistema pode não ser viável. Assim, a partir das oito simulações realizadas do sistema, onde se utilizou o valor máximo e o mínimo das variáveis de operação, pode-se determinar qual a probabilidade de se obter lucro baseado nas condições de operação.

Considerando que no processo seja consumido apenas gás natural e produzido vapor e energia elétrica, foram estabelecidas V1, V2 e V3 como sendo as variáveis estocásticas, onde seus valores podem ser obtidos pelas equações (2), (3) e (4) respectivamente.

$$V1 = C_{GN} \times P_{GN} \quad (2)$$

$$V2 = Q_V \times P_V \quad (3)$$

$$V3 = Q_E \times P_E \quad (4)$$

Onde C_{GN} é o consumo de gás natural em m^3/h , Q_V a quantidade de vapor produzida em ton/h, Q_E a quantidade energia produzida em P_{GN} o seu respectivo preço em $R\$/m^3$.

Sabendo que o lucro depende diretamente das variáveis de produção conforme a equação (5), foi construída uma tabela onde os maiores valores (+) e menores valores (-)

de cada variável são distribuídos de forma a realizar todas as combinações possíveis entre eles (Tabela 8), obtendo para cada linha da tabela um valor diferente para o lucro.

$$L = R - C_T = (V2 + V3) - (C_F + V1) \quad (5)$$

Onde CF é o custo fixo unitário (custo de capital, manutenções, e outros que não dependem da produção) e C_T é o custo total. Comparando o segundo termo da equação (5) com o terceiro, pode-se perceber que a soma de V2 e V3 é a receita e V1 é igual ao custo variável. Dessa forma fica claro como as variáveis V1, V2 e V3 interferem no valor do lucro.

Com o objetivo de determinar como o lucro se comporta em função das três variáveis de produção, foi realizada uma nova regressão utilizando o Statistica, e também pelo método quasi-Newton, obteve-se um modelo, chamado de função lucro ou objetivo.

Tabela 8- Codificação de variáveis

V1	V2	V3	L _{observado}
+	+	+	?
+	+	-	?
+	-	+	?
+	-	-	?
-	+	+	?
-	+	-	?
-	-	+	?
-	-	-	?
(+) → maior valor obtido da variável (-) → menor valor obtido da variável (?) → lucro observado de acordo com os valores das variáveis			

Obtida a função, ela foi levada ao simulador @Risk 4.5 for excel que realizou simulações estocásticas, ou seja, atribuiu valores aleatórios para as variáveis V1, V2 e V3 e através da função objetivo determinou o valor do lucro. Dada a rapidez e praticidade com que o software executa tal tarefa e a fim de se obter uma boa amostragem, pediu-se que ele executasse mil simulações.

Em seguida, foi plotado um histograma com quinhentos pontos dentre os mil simulados, para que se observasse a porcentagem em que se obtém um lucro satisfatório.

Obtenção dos Modelos para o Motor a Gás

A seguir, na Tabela 9, são mostrados os valores dos parâmetros de b_0 a b_5 para cada variável de saída do motor e na Figura 8, um gráfico ilustrando a potência do motor através dos dados experimentais e dos calculados.

Tabela 9 - Parâmetros dos modelos matemáticos do motor

Parâmetros	Variáveis dependentes da pressão (x) dado em bar e do número de rotações (y) em rpm				
	E_G (kW)	C_{GN} (kW)	T_G (°C)	E_A (kW)	V_G (Kg/h)
b_0	52,83862	40,90514	84,08279	-7,98041	69,21229
b_1	-4,86522	-0,44895	23,61122	3,48028	0,832457
b_2	-0,06096	-0,02409	0,259495	0,033158	-0,04638
b_3	0,0076	0,022232	-0,00422	0,003548	0,028971
b_4	0,310357	0,008004	0,036181	$9,25 \cdot 10^{-4}$	-0,11079
b_5	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$2,6 \cdot 10^{-5}$	0	$3,7 \cdot 10^{-5}$

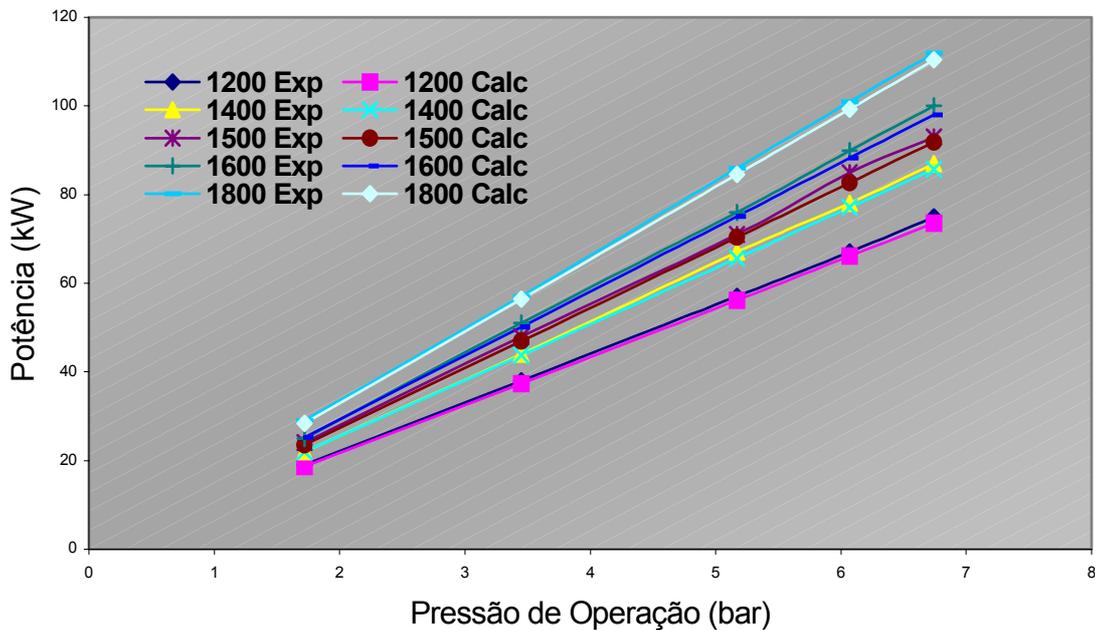


Figura 8 - Gráfico da potência (kW) do motor, valores experimentais e calculados para cinco valores diferentes de rotação do motor em RPM.

Simulação do Motor e do Trocador de Calor

Para realizar a simulação do motor foram lançados, de forma aleatória, valores de pressão (x), e número de rotações (y). Estes valores abrangem os limites máximos e

mínimos de cada uma das duas variáveis especificados pelo fabricante, sem, contudo, ultrapassá-los. Os resultados das simulações (realizadas utilizando os modelos matemáticos obtidos para o motor) forneceram os dados para a simulação do trocador de calor utilizando o SuperPro Designer (Tabelas 10 e 11).

Tabela 10 - Resultados da simulação do motor

Variáveis independentes		Entrada de água no trocador		Entrada de gases de escape no trocador	
X (bar)	Y (rpm)	T ₁ (°C)	Q (L/h)	T ₁ (°C)	Q(L/h)
1,72	1200	82	766,073	390,05	250062,53
2,00	1250	82	837,046	404,65	285508,95
3,50	1300	82	1077,444	441,38	432005,37
4,00	1350	82	1186,399	459,27	501649,52
4,50	1450	82	1340,069	485,15	605013,72
5,50	1550	82	1576,092	518,84	781816,50
6,00	1700	82	1791,067	550,04	956,919,72
6,74	1800	82	2007,622	576,56	1147910,1

Tabela 11 - Resultados da simulação do trocador de calor

Variáveis independentes		Saída de vapor do trocador		Saída de gases de escape do trocador	
X (bar)	Y (rpm)	T ₂ (°C)	Q (L/h)	T ₂ (°C)	Q(L/h)
1,72	1200	97,0	770,4	87	110417,5
2,00	1250	98,1	842,1	87	123353,6
3,50	1300	102,3	1794410,3	87	177052,6
4,00	1350	104,0	1985039,9	87	200573,7
4,50	1450	106,5	2256632,0	87	233645,7
5,50	1550	110,2	2679916,9	87	289080,5
6,00	1700	113,5	3072278,9	87	340415,3
6,74	1800	116,8	3472775,8	87	395613,3

Pode-se observar na Tabela 11 que para as duas primeiras simulações, a temperatura dos gases de escape não é suficiente para a geração de vapor, obtendo-se líquido saturado.

Simulação Determinística

A partir das equações (2), (3) e (4), pôde-se obter os valores mínimos e máximos de V1, V2 e V3 que são respectivamente 2,0455 e 7,5449, 823,8622 e 1585,7207 e

0,1404 e 0,8276. O valor do lucro foi determinado de acordo com a combinação dos valores das variáveis estocásticas. O custo fixo unitário foi estimado em R\$ 5,3161. Os resultados das simulações determinísticas são mostrados na Tabela 7.

Realizada a regressão com os valores da Tabela 12, foi obtido a equação (6) que é a função lucro para o processo.

Tabela 12 - Resultado das simulações determinísticas

Ensaio	V1	V2	V3	L _{observado}
1	7,5449	1585,7207	0,8276	1573,69
2	7,5449	1585,7207	0,1404	1573,00
3	7,5449	823,8622	0,8276	811,83
4	7,5449	823,8622	0,1404	811,14
5	2,0455	1585,7207	0,8276	1579,19
6	2,0455	1585,7207	0,1404	1578,50
7	2,0455	823,8622	0,8276	817,33
8	2,0455	823,8622	0,1404	816,64

$$L = -3091,6 - 4921,24V1 + 21,33717V2 - 178,486V3 + 513,0335V1^2 - 0,008441V2^2 + 185,4095V3^2 \quad (6)$$

A partir dos valores gerados de forma randômica pelo simulador foram calculados mil valores para o lucro, dos quais quinhentos deram origem ao histograma ilustrado na Figura 9.

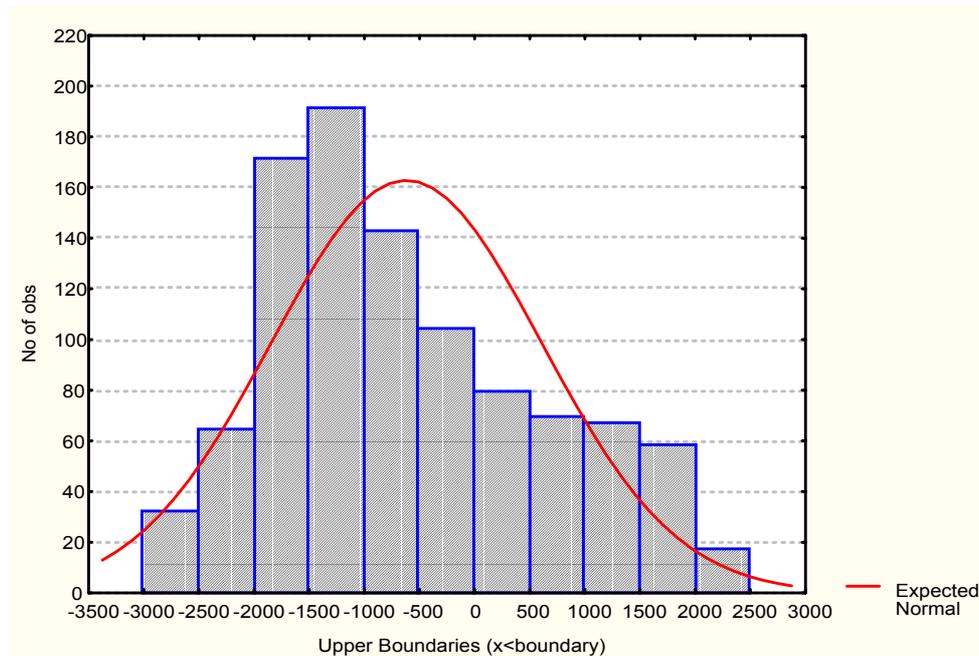


Figura 9 - Histograma do lucro simulado

Para melhor apreciação dos resultados, a Figura 10 mostra um gráfico do lucro em função das condições de operação do motor (variáveis independentes estudadas), a pressão e a rotação do motor.

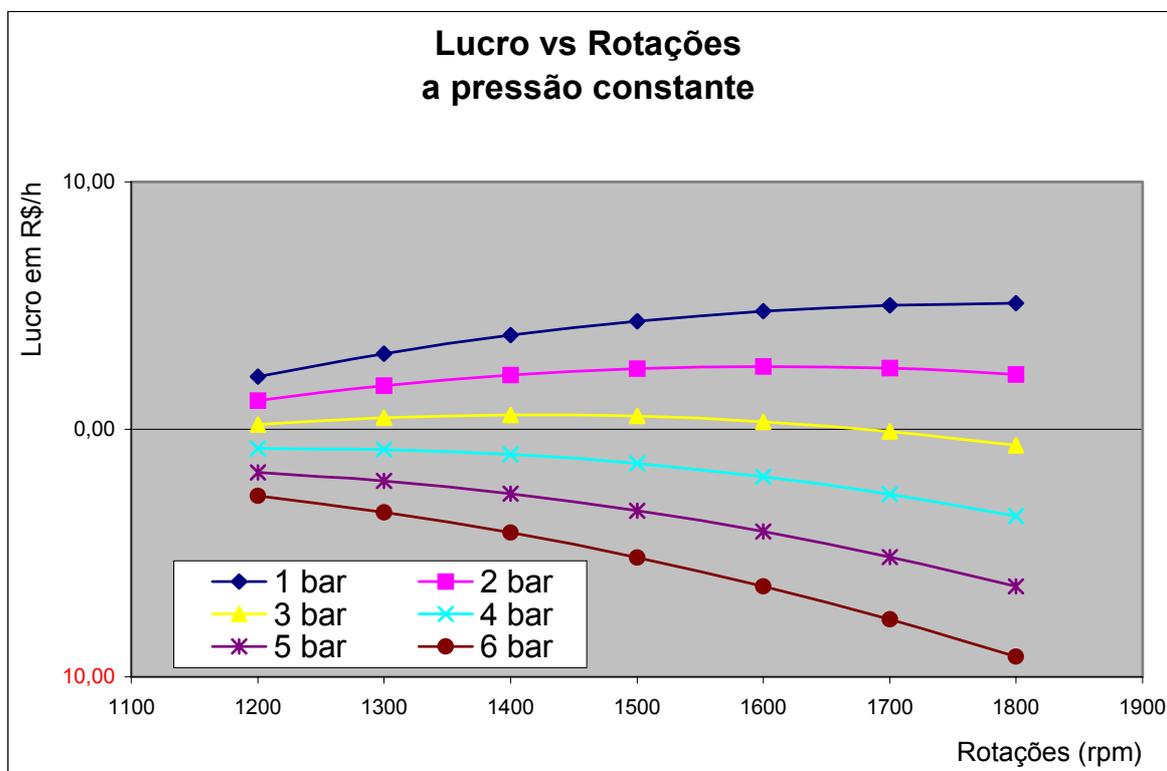


Figura 10 - Gráfico do lucro em função do número de rotações a pressão constante.

Capítulo 4

Conclusão

Preliminarmente, observou-se um bom aproveitamento da energia que o combustível pode produzir. Estima-se que cerca de 33,25% da energia foi transformada em energia elétrica, e 46,25% foi aproveitada sob forma de energia térmica, totalizando 79,5%, o que é bem próximo do que foi estimado inicialmente, porém não muito de acordo com a distribuição energética proposta por Rosa & Silva (2000), mas sim com um modelo mais conhecido na prática (Carnot).

Quanto ao estudo econômico preliminar, observou-se um bom rendimento anual, considerando a economia feita pela geração de energia. Estima-se que o investimento total seja pago em pouco menos de três anos, porém vale ressaltar que alguns dados que

foram utilizados para definir custos de equipamentos não são valores exatos e por isso o prazo para o retorno do investimento pode ser alterado.

Um dos valores utilizados que também pode variar bastante é o preço do gás natural. O valor utilizado foi de R\$ 0,3253/m³, porém pode-se encontrar preços menores, como por exemplo, o gás veicular (em torno de R\$ 0,22/m³), ou maiores, caso o consumo não seja tão grande.

Observou-se também que os gases de escape, após deixarem o trocador de calor, não apresentam energia suficiente para pré-aquecer a água de refrigeração (até 85°C), porém ainda pode ajudar neste processo.

Com base nas simulações realizadas concluiu-se que para o projeto tornar-se viável economicamente é necessário que o motor-gerador esteja operando em condições de proporcionar, aos gases de escape, temperaturas acima dos 440°C.

A probabilidade de se obter lucro, para as simulações realizadas, é de cerca de 30%, ou seja, dentre as combinações das variáveis de operação 30% gera lucro o que pode ser considerada significativa.

Percebe-se também que quanto maior a pressão, menor o consumo de combustível e quanto maior o número de rotações maior o consumo, porém maior também a potência fornecida. Dessa maneira fica mais fácil estabelecer em que intervalo deve trabalhar cada variável de operação do motor.

Os resultados deste caso mostram que o método de simulação estocástica é uma excelente ferramenta para avaliação de comportamento de geração de energia elétrica num ambiente de incerteza com diversas variáveis, principalmente preços de combustível.

O modelo apresentado pode ser aproveitado para outros processos de cogeração, com escalas diferentes.

Trabalhos Futuros

Como sugestão para este processo, pode-se estudar a viabilidade de se colocar uma coluna recuperadora de CO₂, proveniente dos gases de escape, para que este dê origem ao adubo carbonatado. Outra possibilidade seria acoplar um sistema de refrigeração aproveitando de imediato o vapor gerado no trocador de calor. Essas implementações ao processo podem melhorar a taxa de retorno e o lucro anual do sistema.

Referência Bibliográfica

- CHOPEY, N. P.** *Handbook of Chemical Engineering Calculations* - McGraw Hill, 2 ed., 1993.
- COLLINS, S.** *Combustion Technology*, In: Encyclopedia of Chemical Technology, vol. 6 ed. Willy Interscience, New York, 1989.
- EDGAR, T. HIMMENBLAU, D. M.F.** *Optimization of Chemical Process*, Department of Chemical Engineering-University of Texas, Texas, 1988.
- FONTES Jr, A. O.**, *Avaliação do Comportamento de um Motor Diesel de Dois Cilindros Convertido para Ciclo Otto, Utilizando Gás Natural Veicular*, dissertação de mestrado - Dept.
- GUIMARÃES, E. T⁽¹⁾**. *Sistemas de Cogeração – Artigo Técnico disponível na Internet em <http://www.gasnet.com.br>. Acessado em 02/02/2002.* ⁽¹⁾Diretor Técnico da Cogerar Sistemas de Engenharia Ltda.
- HORLOCK J. H.** *Cogeneration Combined Heat and Power* 2 ed. Malabar, Flórida: Krieger Publishing Company, 1997.
- JALURIA Y.** *Design and Optimization of Thermal Systems* - McGraw Hill International Editions, Mechanical Engineering Series, 1998.
- LUYBEN, W.L.** *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers*, McGraw-Hill, Singapore.
- MATLEY, J.**, (1984), *Modern Cost Engineering: Methods and Data*, Chemical Engineering, Mc Graw Hill Publications, V. 2, p. 265-269, New York.
- PERLINGEIRO, C.A.G.** *Engenharia de Processos*, Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 1998.
- ROSA⁽¹⁾ R. A. SILVA⁽²⁾ A. A.** *Motores a gás e recuperação de CO₂ a melhor eficiência em cogeração - Recife*, 10 de Julho de 2000 – disponível em <<http://www.gasnet.com.br>> ⁽¹⁾ Project Manager - The Wittemann Company; ⁽²⁾ Eng.^a Mecânica Chefe do Setor Comercial da ALGÁS S/A – AL.
- SELVAM, P.V.P. CORTEZ, I.R.** et alli *Estudo de Engenharia de Processo e Custo para Valorização de Biogás via Cogeração de Energia Auxiliado por Computador – Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, 2000.

SELVAM, P. V. P et al. *Simulação Estocástica do Processo de Produção de Etanol usando Cana de Açúcar*. Anais V. Seminário de Hidrólise Enzimática de Biomassa. Maringá - PR, 1996.

SELVAM, P.V.P., *Desenvolvimento e Implantação do método Monte Carlo de Simulação para Processo de Produção de Reatores*, Anais do 10º Congresso Brasileiro de Engenharia Química, 1, p. 846-851, São Paulo (1994)

YOKOYAMA, R. ITO, K. *Optimal Operational Planning of Cogeneration Systems with Thermal Storage by the Decomposition Method* – Journal of Energy Resources Technology, vol. 117 / 337, p.337-342. Japão, Dezembro 1995.