

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DA COGERAÇÃO APLICADA EM MICRO EMPRESAS**

por

Leandro Marchionni

Dissertação para obtenção do Título de  
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, março 2004.

# ANÁLISE DA COGERAÇÃO APLICADA EM MICRO EMPRESAS

por

Leandro Marchionni  
Engenheiro Mecânico

Dissertação submetida ao Corpo Docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PROMEC, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de concentração: Energia

Orientador: Prof. Dr. Paulo Beyer

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Arno Krenzinger, Promec

Prof. Dr. Mário Macagnan, Unisinos

Prof. Dr. Volnei Borges, Promec

Prof. Dr. Jun Sérgio Ono Fonseca  
Coordenador do PROMEC

## **Agradecimentos**

Meus sinceros agradecimentos ao Prof. Dr. Paulo Otto Beyer pela competente orientação e incondicional atenção prestada, aos professores e funcionários do PROMEC, às empresas que contribuíram com informações técnicas e a possibilidade da coleta de dados experimentais, e a todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta dissertação.

## RESUMO

A crescente demanda energética no mundo visa uma racionalização do uso de energia da melhor forma possível. Os sistemas de cogeração visam produzir energia elétrica e aproveitar a energia térmica residual proveniente da geração de energia elétrica. O caso das micro empresas, onde a geração de energia elétrica não é de grande escala, e conseqüentemente o resíduo térmico também não é muito grande, requer sistemas com grande eficiência.

O aproveitamento da energia térmica residual de um motor alternativo, utilizado para gerar energia elétrica, depende de vários fatores, entre eles destacam-se a qualidade e quantidade de energia disponível. A cogeração objetiva aproveitar a energia térmica proveniente dos gases do escapamento e também a energia térmica da água do radiador.

Este trabalho visa fazer uma análise para uma possível implantação de um sistema de cogeração em uma micro empresa, com a aplicação de um motor alternativo para a geração de energia elétrica suficiente para suprir a demanda da empresa e aproveitar o calor residual proveniente do funcionamento deste, para aplicar no processo produtivo, que utiliza vapor produzido em uma caldeira a óleo.

Mediante avaliação de todo o processo produtivo da empresa, de sua necessidade de energia elétrica, aplicação da energia térmica produzida pela caldeira, constatou-se que haveria a possibilidade da implantação de um sistema de cogeração para produzir energia elétrica e aproveitar o calor residual proveniente do funcionamento do motor diretamente no processo produtivo. Foram calculadas todas as energias disponíveis no motor, previamente determinadas em função da capacidade de geração de energia elétrica para suprir a demanda da empresa.

Através de consultas executadas com fabricantes dos equipamentos verificou-se o rendimento dos mesmos para poder avaliar a disponibilidade de energia, bem como o preço e instalação de todo o sistema.

Os cálculos mostram que existe inviabilidade econômica na implantação do sistema de cogeração, como é proposto. Diante dos valores encontrados pode ser feita uma análise financeira da aplicação do investimento relacionado com o seu retorno.

## **ABSTRACT**

### **“ANALYSIS OF APPLIED COGENERATION IN SMALL COMPANY”**

The growing demand energetic in the world seeks a rationalization of the use of energy in the best possible way. The cogeneration systems seek to produce electric energy and to take advantage of the coming residual thermal energy of the generation of electric energy. In the case of the small companies, where the generation of electric energy is not of great scale, and consequently the thermal residue is not also very big, it requests systems with great efficiency.

The use of the residual thermal energy of an alternative motor, used to generate electric energy, depends on several factors; among them they stand out the quality and amount of available energy.

The objective cogeneration to take advantage of the coming thermal energy of the gases of the exhaust and also the thermal energy of the water of the radiator, coming of the operation of the motor for generation of electric energy.

This work seeks to do an analysis for a possible installation of a cogeração system in a personal computer company, with the application of an alternative motor for the generation of enough electric energy to supply the demand of the company and to take advantage of the coming residual heat of the operation of this, to apply in the productive process, that uses vapor produced in a boiler to oil.

By means of evaluation of whole the productive process of the company, of its need of electric energy, application of the thermal energy produced by the boiler, was verified that there would be the possibility of the installation of a cogeneration system to produce electric energy and to take advantage of the coming residual heat of the operation of the motor that directly in the productive process. All the available energy was calculated in the motor, previously determined in function of the capacity of generation of electric energy to supply the demand of the company.

Through consultations executed with makers of the equipments the revenue of the same ones it was verified to evaluate the readiness of energy that we would have, as well as the price and installation of the whole system.

The calculations show us that economic inviability exists in the installation of the cogeneration system, as it is proposed. Before the found values it can be made a financial analysis of the application of the investment related with its return.

# ÍNDICE

	Pág.
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1 Objetivos e metodologia.....	1
1.2 A empresa.....	2
1.3 Revisão bibliográfica.....	3
<b>2. COGERAÇÃO</b> .....	7
2.1 Definições.....	9
2.1.1 Gás natural.....	10
2.1.2 Poder calorífico.....	11
2.2 Justificativas para escolha do grupo motor-gerador.....	11
2.2.1 Características do motor.....	12
2.2.2 Dados do motor.....	12
2.2.3 Especificações de manutenção.....	13
<b>3. EQUIPAMENTOS DA COGERAÇÃO</b> .....	14
3.1 Análise estequiométrica da combustão.....	14
3.2 Emissões.....	16
3.2.1 Análise do Cp dos gases.....	18
3.3 Constituição do sistema de refrigeração.....	18
3.3.1 Trocador de calor.....	19
3.3.1.1 Características construtivas do trocador de calor.....	19
3.3.2 Radiador.....	20
3.3.2.1 Características construtivas do radiador.....	20
3.3.3 Conjunto eletro bomba.....	20
3.4 Energia transferida no trocador de calor.....	20
3.5 Energia para aquecimento da água de processo.....	22
3.6 Caldeira de recuperação.....	21
3.6.1 Comandos elétricos e eletrônicos.....	24
3.6.2 Alimentação da água.....	24
3.7 Recuperação do calor.....	24
3.7.1 Calor trocado na caldeira de recuperação.....	25
3.7.2 Análise do rendimento da caldeira de recuperação.....	26
3.8 Aplicação do vapor gerado.....	27
3.8.1 Consumidores de vapor (Secadores).....	27

3.8.1.1 Energia na entrada dos secadores.....	28
3.8.1.2 Análise do rendimento dos secadores.....	29
3.8.2 Reservatório de água quente.....	29
3.9 Gerador de energia elétrica.....	31
<b>4. RENDIMENTO DA COGERAÇÃO.....</b>	<b>33</b>
4.1 Rendimento da primeira etapa da cogeração.....	33
4.2 Rendimento da segunda etapa da cogeração.....	35
4.3 Rendimento da etapa final da cogeração.....	37
<b>5. ANÁLISE DE CUSTOS.....</b>	<b>39</b>
5.1 Custo operacional do grupo motor-gerador.....	39
5.2 Custo operacional da caldeira existente na empresa.....	40
5.3 Análise da conta de energia elétrica da empresa.....	41
5.3.1 Horário de ponta.....	41
5.4 Dados do consumo de energia elétrica.....	42
5.5 Custo da energia da empresa sem gerador.....	42
5.6 Custo da energia para a empresa usando cogeração.....	43
5.7 Custo da instalação do sistema de cogeração.....	43
5.8 Retorno do investimento.....	44
<b>6. ALTERNATIVA PARA REDUÇÃO DO CUSTO DA ENERGIA SEM USAR COGERAÇÃO. ....</b>	<b>45</b>
6.1 Custo do grupo motor a Diesel.....	46
6.2 Retorno do investimento (Grupo gerador Diesel).....	46
<b>7. CONCLUSÃO.....</b>	<b>48</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>49</b>

## LISTA DE SÍMBOLOS

$C_p$	calor específico à pressão constante	[kJ/kg °C]
$\Delta T$	variação de temperatura	[°C]
$Nm^3$	normal metro cúbico	
$m$	massa	[kg]
$Q$	calor	[kJ]
$Q_s$	calor sensível	[kJ]
$Q_L$	calor latente	[kJ]
$h$	entalpia específica	[kJ/kg]
PCS	poder calorífico superior	[kJ/kg]
PCI	poder calorífico inferior	[kJ/kg]
NO <sub>x</sub>	óxido nitroso	
CO <sub>2</sub>	dióxido de carbono	
CO	monóxido de carbono	
O <sub>2</sub>	oxigênio	
H <sub>2</sub>	hidrogênio	
CH <sub>4</sub>	gás metano	
N <sub>2</sub>	nitrogênio	
$mc$	massa de combustível	
$m_{esp}$	massa específica	
$mar$	massa de ar real	
$exc$	excesso de ar	
$umid$	umidade do ar	
H <sub>2</sub> O	molécula de água	
$Q_e$	energia de entrada	[kJ]
$Q_s$	energia de saída	[kJ]
$Q_{total}$	calor total	[kJ]
$h_{vl}$	entalpia de vaporização / condensação	[ kJ/kg]
$Q_{perdido}$	calor perdido	[kJ]
$Pot_{saída}$	potência de saída	[kW]

$Pot_{entrada}$	potência de entrada	[kW]
$Pot_{perdas}$	potência perdida	[kW]
$En_{utilizada}$	energia utilizada	[kJ]
$En_{entrada}$	energia de entrada	[kJ]
$C_{comb}$	custo final do combustível	[R\$]
$F$	custo específico do combustível	[R\$/kg]
$G$	número de horas do mês	
$D$	consumo de combustível da caldeira	[kg/h]

### **SIMBOLOS GREGOS**

$\eta$	eficiência ou rendimento
$\eta_{ger}$	rendimento do gerador
$\rho$	massa específica

## ÍNDICE DE TABELAS

Tab.	TÍTULO	Pág.
1	Dados da conta de energia elétrica.....	3
2	Valores do calor específico dos elementos.....	18
3	Dados dos secadores.....	28
4	Conta de energia da empresa com gerador a Diesel.....	46

## ÍNDICE DE FIGURAS

Fig.	TÍTULO	Pág.
1	Diagrama da cogeração.....	9
2	Balanço de energia do trocador de calor.....	22
3	Caldeira Aalborgs RCGN2.....	23
4	Balanço de energia da caldeira de recuperação.....	27
5	Balanço de energia dos secadores.....	29
6	Reservatório para a lavadora.....	30
7	Balanço de energia do gerador.....	32
8	Balanço de energia do motor.....	34
9	Gráfico de distribuição das energias no motor.....	34
10	Balanço de energia da segunda fase da cogeração.....	35
11	Rendimento do motor elétrico.....	36
12	Balanço de energia da última etapa da cogeração.....	37
13	Gráfico dos rendimentos das fases da cogeração.....	38

## **1 INTRODUÇÃO**

A economia de uma empresa está presente em todas as áreas, sempre tendo em vista uma redução no custo de fabricação. Hoje além de reduzir os custos de fabricação, deve-se ter a preocupação também com a disponibilidade de recursos energéticos.

Atualmente a energia elétrica é uma fonte energética muito solicitada por todos, principalmente as empresas, ocasionando muitas vezes sobrecarga nos sistemas de distribuição. Uma das maneiras das empresas reduzirem esta sobrecarga é a produção própria de energia elétrica através de geradores, acionados por motores ou turbinas. Dependendo do porte da empresa, adotam-se procedimentos de geração própria somente nos horários em que os sistemas apresentam maior sobrecarga, conhecido como horário de ponta.

Grande parte das indústrias que geram eletricidade própria nos horários de ponta utilizam motores alternativos que acionam os geradores e que usam como combustível óleo diesel ou gás natural entre outros.

Justifica-se o uso do recurso de geração própria devido ao custo da energia neste horário ser muito elevado, chegando em muitos casos cerca de onze vezes o valor da energia comparado com o valor no horário fora da ponta.

O aproveitamento de energia térmica residual proveniente dos gases do escapamento e da água de refrigeração do motor constitui um sistema de cogeração. O desenvolvimento de um projeto de cogeração depende de muitos fatores, tais como:

- Quantidade de energia térmica disponível.
- Qualidade da energia térmica, ou seja, temperatura de utilização desta energia.
- Processo produtivo industrial, o qual deverá ter condições de absorver a energia.

Ao se implantar um sistema de cogeração em uma empresa, tem-se como objetivo maior a redução do custo da energia total, fazendo o máximo de aproveitamento da energia disponível no combustível utilizado para a geração de energia elétrica.

### **1.1 OBJETIVOS E METODOLOGIA**

A proposta deste trabalho visa apresentar a viabilidade técnica e econômica para redução do custo da energia em uma micro empresa com a implantação de um sistema de cogeração utilizando motor de combustão a gás natural para a produção de energia elétrica.

A metodologia para a elaboração deste trabalho baseou-se no levantamento de dados da empresa como consumo de energia elétrica, consumo de energia térmica e consumo de combustível, bem como detalhamento do processo produtivo. Através destes valores, e após uma pesquisa de mercado de equipamentos para geração de energia elétrica, elaborou-se um projeto de sistema de cogeração adequado as necessidades fabris da empresa. Através de informações técnicas fornecidas pelos fabricantes dos equipamentos e de balanços de energia foi possível fazer o aproveitamento das energias elétrica e térmica dos equipamentos usados para o sistema de cogeração proposto, atendendo a demanda da empresa.

Com base nos dados de custo de implantação bem como de operacionalização foi possível estabelecer alternativas para redução do custo de energia da empresa.

## **1.2 A EMPRESA**

A empresa analisada para a implantação do sistema de cogeração trabalha no segmento têxtil, mais especificamente com lavagem de roupas. Os consumidores de energia térmica são basicamente as lavadoras que usam água quente e os secadores que usam vapor.

Os principais consumidores do vapor gerado são as lavadoras de roupas que aquecem a água com injeção direta de vapor, fazendo a temperatura da água chegar até 80 °C, os secadores de roupa que usam vapor para fazer aquecimento do ar que circula no interior do mesmo e as calandras de passar roupas sendo que estas são aquecidas com vapor direto no interior das câmaras. O vapor saturado é gerado em uma caldeira que utiliza óleo BPF (baixo ponto de fluidez) como combustível, produzindo cerca de 2000 kg de vapor por hora com uma pressão de 800 kPa.

A energia elétrica fornecida pela concessionária é do sistema de tarifa verde, que penaliza muito o consumidor no horário de ponta, chegando até mesmo a custar cerca de onze vezes o valor do kWh comparado com o mesmo no horário fora da ponta.

Atualmente a empresa não apresenta nenhum tipo de alternativa para o fornecimento de energia elétrica nem mesmo no horário de ponta, o que ocasiona uma conta de energia elétrica elevadíssima como pode ser observado pelos dados da tabela 1.

Tabela 1: Dados da conta de energia elétrica.

Tarifa verde					
Custo da energia					R\$
Consumo FP	170.040	kWh x	0,054	R\$/kWh	9.182,16
Consumo P	17.160	kWh x	0,512	R\$/kWh	8.785,92
Demanda	260	kW x	5,83	R\$/kW	1.515,80
Demanda ultrap	0	kW x		R\$/kW	0,00
	TOTAL				<b>19.483,88</b>
Custo por kWh	19.483,88	R\$ /	187.200	kWh	<b>0,10</b>

Obs: dados extraídos da conta de energia elétrica referente ao mês de dezembro / 03.

### 1.3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

*Baccock, George H., Wilcox, Stephen, 1992. "Steam, Its Generation and Use".* Esta obra apresenta os princípios de combustão sob o aspecto de vários combustíveis, sólidos, líquidos, e gasosos. No caso de queimar metano, em motores de combustão se considera que para haver uma completa queima do combustível, um excesso de ar se faz necessário. No entanto na maioria dos motores que usam gás como combustível para obter a máxima produção de potência de eixo, a mistura de ar-combustível é com escassez de ar, ou seja, rica em combustível, sendo que este valor está próximo ao ar teórico, cerca de 5 % a menos da quantidade de ar estequiométrico. Esta consideração se aplica normalmente em motores de veículos de forma que nestas condições uma quantidade de monóxido de carbono, ( $CO$ ), é produzido nos gases de escapamento. Quando se trata de motores estacionários este valor se aproxima muito ao valor do ar teórico porque a exigência de potência não é tão crítica devido ao regime de carga ser quase constante.

*Faires, Virgil M., Summing, C. M. 1983. "Termodinâmica".* Neste trabalho é abordada uma análise dos produtos de combustão para que se possam ter informações sobre os processos de combustão, como por exemplo, a quantidade de ar fornecida. A partir desta análise pode-se construir a equação química correspondente, ou obter parte dela, dependendo do que se conhece sobre o combustível. Existem fontes inevitáveis de erro, como o combustível não queimado nas cinzas ou no fumo. A análise do combustível e dos produtos pode ser completa, e neste caso se fazem diversos balanços de massa. No entanto é possível ter uma boa aproximação do ar fornecido (no caso de os teores de  $O_2$ , de  $H_2$  e de  $N_2$  livres serem pequenos) a partir do balanço do carbono, sabendo apenas a quantidade de carbono queimada por unidade de massa de combustível. A energia proveniente da combustão é a base para determinação da eficiência do processo termodinâmico. A medida é igual ao produto da quantidade de combustível consumida

durante o processo pelo seu poder calorífico. A escolha entre dois poderes caloríficos (o superior e o inferior) constitui um problema cuja resolução é bastante simples. Quando o sistema termodinâmico pode utilizar a energia contida no vapor de água proveniente da queima do hidrogênio no combustível, usa-se o poder calorífico superior. Por outro lado espera-se que a descarga de um motor de combustão nunca se aproxime da temperatura de orvalho, ou utilize a energia do vapor de água, e neste caso, usa-se o poder calorífico inferior.

*Kern, Donald Q., 1987. "Processos de Transmissão de Calor".* Nesta obra uma riqueza de exemplos de trocadores de calor, bem como suas características, tipos e aplicações e sobretudo o memorial de cálculos são apresentados de forma a mostrar a complexidade existente para o projeto dos mesmos. Vários fatores são considerados em um trocador de calor, entre eles o fator de incrustação que contribui para diminuir a eficácia do trocador. A medida em que o trocador é usado e principalmente quando estiver sendo utilizado com água de processo, um depósito de lama e de outros resíduos minerais presentes no fluido, produzido no interior do trocador, faz com que exista uma camada entre a superfície de troca e o fluido aumentando a resistência térmica.

Nos mecanismos de transmissão de calor, *condução, convecção e radiação*, que estão presentes na maioria dos trocadores de calor, de forma muitas vezes combinadas, a radiação é um dos fatores que retira parte de energia dos fluidos. Uma das formas de reduzir esta perda, é com o uso de isolantes térmicos envolvendo o trocador de maneira evitando assim a dissipação para atmosfera.

*Kosow, Irving I., 1994. "Máquinas Elétricas e Transformadores".* Este trabalho comenta sobre a conversão eletromagnética de energia onde relaciona as forças elétricas e magnéticas aplicada à matéria e ao movimento. Como resultado desta relação, a energia mecânica pode ser convertida em energia elétrica, e vice-versa através das máquinas elétricas. Assim a energia mecânica de um motor é facilmente convertida em energia elétrica através de um gerador e esta pode ser distribuída aos consumidores. A energia elétrica produzida através desta conversão eletromecânica pode ser reconvertida várias vezes antes que a energia seja convertida a forma que realizará o trabalho útil.

Outro tema que é bastante abordado é no que se refere aos fatores que afetam a seleção de geradores e motores. Entre eles se destacam fator de serviço, tipo de ciclo de trabalho, a natureza da carga e a frequência das sobrecargas, tipo de controle de velocidade a ser empregado e potência requerida em função da carga.

O gerador sendo um dispositivo dinâmico somente desenvolverá conversão de energia se estiver em movimento, por esta razão estão envolvidos várias perdas, tais como perdas elétricas e perdas rotacionais. As perdas rotacionais são subdivididas naquelas que são função apenas da

velocidade (as chamadas perdas mecânicas, que são essencialmente perdas por atrito) e nas que são função de ambos, o fluxo e a velocidade (chamadas de núcleo). Uma porção das perdas rotacionais corresponde ao deslocamento de ar criado pelo movimento do rotor e também pelo ventilador montado no eixo para refrigeração. Estas perdas ocorrem quando uma estrutura de ferro de armadura ou rotor gira em torno de um campo magnético, ou quando ocorre variação do fluxo magnético concatenado numa estrutura de ferro. Estas perdas são conhecidas como *perdas por histerese* e *perdas por correntes parasitas*.

A perda por histerese é uma medida de energia elétrica necessária para superar a retentividade do ferro no caminho do fluxo magnético. As perdas por correntes parasitas ocorrem não apenas no núcleo da máquina, mas em todos os materiais condutivos situados no caminho do fluxo associado ao campo magnético girante ou variável da máquina. Isto significa que um gerador ou motor nunca pode converter toda a energia recebida em potência de saída útil, elétrica ou mecânica. É evidente que conforme a lei de conservação de energia, a potência de entrada é igual à potência de saída mais a potência perdida.

*Mesny, Marcelo, 1976. "Generacion Del Vapor – Calderas".* Neste trabalho é feita uma análise elementar dos combustíveis, bem como suas reações de combustão. A análise dos gases de combustão estabelece parâmetros comparativos para a geração de vapor aproveitando o calor proveniente da combustão. No exemplo citado, para análise de combustão do  $CH_4$  calcula-se a quantidade de ar teórico e a quantidade de ar real, ponderando em base mássica os elementos presentes no ar atmosférico, tais como o oxigênio, nitrogênio, argônio, dióxido de carbono e outros gases. Apresenta os diversos tipos de caldeiras, entre as quais encontra-se a caldeira de recuperação de calor proveniente da queima de combustível em motores de combustão.

Nas caldeiras o calor desenvolvido pela combustão se transmite para as superfícies de aquecimento por radiação, convecção e condução. O calor transmitido por convecção e por condução é uma função da massa de gases que flui através da superfície de aquecimento e da diferença média logarítmica de temperatura entre os gases e a água da caldeira.

*Sontag, R.E., Borgnakke, C., Wylen, G. J. V., 1998. "Fundamentos da Termodinâmica Clássica".* Neste trabalho é comentado o desempenho dos processos reais de combustão, no que se refere aos motores de combustão interna. Como o objetivo de um motor de combustão é realizar trabalho, a maneira lógica para avaliar o desempenho de um motor de combustão interna é comparar o trabalho real executado com o trabalho que seria realizado em uma mudança de estado reversível dos reagentes dos produtos. Esta comparação é definida pela segunda lei da termodinâmica. Deve ser observado que, em um motor de combustão interna ou em uma central termoelétrica que queima combustível, o fato do processo ser irreversível é um fator significativo que baixa a eficiência térmica destes equipamentos. Também considera que a entalpia de

combustão de um combustível, constituído por hidrocarbonetos, apresenta variações consideráveis de acordo com a fase da água nos produtos da combustão o que conduz aos conceitos de poderes caloríficos superiores e inferiores. Portanto ao analisar a eficiência térmica de um motor, o poder calorífico utilizado para determinar esta eficiência deve ser claramente indicado.

## 2. COGERAÇÃO

Energia é um fator indispensável para toda e qualquer atividade humana. Da disponibilidade energética dependem os transportes, a produção industrial, as comunicações, o comércio, a conservação dos alimentos, etc. A geração e utilização racional e eficiente da energia são condicionantes cada vez mais vitais em todos os tipos de sociedade, seja por razões ecológicas, seja por motivos econômicos (competitividade e qualidade do produto).

Os sistemas de cogeração vêm sendo utilizados nos mais diversos segmentos industriais com a finalidade de aproveitar o máximo possível do potencial energético do combustível.

Na cogeração aproveita-se o potencial existente nos produtos resultantes da queima de um combustível que estão a alta temperatura para geração de trabalho e de energia térmica. Os produtos da combustão a alta temperatura possuem uma grande disponibilidade para conversão de sua energia interna em trabalho.

Um motor de combustão interna, por exemplo, aproveita a energia dos produtos da combustão produzindo trabalho. Os gases de exaustão proveniente do escapamento são rejeitados a uma temperatura suficientemente alta para fornecerem calor para outros processos ao passarem por uma caldeira de recuperação. Uma outra quantidade de energia térmica rejeitada no motor é a água do radiador, já que para manter a temperatura de funcionamento do mesmo, deve-se retirar uma grande quantidade de energia térmica da água. Esta energia que já é de um nível inferior pode ser aproveitada para fazer, por exemplo, aquecimento de água.

Alguns sistemas de cogeração utilizam a energia térmica do escapamento para a produção de frio, através de “chillers” de absorção, muito utilizada em “shoppings”, hospitais, universidades e outros segmentos que usam a geração de eletricidade vinte e quatro horas por dia. Dependendo de como é utilizada a energia residual térmica e da performance dos equipamentos utilizados para o aproveitamento desta energia, o rendimento de um sistema de cogeração pode chegar a valores elevados.

A cogeração tem como objetivo principal o aproveitamento da energia térmica residual, proveniente dos gases do escapamento e da água de refrigeração do motor de combustão utilizado para acionar um gerador de energia elétrica, de maneira que quando uma empresa necessita de uma grande quantidade de energia térmica, por exemplo, para a produção de vapor d'água, para o processo industrial, deve-se ter uma fonte de vapor para suprir a demanda exigida pelo processo e neste caso, a quantidade de vapor produzido pelo sistema de cogeração

complementa a demanda industrial diminuindo a produção de vapor e conseqüentemente o consumo de combustível da caldeira.

É muito importante que quando se trata de cogeração, o sistema deve operar vinte e quatro horas por dia, sendo necessário manter a produção de eletricidade em padrões estáveis, isto é, o consumo na empresa deve ser mantido o mais constante possível dentro de uma faixa muito estreita de variações.

Um planta de cogeração deve ser instalada sempre com par de projetos, ou seja, deve ter um conjunto motor-gerador para reserva, para evitar paradas imprevistas seja por problemas mecânicos ou elétricos ou mesmo uma parada preventiva para manutenção, garantindo o fornecimento contínuo principalmente de eletricidade. Outro fator que merece atenção especial é a temperatura da água de refrigeração, porque neste circuito deve haver radiador auxiliar provido de ventiladores, para fazer a retirada do calor da água de refrigeração do motor, garantindo seu funcionamento normal quando não houver consumo da energia térmica da água de refrigeração.

Com relação ao consumo de energia elétrica, quando este diminui seja por qualquer motivo, a potência do motor também diminui e também diminui a quantidade de energia térmica. Esta diminuição da energia térmica dependendo do destino a que se aplica pode prejudicar o processo industrial. De acordo com o fabricante, esta diminuição no consumo não deve ultrapassar os 15%, porque até este valor o motor não sofre alteração significativa em sua potência o que não prejudica o fornecimento das energias térmicas, tanto a do escapamento como a da água de refrigeração.

Atualmente a concessionária fornecedora de energia elétrica não apresenta nenhum interesse na compra de energia excedente gerada no sistema de cogeração, principalmente quando se trata de uma produção relativamente pequena. Obviamente o interesse financeiro está presente nestas situações e, até mesmo após muitas negociações, o preço que a concessionária paga pelo kW chega a ser da ordem de 5% do valor médio que ela vende. O que ocorre em sistema de cogeração, quando há uma demanda excedente de energia elétrica, no que se refere à produção por meio de grupo motor-gerador, é a redução da capacidade gerada e conseqüentemente da energia térmica produzida. Isto é facilmente conseguido por meio dos controles eletrônicos fornecidos pelas empresas responsáveis pela instalação do grupo motor-gerador.

Na figura 1, é apresentado um diagrama de cogeração onde é mostrado o aproveitamento de energia de todo o sistema de cogeração, para um determinado caso que será analisado neste trabalho.

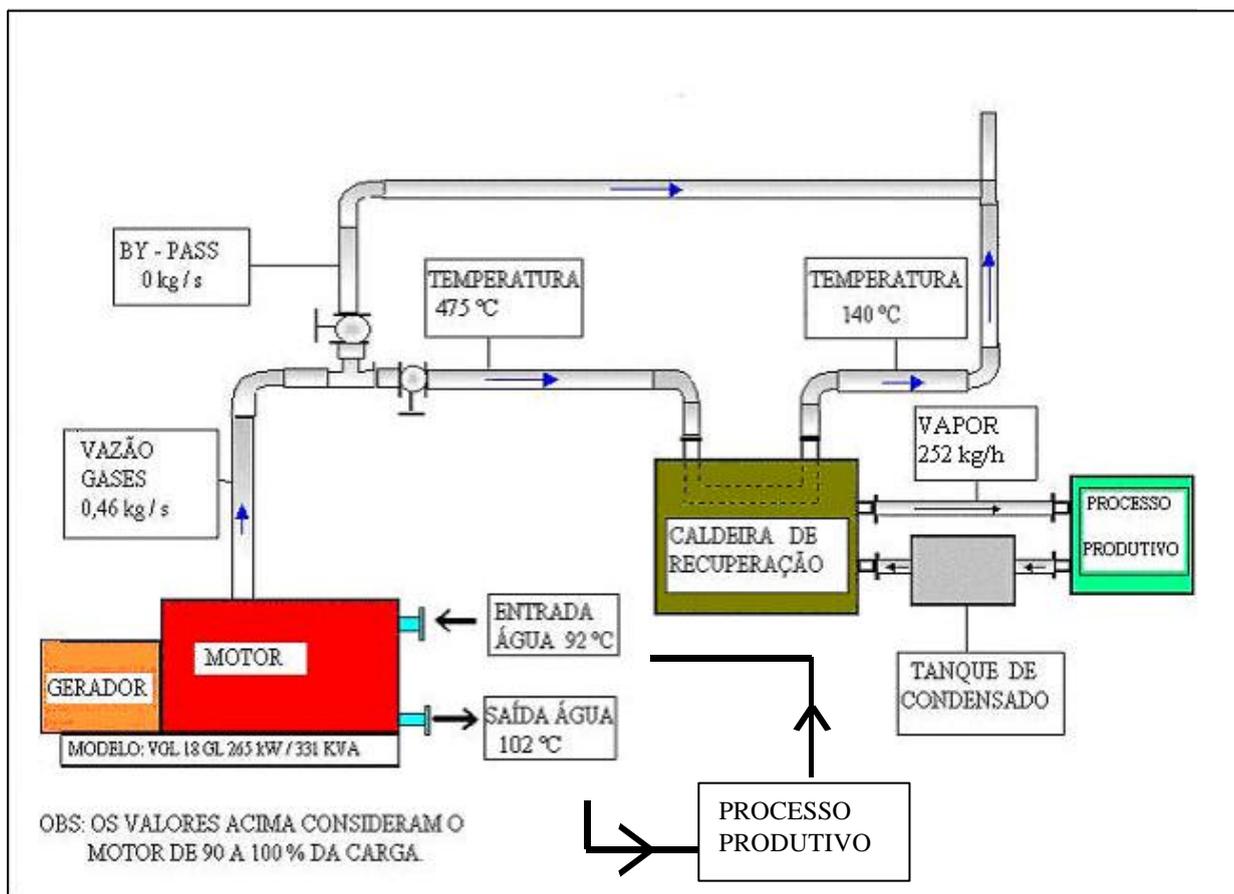


Figura 1: Diagrama de cogeração

## 2.1 DEFINIÇÕES

Ao analisar um sistema de cogeração, obtêm-se várias formas de transformar a energia do combustível em energia mecânica para acionar o gerador e produzir eletricidade e energia térmica para aquecimento dependendo da potência de geração. Para grandes potências de geração, usam-se turbinas e para pequenas potências se utilizam as micro turbinas, que são relativamente caras ou adota-se o uso de motores de combustão interna, geralmente bem mais acessíveis.

Avanços tecnológicos significativos têm sido feitos nos últimos anos no que diz respeito ao projeto das câmaras de combustão e aos materiais empregados nas partes mais quentes do motor. Estas novas tecnologias têm permitido alcançar maiores rendimentos e minimizar sensivelmente a formação de poluentes na atmosfera. Estas melhorias têm vital importância no controle da emissão de poluente para o meio ambiente, cuja importância se torna cada dia maior.

No caso de usar motores de combustão interna existem também várias opções de combustíveis apropriados, sendo o mais utilizado para este fim o gás natural.

### 2.1.1 O GÁS NATURAL

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos leves, que, à temperatura ambiente e pressão atmosférica, permanece gasoso. Na natureza, ele é encontrado acumulado em rochas porosas no subsolo, freqüentemente acompanhado por petróleo. O 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 a base de enxofre são adicionados ao gás em concentrações suficientes para lhe dar um cheiro marcante, mas sem lhe atribuir características corrosivas, num processo chamado de odorização.

As especificações do gás para consumo industrial são ditadas pela portaria nº 41 de 15 de abril de 1998, emitida pela Agência Nacional do Petróleo, a qual agrupou o gás natural em três famílias, segundo a faixa do 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 100 kPa : 36700 a 42750 kJ/Nm<sup>3</sup>
- Densidade relativa ao ar a 20° C: 0,55 a 0,69
- Enxofre total: 80 mg/m<sup>3</sup> , máximo
- O<sub>2</sub> : 0,5 % em volume máximo
- CO<sub>2</sub> : 2 % em volume máximo
- H<sub>2</sub>S : 20 mg/m<sup>3</sup> máximo
- Isento de poeira, água condensada, gomas, metanol ou outros elementos sólidos ou líquidos.

Hoje, o gás natural consumido no País provém de jazidas nacionais e de importação da Bolívia, estando em estudo a importação da Argentina.

A aplicação do gás natural para geração de energia significa menos agressões ambientais, pois a combustão do gás é uniforme e apresenta baixo índice de poluentes.

Além da eliminação de fumaça, há uma redução de até 98 % do óxido de enxofre e 70 % do óxido de nitrogênio, em relação ao óleo diesel, e cerca de 90 % de monóxido de carbono em relação à gasolina. Isto corre porque a queima do gás natural é mais completa do que a queima dos outros combustíveis.

Por isso os motores a gás natural emitem menos poluentes, tais como óxidos nitrosos (NOx), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e monóxido de carbono (CO).

Ao substituir a lenha, o gás natural reduz o desmatamento.

Nas grandes cidades, ele diminui drasticamente a emissão de compostos de enxofre e particulados, sem gerar cinzas ou detritos oriundos da utilização de outros combustíveis.

### **2.1.2 PODER CALORÍFICO**

Os combustíveis, dependendo de sua natureza, sólida, líquida ou gasosa, apresentam composições diferentes, de maneira que quando se consegue uma combustão completa se libera uma determinada quantidade de energia. Esta quantidade de energia que é liberada pelo combustível propiciada por uma combustão completa, denomina-se de poder calorífico do combustível. Alguns combustíveis podem apresentar uma certa quantidade de umidade, principalmente nos sólidos e nos líquidos. Poder Calorífico Superior (PCS), representa a quantidade total de calor liberado pelo combustível, inclusive o do vapor de água condensado. Poder Calorífico Inferior (PCI), corresponde ao poder calorífico superior descontado o calor do vapor de água (condensação).

## **2.2 JUSTIFICATIVAS PARA A ESCOLHA DO GRUPO MOTOR-GERADOR**

O fornecimento de energia elétrica deve merecer atenção especial principalmente no que se refere aos equipamentos utilizados e, tratando-se de cogeração, além de energia elétrica, também a energia térmica residual são elementos de grande responsabilidade no processo industrial, para tanto o equipamento deve ser confiável e também deve apresentar um largo período entre manutenções.

Uma pesquisa de mercado revelou uma grande variedade de motores e também de geradores. Atribuiu-se uma demanda que fosse adequada para suprir as necessidades de energia elétrica da empresa e encontrou-se um motor-gerador adequado. A escolha de uma marca com garantia de manutenção, disponibilidade de peças de reposição, assistência técnica rápida a disposição, também são fatores relevantes. O tipo de combustível é um fator preponderante na escolha do motor, porque dele dependerá o custo de produção do grupo motor-gerador. Uma forma de produção de energia sem agredir o meio ambiente é a utilização do gás natural como combustível.

O modelo que atendeu a todas as expectativas e as necessidades de produção de energia elétrica foi o Grupo Motor-gerador Waukesha, modelo VGL 18 GL.

### 2.2.1 CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO MOTOR E GERADOR

Abaixo estão algumas características deste grupo motor-gerador.

- Motor a gás natural
  1. Marca Waukesha, ciclo Otto, 4 tempos, 6 cilindros em linha, turbo alimentado;
  2. Injeção eletrônica com regulagem automática de velocidade;
  3. Controle automático de injeção com monitoração dos gases de escapamento;
  4. Sistema de arrefecimento através de radiadores remotos;
  5. Potência Contínua: 331 kW - 1800 RPM, conforme ISO 3046;
  6. Sistema de proteção contra alta temperatura da água, baixo nível água, baixa pressão do óleo e sobre velocidade, provocando parada no motor nos casos de superaquecimento e baixo nível d'água de arrefecimento, baixa pressão do óleo de lubrificação e sobre velocidade;
  7. Regulador de nível de óleo lubrificante montado junto ao carter.
  
- Gerador
  1. Tipo “Brushless”, síncrono, trifásico;
  2. Regulador automático de tensão, eletrônico, montado junto ao painel de comando, alimentado com excitatriz auxiliar;
  3. Frequência de 60 Hz;
  4. Grau de proteção IP-21;
  5. Classe de isolamento “H” – 125° C, tipo “single bearing”;
  6. Refrigeração através de ventilador centrífugo montado no próprio eixo;
  7. Proteção automática por sobre corrente, sobre ou sub tensão, sub frequência.

### 2.2.2 DADOS DO MOTOR

De acordo com o fabricante, *Waukesha*, o motor em funcionamento a plena carga apresenta as seguintes especificações:

- |                                  |                         |
|----------------------------------|-------------------------|
| ○ Potência no eixo de saída      | 331 kW                  |
| ○ Consumo de combustível         | 105 Nm <sup>3</sup> / h |
| ○ Vazão do escapamento           | 0,46 kg / s             |
| ○ Vazão da bomba de refrigeração | 29,5 m <sup>3</sup> / h |

- Temperatura de saída dos gases 475 °C
- Temperatura da água de saída do motor 102 °C
- Temperatura da água de entrada do motor 92 °C
- Temperatura do ar de entrada no motor 25 °C

### 2.2.3 ESPECIFICAÇÕES DE MANUTENÇÃO

As especificações relativas a manutenção são importantes para determinar os custos operacionais, durabilidade e uma programação de serviços de manutenção.

Dados operacionais:

Troca de óleo.....	1000 h
Manutenção de rotina.....	1400 h
Revisão geral dos cabeçotes.....	11000 h
Revisão geral.....	33000 h

Em sistemas de cogeração é de importância fundamental conhecer além da potência de eixo do motor, a quantidade de calor que pode ser aproveitada dos gases do escapamento e da água de refrigeração.

Com os dados fornecidos pelo fabricante podem-se ter os valores das energias térmicas rejeitadas pelo motor. Para conhecer o calor rejeitado nos gases de escapamento, além da temperatura precisa-se conhecer as quantidades de cada um dos elementos que compõe os gases. Através de uma análise estequiométrica da combustão, encontram-se os elementos formadores dos gases do escapamento.

O gás natural é composto predominantemente de metano, podendo chegar a valores superiores a 90 %. Outros elementos também estão presentes tais como propano, etano, etc, porém em proporções pequenas que não chegam a alterar de maneira significativa uma análise estequiométrica baseada tão somente em metano (CH<sub>4</sub>).

### 3. EQUIPAMENTOS DA COGERAÇÃO

Todos os equipamentos que compõem o sistema de cogeração são projetados para obter o máximo rendimento possível. As novas tecnologias, tanto na área de materiais como na área de construção dos equipamentos destinados para cogeração, os tornam relativamente mais onerosos.

Diante destes fatos, mediante coleta de alguns dados, verificou-se a eficiência dos equipamentos utilizados pelo sistema proposto e juntamente com os equipamentos existentes da empresa na qual fará o aproveitamento das energias tanto elétrica como térmica do sistema de cogeração.

#### 3.1 ANÁLISE ESTEQUIOMÉTRICA DA COMBUSTÃO

O processo de combustão envolve a oxidação dos constituintes do combustível e, portanto, pode ser representado por uma equação química. Durante o processo de combustão, a massa de cada elemento do combustível permanece a mesma. Assim escrever as equações químicas e resolver os problemas quantidades de vários constituintes implica, basicamente, na conservação da massa de cada elemento.

Quando um combustível constituído por hidrocarbonetos, como é o caso do gás natural, é queimado, o carbono e o hidrogênio são oxidados, formando os produtos da combustão. Como o  $CH_4$ , reage com o oxigênio, o produto da combustão resulta em dióxido de carbono e água, como mostra a equação 3.1.

A massa molecular do  $CH_4$ , (gás natural), é composta pela massa molecular do carbono (12) mais a massa molecular do hidrogênio (1), sendo que na formação do metano existem quatro átomos de hidrogênio para cada átomo de carbono. De forma que a partir da massa molecular total do metano que é 16, pode se determinar os percentuais de cada elemento.

Portanto da massa total dividida pela massa de hidrogênio (4/16), obtém-se o valor de 0,25. Significa que 25 % da massa do metano é de hidrogênio. Da mesma forma, dividindo a massa total do metano pela massa de carbono (12/16), obtém-se o valor de 0,75. De forma que 75 % da massa do metano é de carbono.



Na maioria dos processos de combustão, o oxigênio é fornecido pelo ar atmosférico e não como oxigênio puro. A composição do ar atmosférico, em base molar, é aproximadamente de 21 % de oxigênio e de 78 % de nitrogênio e 1 % de argônio. O argônio é comumente desprezado na

solução de problemas de combustão que envolve o ar e assim passa a ser considerado como sendo composto de 21 % de oxigênio e de 79 % de nitrogênio, segundo Wylen et alli, (1995).

A composição do ar atmosférico em base mássica, segundo Faires et alli, (1983), é aproximadamente de 23,1 % de O<sub>2</sub> e de 76,9 % de N<sub>2</sub>, com a razão de  $76,9/23,1 = 3,32$  kg de N<sub>2</sub>/kg de O<sub>2</sub>.

A quantidade mínima de ar que fornece o oxigênio suficiente para a combustão completa do carbono, hidrogênio e quaisquer outros elementos do combustível que possam oxidar é chamada de ar teórico. Quando se consegue combustão perfeita dos reagentes com o ar teórico, o produto resultante, ou seja, os gases, não contém oxigênio.

A análise elementar do combustível especifica as diversas percentagens ponderais (ou frações ponderais) dos elementos químicos num combustível.

A equação 3.2 é usada para calcular a massa de ar real (*mar*), para uma combustão de um hidrocarboneto utilizando o ar atmosférico como fonte de oxigênio.

$$mar = \{(1 + exc)(1 + umid) \cdot [(11,6.C) + (34,84.H)]\} \left( \frac{kg \text{ de ar}}{kg \text{ de comb.}} \right) \quad (3.2)$$

onde para se ter a reação completa do combustível é necessário usar um excesso de oxigênio ou de ar, sendo representado pela parcela ( $1+exc$ ) na equação. Nos motores de combustão interna, o excesso de ar é monitorado pelo sensor de oxigênio localizado na saída dos gases. Para a queima do gás natural em motores de combustão interna o excesso de ar está na ordem de 1 %, segundo o fabricante do motor.

O teor de umidade presente no ar é considerado na equação pela parcela ( $1+umid$ ), sendo que no motor existe um sistema para aquecimento do ar de entrada, mas mesmo assim ainda entra no motor com uma umidade absoluta, cerca de 20 %.

Considerando *C*, o percentual de carbono e *H* o percentual de hidrogênio, presentes no metano, ao aplicar a equação 3.2 chegamos ao valor da massa de ar que é de 21,10 kg de ar por kg de combustível.

Com os dados da massa específica ( $\tilde{n}_{gás}$ ) do gás natural que é de 0,7142 kg/Nm<sup>3</sup> e do consumo do motor que é de 105 Nm<sup>3</sup> por hora, fornecido pelo fabricante, e aplicando na equação 3.3, obtém-se o valor da massa de combustível,  $mc = 75$  kg de combustível por hora para o funcionamento do motor.

$$mc = r_{\text{gás}} \cdot 105Nm^3 \quad (\text{kg}) \quad (3.3)$$

Multiplicando  $mc$  da equação 3.3, pelo resultado da equação 3.2, pode-se determinar a massa total de ar necessária para a queima do todo o combustível que entra no motor em uma hora.

Portanto são necessários 1588,61 kg de ar por hora para o funcionamento do referido motor.

Com este valor determina-se a massa total de entrada no motor, somando a massa de ar e massa de combustível obtendo-se o total de 1670,74 kg por hora.

Este valor também corresponde ao valor total dos gases do escapamento.

### 3.2 Emissões

Os produtos da combustão são importantes para se obter informações sobre o processamento da queima do combustível no interior da câmara de combustão do motor.

Através da análise elementar do combustível é possível saber quais são os produtos que compõe os gases do escapamento. No processo de combustão estão entrando carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio e através das reações químicas que ocorrem durante a combustão, se tem nos produtos os seguintes elementos: Dióxido de carbono, água, nitrogênio e oxigênio.

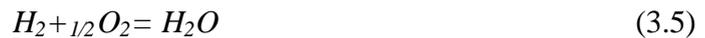
O princípio básico para análise dos produtos é a conservação da massa de cada um dos elementos. Assim, pode-se fazer o balanço do carbono, hidrogênio, oxigênio e nitrogênio e qualquer outro elemento que possa estar envolvido na combustão.

A massa de dióxido de carbono,  $CO_2$ , é resultante da reação do carbono com o oxigênio e pode ser definida através da equação 3.4, onde se relaciona a massa de  $C$  com a massa de  $O_2$  para obter  $CO_2$ .



Dividindo a massa total de  $CO_2$  pela massa de  $C$ , obtém-se o valor de 3,667 kg de  $CO_2$  por kg de  $C$ . Portanto, como o combustível apresenta cerca de 75 % de sua massa de  $C$ , a massa total de  $CO_2$  é de 206,27 kg por hora.

A massa de  $H_2O$  proveniente da reação do hidrogênio do combustível com o oxigênio presente no ar pode ser estabelecida através da equação 3.5, onde dois átomos de hidrogênio,  $H_2$  reagem com um átomo de oxigênio,  $O_2$ .



Fazendo o balanço de massa, quantidade de  $H_2O$  formada é de 8,93 kg por cada kg de hidrogênio. Como o combustível apresenta cerca de 25 % de sua massa de hidrogênio, ou seja, 18,75 kg, então a quantidade de  $H_2O$  presente nos produtos da combustão é de 167,57 kg por hora. Devido ao teor de umidade presente no ar de entrada, deve ser considerada mais uma parcela de  $H_2O$  nos produtos. A massa de ar seco é calculada dividindo-se a massa de ar úmido pela parcela  $(1+umid)$ .

Como o teor de umidade do ar é de 20 %, a massa de ar seco é de 1319 kg. Assim subtraindo a massa de ar seco da massa de ar úmido se obtém a massa de  $H_2O$  presente no ar, de forma que o valor encontrado para a massa de  $H_2O$  no ar é de 263,8 kg.

Portanto, somando-se as parcela de  $H_2O$  proveniente da reação do combustível mais o teor de umidade presente no ar, se obtém 431,37 kg de  $H_2O$  nos produtos da combustão.

Existe uma pequena quantidade de oxigênio, ( $O_2$ ) nos produtos devido ao valor de excesso de ar, considerado anteriormente no valor 1% da massa de ar teórica. A massa de ar teórica é calculada através da equação 3.2 fazendo os itens (*exc*) e (*umid*) assumir o valor zero, portanto, a massa de ar teórica tem o valor de 1305 kg.

Considerando que 23 % da massa do ar é de oxigênio, se tem o valor de 3,00 kg do elemento presente nos produtos proveniente do excesso de ar.

O nitrogênio,  $N_2$ , entra na combustão, porém não sofre reação de forma que toda a massa que entra na combustão, cerca de 77 % da massa de entrada de ar seco, está presente nos produtos da combustão, de forma que a massa de  $N_2$  é de 1015,63 kg por hora.

Totalizando a massa de produtos, 206,27 kg de  $CO_2$ , 1015,63 kg de  $N_2$ , 431,37 kg  $H_2O$  e 3,00 kg de  $O_2$ , obtém-se o valor de 1656,27 kg por hora, ou 0,46 kg/s.

Ponderando estes valores, encontra-se:

- 12,45 % de  $CO_2$
- 61,32 % de  $N_2$
- 26,04 % de  $H_2O$
- 0,19 % de  $O_2$

O fabricante do motor afirma que a vazão dos gases do escapamento é de 0,46 kg/s e de acordo com a análise feita, encontrou-se o valor de 0,46 kg/s. Este valor teórico encontrado pela análise mostra que mesmo fazendo várias considerações sobre o processo de combustão, com

relação a composição do gás natural, com os elementos presentes no ar atmosférico e o excesso de ar, chega-se ao valor que o fabricante do motor fornece, medido através de analisadores de gases e fluxômetros no laboratório da própria fábrica.

### 3.2.1 Análise do $C_p$ dos gases

Para poder calcular a energia dos gases precisa-se analisar o calor específico à pressão constante dos elementos formadores dos gases, uma vez que cada um deles possui valores diferentes.

Como estes valores também sofrem variações com a temperatura, se faz uma média entre dois valores.

Os dados da tabela 2 foram extraídos da obra de Incropera (1998), sendo consideradas as temperaturas de entrada e de saída da caldeira de recuperação e a temperatura de entrada do ar no motor.

Tabela 2. Valores do  $C_p$  dos elementos, kJ/kg °C.

	Temperatura 450 °C	Temperatura 150 °C	Temperatura 27 °C
$C_p CO_2$	1,130	0,942	0,851
$C_p N_2$	1,098	1,045	1,041
$C_p H_2O$	2,085	1,900	1,877
$C_p O_2$	1,036	0,947	0,920

De posse dos dados do  $C_p$  dos gases e da vazão do escapamento é possível calcular a energia disponível no mesmo. A equação 3.6 fornece o balanço de energia dos produtos, de modo que com a vazão dos gases sendo de 0,46 kg/s e usando o  $C_p$  médio entre as temperaturas de saída dos gases e a temperatura de entrada do ar no motor que é de 1,249 kJ/kg °C e usando como  $\Delta T = 450$  °C, em relação a temperatura de referência de 25 °C se consegue calcular a energia dos produtos. Portanto, a energia disponível nos gases do escapamento é de 257 kJ/s.

$$Q = m.C_p.\Delta T \quad (\text{kJ}) \quad (3.6)$$

### 3.3 CONSTITUIÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

O sistema de refrigeração do motor é constituído por um trocador de calor para fazer o aproveitamento da energia da água de refrigeração do motor e um radiador em série com o

trocador, para retirar o calor da água para a atmosfera quando não houver consumo da energia térmica suficiente no trocador de calor, garantindo a temperatura ideal de funcionamento do motor.

### **3.3.1 TROCADOR DE CALOR**

São utilizados sistemas de arrefecimento através de trocador de calor a placas, para resfriamento de água mediante água. É neste trocador de calor que é aproveitada a energia térmica proveniente do sistema de refrigeração do motor. No circuito fechado da água de refrigeração do motor estão localizados dois radiadores fechados hermeticamente, onde são usados ventiladores para soprar ar através das aletas do radiador, sendo utilizados como proteção, telas em alumínio. Estes radiadores somente entram em ação quando por algum motivo a retirada de calor no trocador de calor a placas não se efetuar ou se efetuar parcialmente, permitindo manter constante o arrefecimento do motor. O tanque de expansão é integrado ao radiador com sistema de proteção por baixo nível d'água e uma válvula que limita a circulação de água dentro do circuito fechado da refrigeração.

Como as superfícies do trocador de calor estão aquecidas, para evitar perdas de calor por radiação, este é confinado em um compartimento de chapa de aço carbono, revestido com lã mineral, aumentando a eficiência do trocador.

#### **3.3.1.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO TROCADOR**

O trocador de calor do tipo placas é constituído por um conjunto de placas estampadas em aço inoxidável, formando compartimentos intercalados onde se realiza a troca térmica dos fluidos. O conjunto de placas é vedado por borracha que separa as placas, sendo que as placas são fixadas por meio de tirantes de aço e apertadas com porca. O compartimento é constituído de chapa de aço carbono onde são colocadas camadas de lã mineral, fazendo o isolamento do mesmo. Esta característica é inerente para trocadores de calor destinados para sistema de cogeração onde se devem diminuir todas as possibilidades de perdas de energia como é o caso das superfícies do trocador.

### **3.3.2 RADIADOR**

Este dispositivo é um trocador de calor que retira a energia térmica da água de refrigeração, cedendo-a para a atmosfera por meio de convecção e radiação. Ar forçado por meio de ventiladores circula entre as aletas, aumentando a troca térmica por convecção.

No radiador existe um tanque de expansão para a água, necessário devido à variação de volume da água e também das câmaras de refrigeração do motor.

Também é incorporado ao radiador um sistema de purga de ar automática evitando que bolhas de ar circulem no sistema de refrigeração do motor, o que poderia ocasionar sobre aquecimento de alguma parte do motor em virtude da formação de vapor no interior das câmaras do motor e conseqüentemente a parada do mesmo. O radiador está em série com o fluxo de refrigeração do motor e o trocador de calor a placas, controlados por válvulas automáticas acionadas pelos sensores de temperatura, localizados ao longo do sistema de refrigeração.

#### **3.3.2.1 CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DO RADIADOR**

O radiador é constituído por um feixe de tubos elípticos de cobre colocados no interior de aletas de aço carbono sendo fixada aos tubos através de galvanização por imersão. Ao final dos tubos encontra-se o espelho, onde estão os cabeçotes que fazem a distribuição do fluido para o interior dos tubos e também se localiza a conexão de entrada e de saída. Na frente dos tubos aletados existe um suporte para a fixação do motor elétrico responsável pela circulação forçada de ar no interior das aletas.

### **3.3.3 CONJUNTO ELETRO BOMBA**

Para circulação de água do trocador de calor água/água, são utilizadas unidades de bombeamento de água do tipo centrífugo, com eixo horizontal, montadas sobre base metálica e acopladas aos motores elétricos através de luva elástica.

A vedação do eixo é efetuada através de selo mecânico.

## **3.4 ENERGIA TRANSFERIDA NO TROCADOR DE CALOR**

Uma parte da energia térmica contida na água de refrigeração do motor é retirada através do trocador de calor. Esta energia pode ser calculada através da equação 3.6, onde a vazão mássica de água tem o valor de 29500 kg por hora (29,5 m<sup>3</sup>/h), ou seja, 8,194 kg/s.

A temperatura da água na saída do motor, conforme dados fornecidos pelo fabricante, é de 102 °C e a temperatura da água de entrada no motor é de 92 °C, de forma que tem-se uma variação de temperatura de 10 °C, sendo este valor usado na equação como  $\Delta T$ . Usando o calor específico da água igual a 4,18 kJ/kg °C, obtém-se o resultado da energia que pode ser aproveitada no sistema de cogeração que é de 343,24 kJ/s.

Esta energia será transferida para água de processo, no trocador de calor a placas, como é demonstrado adiante. Este trocador foi escolhido por apresentar melhor desempenho, isto é, além de apresentar bom rendimento, o fator de perda de carga é reduzido devido a grande superfície de troca térmica. Também este tipo de trocador apresenta boa facilidade de manutenção principalmente no que se refere à limpeza interna do mesmo, porque devido ao tempo de funcionamento ser muito longo, deposita-se lama e incrustações na parte interna proveniente da água.

A limpeza é feita abrindo-se o conjunto de placas, onde se tem facilidade de acesso no interior das mesmas.

### 3.5 ENERGIA PARA AQUECIMENTO DA ÁGUA DE PROCESSO

A energia de 343 kJ/s disponível no trocador de calor é transferida para a água de processo. No trocador entra água a uma temperatura de 20 °C e sai após receber a energia, com a temperatura de 80 °C, sofrendo uma variação  $\Delta T$  de 60 °C, e a partir destes dados calcula-se quanto de energia foi absorvida pela água. Usando a equação 3.6, e usando o fluxo de água de processo com o valor de 4500 kg/h (1,25 kg/s), pode-se concluir que são absorvidos 314 kJ/s dos 343 kJ/s disponíveis no trocador.

De acordo com a lei de conservação da energia, e conforme dados obtidos através da equação 3.6, para o aquecimento da água de processo, existe uma perda de 29 kJ/s, no trocador.

Com o valor da energia de entrada ( $Q_e$ ), e de saída ( $Q_s$ ), pode-se calcular o rendimento ( $\eta$ ) do trocador, aplicando a equação 3.7.

$$\eta = \frac{Q_s}{Q_e} \cdot 100\%$$

O resultado obtido do rendimento é de 92 %.

Atribui-se esta perda de rendimento a deficiências do isolamento, válvulas de controle e conexões. Um fator que poderá diminuir ainda mais o rendimento do trocador de calor é a incrustação proveniente de sais e minerais presentes na água, principalmente na água de processo a qual sofre reposições a medida que haja consumo.

O balanço de energia do trocador é mostrado a seguir.

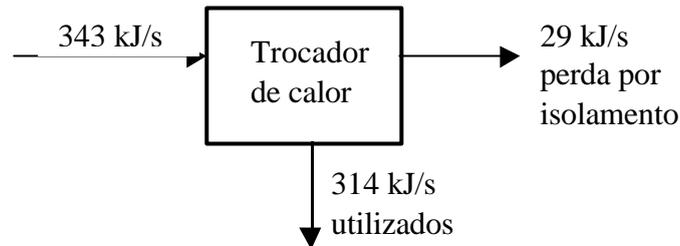


Figura 2. Balanço de energia do trocador de calor.

O trocador de calor apresenta este rendimento, porque está confinado dentro de um recipiente isolado termicamente, evitando que parte da energia trocada seja dissipada para a atmosfera segundo o fabricante, Criogem. Este procedimento é utilizado porque as superfícies do trocador estão aquecidas, ocorrendo perda de calor por radiação.

### 3.6 CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO

A energia do escapamento será trocada em uma caldeira de recuperação, cujas características são apresentadas a seguir juntamente com o cálculo demonstrando o rendimento.

Com os dados de temperatura e vazão dos gases do escapamento, determina-se o tamanho da caldeira necessária ao processo. A capacidade da caldeira entra dentro de uma faixa adequada conforme a demanda de vapor e do volume dos gases do escapamento, necessário para o aquecimento.

O objetivo desta caldeira será de produzir vapor d'água saturado a uma pressão de trabalho de 800 Kpa, e uma vazão de vapor de até 330 kg por hora, para ser usado no processo produtivo da empresa.

De acordo com o catálogo do fabricante, Aalborg, (2003) a caldeira, RCGN2 apresentada na figura 3 é a mais indicada para o uso em cogeração, atendendo a demanda de vapor e a produção de gases do motor.



Fig. 3: Caldeira AALBORGS RCGN2

Caldeira de recuperação dos gases de escape do motor a gás natural, do tipo fumotubular, para produção de vapor d'água saturado. Nas partes da caldeira que ficam sujeitas a pressão é usada chapa ASTM 285-C com características mecânicas e espessuras calculadas conforme as normas do código ASME, soldadas eletricamente por soldadores qualificados segundo normas do código ASME seção IX. As soldas longitudinais e circunferenciais são radiografadas em 100 %. Os tubos empregados são fabricados segundo norma ASTM178-A, possuindo espiralamento interno, que proporciona melhor troca térmica. O corpo da caldeira é pintado externamente com tinta fundo primer óxido de ferro e isolado termicamente com lã mineral que sua vez é recoberta com uma chapa fina pintada com esmalte sintético.

A reversão do fluxo da primeira passagem para a segunda passagem de gases é executada por uma câmara d'água flangeada a caldeira. Esta câmara além de proporcionar aproveitamento de calor, evita as constantes paradas para manutenção por quedas do refratário. As caixas de fumaça, dianteira e traseira são executadas em chapa de aço carbono revestida com lã mineral, possuindo na parte frontal duas portas de fácil abertura, além de bocais para alívio de gases explosivos e na parte traseira, uma ampla porta permitindo acesso à câmara de reversão e aos tubos.

Na saída dos gases para a atmosfera existe uma chaminé com 12 metros de altura para dispersar os gases bem afastados do solo, proporcionando uma melhor qualidade do ar e um sistema silenciador de ruído na própria chaminé, evitando o barulho excessivo. Todas as superfícies aquecidas são isoladas termicamente, procurando evitar ao máximo a perda de energia.

Recomenda-se que a caldeira esteja próxima ao motor, para evitar algum tipo de perda pela tubulação.

### 3.6.1 COMANDOS ELÉTRICOS E ELETRÔNICOS

Este é o centro nervoso de toda a caldeira, pois comanda todas as operações monitorando a segurança de operação e compõe-se basicamente do seguinte:

a) **Sistema de nível d'água** – um conjunto de dois eletrodos especiais que em contato com a água e usando sua condutibilidade elétrica, acionam por meio de circuitos eletrônicos o contator da bomba d'água toda vez que é atingido o nível mínimo de operação e desliga quando atingir o nível máximo de operação.

Um terceiro eletrodo executa o comando de bloqueio de entrada dos gases fazendo o mesmo ser desviado por meio de *by-pass* para a atmosfera evitando o super aquecimento da caldeira.

b) **Sistema de pressão de trabalho e pressão crítica** - a pressão de trabalho na caldeira é controlada por um pressostato modulante.

Este pressostato atua sobre o registro do *by-pass* de gases, direcionando o fluxo de gases diretamente para a atmosfera. Um outro pressostato, regulado para a pressão crítica, no caso de uma emergência, aciona um alarme. Paralelamente a pressão da caldeira também é monitorada pelo sistema de gerenciamento da cogeração, onde fica registrada qualquer variação da pressão da caldeira.

### 3.6.2 ALIMENTAÇÃO DE ÁGUA

A alimentação da água na caldeira é feita por bomba centrífuga, própria para trabalhar com água quente, proveniente do tanque de condensado que se encontra isolado termicamente, evitando perdas.

Como já descrito, o sistema eletrônico liga ou desliga esta bomba quando necessário.

### 3.7 RECUPERAÇÃO DO CALOR

No interior da caldeira, água proveniente do processo industrial, conhecida como condensado, entra na caldeira de recuperação a uma temperatura de aproximadamente 90 °C e recebe a energia térmica dos gases do escapamento formando vapor de água saturado. Porém até ocorrer este processo, a água vai recebendo calor, até atingir a temperatura de saturação, chamado de calor sensível, a partir deste ponto a água continua recebendo calor e mudando de fase líquida para vapor. Um dos métodos para se calcular as energias trocadas no interior da

caldeira, segundo Kern, (1987), é fazer o cálculo em duas etapas, uma para o calor sensível, necessário para elevar a temperatura da água, e a outra para o calor latente, necessário para fazer a mudança de fase da água.

### 3.7.1 CALOR TROCADO NA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO

A energia aproveitada na caldeira de recuperação serve para fazer o aquecimento da água, proveniente do tanque de condensado transformando-a em vapor para ser usado no processo industrial. O vapor que é utilizado pela indústria é produzido pela caldeira que é alimentada com óleo combustível do tipo BPF (baixo ponto de fluidez), onde abastece todos os consumidores de vapor em toda a empresa. O vapor saturado apresenta uma pressão de 800 kPa, portanto o vapor produzido pela caldeira de recuperação deve ter as mesmas características. Para desenvolver o cálculo da energia trocada na caldeira, adota-se o procedimento de se fazer o cálculo da energia para fazer o aquecimento da água até a temperatura de mudança de fase e depois para a energia para a mudança de fase da água, transformando-a em vapor.

A energia necessária para fazer o aquecimento da água, da temperatura de 90 °C até temperatura de 170 °C chama-se de calor sensível ( $QS$ ) e a energia necessária para a troca de fase da água é denominada de calor latente ( $QL$ ).

A equação 3.6 estabelece o balanço de energia para o calor sensível sendo possível determinar a primeira parte do cálculo na caldeira de recuperação.

A vazão mássica foi estabelecida com base nos dados fornecidos pelo fabricante da caldeira, sendo a mais adequada para as condições dos gases do escapamento do motor.

A partir do valor do  $Cp$  da água que é de 4,18 kJ/kg °C e da diferença de temperatura de entrada e de saída, representada por  $T = 80$  °C e a vazão mássica de 0,070 kg/s (252 kg/h), fornecida pelo catálogo técnico da Aalborg,(2003), encontra-se o valor para  $QS = 23,45$  kJ/s.

Para calcular a parcela de calor latente faz-se necessário o uso da equação 3.8 onde se relaciona a vazão mássica ( $m$ ) e a entalpia de vaporização da água na temperatura de 170 °C representada por ( $h_{170\text{ }^\circ\text{C}}$ ) e tendo o valor de 2049 kJ/kg .

$$QL = m.h_{170\text{ }^\circ\text{C}} \quad (3.8)$$

O valor de  $QL$  encontrado é de 143,43 kJ/s. Somando o valor de  $QS$  com o valor de  $QL$  através da equação 3.9 encontra-se o valor de  $Q_{total} = 167$  kJ/s.

$$Q_{total} = QS + QL \quad (3.9)$$

Portanto, o cálculo mostrou que são necessários 167 kJ/s para fazer 0,070kg/s de vapor nas condições anteriormente citadas.

### 3.7.2 ANÁLISE DO RENDIMENTO DA CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO

A caldeira recebe os gases do escapamento a uma temperatura de aproximadamente 475 °C, cede calor para a água vaporizar-se e então os gases remanescentes são lançados na atmosfera. A água condensada, a partir dos produtos de combustão, contém alguns gases dissolvidos e, portanto, pode ser corrosiva. Por esta razão a temperatura dos produtos de combustão é normalmente mantida acima do ponto de orvalho até a descarga dos produtos na atmosfera. Segundo a recomendação do fabricante e levando em conta a temperatura de entrada do condensado, na entrada da caldeira sendo cerca de 90 °C, a temperatura de saída dos gases lançada na atmosfera é cerca de 140 °C.

Portanto existe ainda energia que não é aproveitada nos gases.

Esta energia pode ser calculada através do valor  $C_p$  médio dos gases, 1,249 kJ/kg°C, nos dados da tabela 2, tomando se como temperatura de referência inferior à temperatura média de entrada do ar no motor, sendo no caso de 25 °C e portanto uma diferença de temperatura  $\Delta T = 115$  °C. Como a vazão mássica já é conhecida, ( $m = 0,46$  kg/s) pode-se entrar com estes dados na equação 3.6 para calcular a energia ( $Q$ ) que está sendo liberada para a atmosfera, através da descarga dos gases a temperatura de 140 °C.

O valor de  $Q$  encontrado foi de 64 kJ/s.

Conforme informações técnicas obtidas pelo fabricante da caldeira, deve-se considerar uma perda de eficiência devido ao isolamento da caldeira e até mesmo pelas próprias válvulas de comando, onde sempre existem perdas. Esta perda está na ordem de 10 % da energia de entrada, e como está entrando na caldeira cerca de 257 kJ/s, devido ao isolamento térmico temos uma perda de energia de aproximadamente 26 kJ/s. Esta perda considerada pela própria Aalborg, fabricante da caldeira, uma perda baixíssima, se comparadas com as caldeiras existentes no mercado. As caldeiras de recuperação dos gases de escapamento de motores a gás natural são consideradas mais eficientes do que as demais em virtude da qualidade dos produtos de combustão e características do material do isolamento, segundo o fabricante.

O somatório das perdas de energia na caldeira de recuperação totaliza a energia perdida para a atmosfera, pelos gases do escapamento, 64 kJ/s, e a energia perdida pelo isolamento, 26 kJ/s chega-se a um valor total de 90 kJ/s não aproveitados na caldeira de recuperação.

A figura 4 representa o balanço de energia na caldeira.

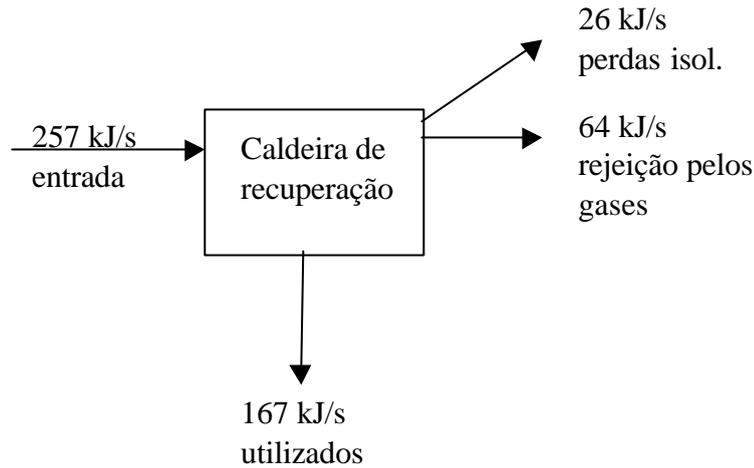


Fig. 4. Balanço de energia da caldeira de recuperação.

### 3.8 APLICAÇÃO DO VAPOR GERADO

O vapor produzido pela caldeira de recuperação (167 kJ/s), corresponde a 252 kg/h de vapor produzidos pela caldeira existente na empresa, de modo que quando esta quantidade de vapor for usada no processo haverá diminuição na produção de vapor na caldeira da empresa e conseqüentemente seu consumo de óleo combustível.

Uma vez que se tem a energia térmica proveniente do funcionamento do motor, já em condições de uso pelo processo industrial, ou seja, produzindo vapor e água quente, se pode passar para uma nova fase de cogeração que é aplicação desta energia.

#### 3.8.1 CONSUMIDORES DE VAPOR (SECADORES)

O vapor produzido entra diretamente no consumidor final que são os secadores de roupas.

Os secadores possuem condensadores onde o vapor entra, transferindo calor para o ar que circula no interior do mesmo. Este vapor após sair do condensador, já no estado líquido, entra na linha de condensado da empresa vindo abastecer a caldeira. Ainda no secador, existem dois condensadores, chamados de condensador de alta pressão e condensador de baixa pressão este último recebe o vapor do condensador de alta pressão, fazendo um pré-aquecimento do ar de forma que quando o condensado entra na linha principal da empresa, já está com a pressão atmosférica aumentando o rendimento do secador. Segundo o fabricante, Suzuki, (2003), devido aos detalhes construtivos e econômicos, estes secadores não apresentam isolamento nos condensadores irradiando uma enorme quantidade de calor para o ambiente. Ainda no próprio

fabricante dos secadores foram realizadas medições de consumo de vapor nos secadores, obtendo os valores relacionados na tabela 3.

Foram verificados dois secadores que se adequasse à produção de vapor produzida pela caldeira de recuperação. Um secador, com capacidade para 100 kg de roupas por carga consome aproximadamente 180 kg de vapor por hora com uma pressão de 800 kPa, sendo que um ciclo de secagem dura aproximadamente 50 minutos e, um secador com capacidade para 50 kg de roupas por carga, cujo consumo de vapor é de aproximadamente 72 kg de vapor por hora, também com uma pressão de 800 kPa.

Os secadores nos quais foram feitas estas medições, são do mesmo tipo e capacidades que se encontram na empresa sujeita a proposta da cogeração.

Tabela 3: Dados dos secadores

Equipamento	Capacidade	Consumo vapor
Secador grande	100 kg	0,050 kg/s
Secador pequeno	50 kg	0,020 kg/s

### 3.8.1.1 ENERGIA NA ENTRADA DOS SECADORES

Com base nos dados coletados, pode-se calcular a energia de entrada dos secadores, através das equações 3.6, 3.8 e 3.9. Como nos secadores entra vapor saturado e sai condensado, existe mudança de fase no interior dos condensadores e, portanto deve-se calcular em duas etapas a energia trocada.

Através das equações calcula-se a energia que cada secador utiliza para seu funcionamento, de forma que para o secador maior, com capacidade para 100 kg de roupas, o consumo, ou seja, a vazão mássica é  $(m) = 0,050$  kg/s. Inicialmente o vapor cede energia para o ar e então ocorre a mudança de fase. Nesta etapa esta relacionada a entalpia de condensação do vapor d'água, representada por  $h_{vl} = 2049$  kJ/kg. De posse desses dados e aplicando a equação 3.8 se consegue o valor do calor latente que é  $QL = 102,45$  kJ/s. Após esta etapa o vapor já mudou de fase passando para condensado, mas ainda está com a temperatura de 170 °C. Como é liberada energia para o condensado baixar a temperatura, calcula-se através da equação 3.6 o calor sensível para esta etapa. Aplicando  $T = 70$  °C que é a diferença de temperatura da entrada

do vapor até a saída do condensado 100 °C e o  $Cp_{\text{água}} = 4,18 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$  e usando a vazão mássica de 0,050 kg/s, resultando  $QS = 14,7 \text{ kJ/s}$ . Portanto a energia total ( $Q_{total}$ ) será a soma de  $QL$  mais  $QS$  conforme estabelece a equação 3.9, de maneira que o valor de  $Q_{total} = 117,11 \text{ kJ/s}$ . Da mesma forma com que foi calculada a energia para o secador maior, também foi calculado a energia para o secador menor e encontrou-se o valor de  $Q_{total} = 46,11 \text{ kJ/s}$ .

Somando-se o consumo de energia dos dois secadores, encontra-se um valor de 164 kJ/s.

### 3.8.1.2 ANÁLISE DO RENDIMENTO DOS SECADORES

Para calcular o rendimento do secador é necessário conhecer o tipo de roupa, o teor de umidade quando entra no secador, determinado pelo processo de centrifugação, o formato das peças de roupas, a umidade do ar de entrada, índice de costuras e dobras das peças de roupas, etc, de maneira que todos estes itens possuem grande variação. Tomando se com base a larga experiência da empresa fornecedora dos secadores, e fazendo uma média de todos estes valores o fabricante atribui um rendimento de 88 % para os secadores. De posse desses dados, pode-se avaliar mediante o balanço de energia, fig 5, a eficiência dos secadores para o processo de cogeração.

A energia útil nos secadores passa a ser então 88 % da energia que entra, ou seja, 123 kW.

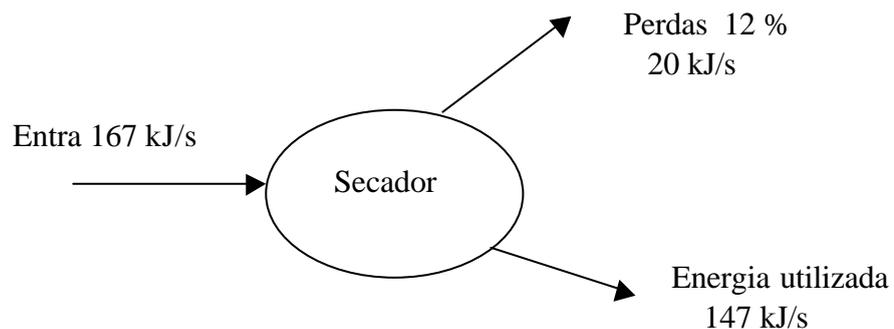


Figura 5. Balanço de energia dos secadores.

### 3.8.2 RESERVATÓRIO DE ÁGUA QUENTE

No caso da água quente produzida pelo trocador de calor, esta é armazenada em um reservatório isolado termicamente aguardando o período de abastecimento nas lavadoras.

O reservatório para água quente possui uma capacidade de 8 m<sup>3</sup>, com conexões de entrada e saída de água, com isolamento de lã mineral recoberto com alumínio corrugado. Como

todo o equipamento térmico possui perdas é natural que este também apresente uma certa perda, principalmente devido ao isolamento. Como se está trabalhando com equipamentos desenvolvidos por fornecedores, estes já possuem dados que em no caso é de muita valia, como é o exemplo o rendimento deste reservatório, que segundo o fornecedor apresenta um rendimento de 95 %.

O uso deste reservatório é para compensar a flutuação de volume produzido pelo trocador de calor que é de 1,25 kg/s e a carga na lavadora que é de 4.500 kg a cada ciclo de lavagem. Quando é abastecida a lavadora, o fluxo na entrada da máquina é muito maior do que o produzido pelo trocador de calor, sendo necessário fazer um acúmulo de água quente entre as cargas da lavadora. Abaixo, na figura 6, é apresentado de forma esquemática o reservatório para água quente.

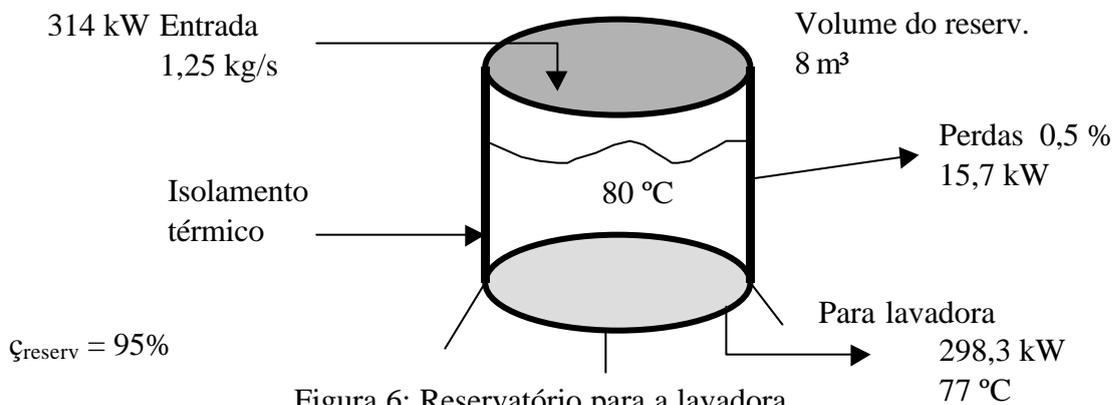


Figura 6: Reservatório para a lavadora

Calculando a temperatura de saída da água em função da perda de 5% devido ao isolamento. Para conhecer este dado, se usa a equação 3.6 de balanço de energia, onde a vazão mássica ( $m$ ) vale 1,25 kg/s, o  $Cp_{\text{água}} = 4,18 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$  e o  $Q_{\text{perdido}}$  como é o valor de 5% da energia de entrada, tem como valor 15,7 kJ/s. Pela lei da conservação de energia o  $\Delta T$  assume o valor de 3 °C. Este valor de 3 °C significa a variação de temperatura desde a entrada da água no reservatório até sua saída para ser consumida. Portanto como a água entra a 80 °C, quando esta sai para ser consumida está com 77 °C.

Devido à perda existente no reservatório, ponderada em 5 %, e esta perda está diretamente referida ao isolamento, existe um decréscimo na temperatura na ordem de 3 °C.

Para o processo, segundo informações do técnico da empresa, esta diferença de temperatura não ocasiona problemas, visto que quando a lavadora é abastecida com vapor a temperatura da água fica em torno de 75 °C e, ainda o processo de lavagem tolera uma variação na temperatura da água na ordem de  $\pm 10$  °C. Cada ciclo de lavagem dura aproximadamente uma hora e neste período é feito o acúmulo de água quente no reservatório.

### 3.9 GERADOR DE ENERGIA ELÉTRICA

Quando se utiliza energia seja ela qual for, é fundamental obter o máximo rendimento das máquinas e equipamentos que a consomem e também aquelas que transformam a energia.

O rendimento do gerador anteriormente especificado apresenta um valor na ordem de 82% .

Este rendimento apresenta pequenas variações, cerca de  $\pm 5\%$ , conforme o tipo de carga aplicado ao gerador.

No caso, toda a carga da empresa é ligada diretamente ao gerador, ocasionando oscilações na carga, principalmente devido à partida de motores com grandes inércias, como é o caso das centrifugadoras de roupas. Os motores dessas máquinas causam grandes oscilações na carga da empresa que por sua vez são absorvidas pelo gerador.

De acordo com a lei de conservação da energia, a potência total recebida pelo gerador deve se igualar à potência de saída útil somada com as potências perdidas para o funcionamento desta máquina.

O rendimento do gerador pode ser definido em função da equação 3.10, segundo Kosov,(1994).

$$\mathbf{h}_{er} = \frac{Pot_{saída}}{Pot_{entrada}} 100\% \quad (3.10)$$

Para o caso específico dos geradores a equação 3.11 apresenta melhor definição.

$$\mathbf{h}_{er} = \frac{Pot_{saída}}{Pot_{saída} + Pot_{perdas}} 100\% \quad (3.11)$$

Conhecendo as potências de entrada  $Pot_{entrada} = 331$  kW e a  $Pot_{saída} = 265$  kW de potência ativa e conhecendo o rendimento do gerador, ou seja a relação entre as potências de entrada e de saída ( $\zeta$ ) = 80 % de acordo com o fabricante, determina-se o valor das perdas do gerador através da equação 3.11, perfazendo o valor de 66 kW.

A figura 7 representa o balanço de potências do gerador.

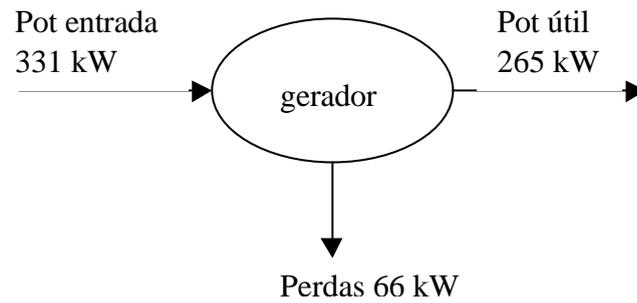


Fig.7. Balanço de potencia do gerador.

As perdas de potência das máquinas rotativas podem ser divididas em duas grandes classes, segundo *Kosov, 1994*.

- Perdas que são produzidas pela circulação de corrente pelas diferentes partes do enrolamento das máquinas, chamadas de perdas elétricas;
- Perdas em função direta do movimento dinâmico das máquinas, chamadas perdas rotacionais ou perdas extraviadas;

A análise das perdas revela que algumas delas são os resultados direto da carga e variam com ela, enquanto que outras são independentes da carga.

## 4. RENDIMENTO DA COGERAÇÃO

Um sistema de cogeração apresenta várias fases de avaliação de rendimento, dependendo das etapas em que se efetua a análise do rendimento. Em muitos casos, avalia-se apenas a energia elétrica produzida, a energia térmica do radiador e escapamento, obtendo assim valores altos de rendimento. Sabe-se que o motor produz uma potência de eixo, energia térmica proveniente da combustão e também pela água de refrigeração e que estas energias transformadas não são consumidas diretamente como elas se apresentam, sendo necessário que se faça mais etapas de transformação para consumir estas energias. Assim a energia mecânica na saída do eixo do motor é aplicada a um gerador que por sua vez transforma esta energia mecânica em energia elétrica, da mesma forma a energia térmica do escapamento, pode ser aproveitada para gerar vapor, por exemplo, mas também é aplicada em equipamentos para fazer esta transformação. É nestes equipamentos que começam a surgir as perdas que vão contribuir diretamente para baixar o rendimento da cogeração. Quanto mais etapa de transformação tiver a cogeração, menor será o rendimento da mesma.

### 4.1 RENDIMENTO DA PRIMEIRA ETAPA DA COGERAÇÃO

O desenvolvimento de novas tecnologias aplicado a sistemas de cogeração tem contribuído muito na redução das perdas dos equipamentos utilizados.

O motor usado em sistemas de cogeração apresenta melhorias na combustão por trabalhar com cargas praticamente constantes e o controle eletrônico da injeção de combustível faz uma combustão ainda melhor, aproveitando ao máximo a energia do combustível.

O balanço de energia no motor mostra o aproveitamento da energia do combustível, como é observado na figura 8.

Calculando a eficiência do motor VGL 18 GL, a partir do poder calorífico inferior do gás natural, que é de 35500 kJ/Nm<sup>3</sup> e considerando que o motor consome cerca de 105 Nm<sup>3</sup> por hora, pode-se dizer que a energia disponível no combustível na entrada do motor é de 1035 kJ/s.

A maior parte da energia fornecida pelo combustível é aproveitada, ou seja, está disponível para uso 931 kJ/s. O restante, 104 kJ/s fica atribuído as perdas pela superfície do motor, pela radiação.

$$h_{motor} = \frac{E_{nutilizada}}{E_{nentrada}} * 100\% \quad (3.12)$$

Com estes dados se calcula através da equação 3.12 o percentual de energia disponível no motor, chegando a um valor de 89,95 % .

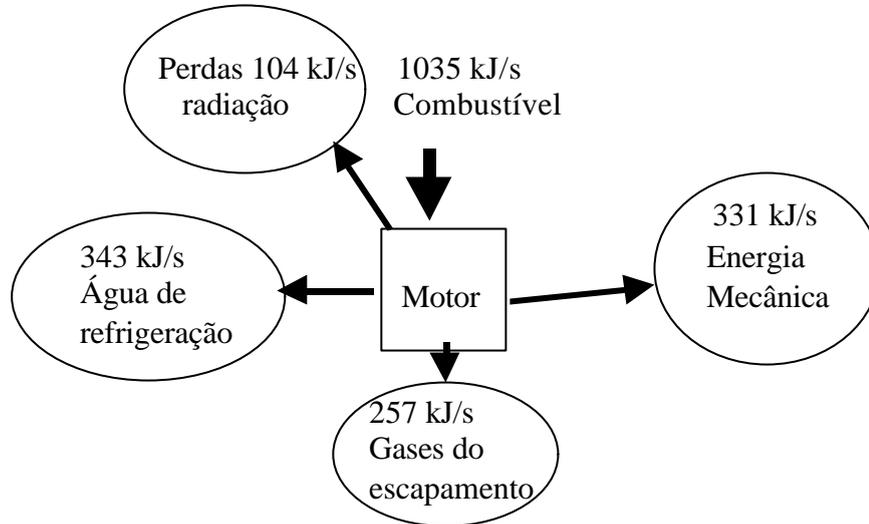


Figura 8: Balanço de energia do motor.

Fazendo um resumo e ponderando as energias utilizadas no motor se verifica que a maior parte de energia produzida é utilizada como potência de eixo, como pode ser visto abaixo, onde E= energia.

E= 331 kJ/s	Energia mecânica	31,98 %
E= 343 kJ/s	Energia térmica do radiador	33,14 %
E= 257 kJ/s	Energia térmica do escapamento	24,83 %
E= 104 kJ/s	Energia térmica de radiação	10,05 %
Total = 1035 kJ/s		100,00 %

Os dados anteriores podem ser vistos de maneira gráfica através da figura 9.

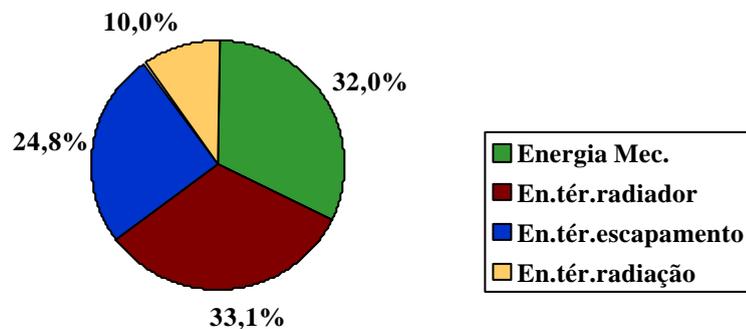


Figura 9. Gráfico de distribuição das energias no motor.

## 4.2 RENDIMENTO DA SEGUNDA ETAPA DA COGERAÇÃO

É nesta fase que são aplicadas a energia proveniente do motor, isto é, a energia térmica do escapamento e a do radiador, bem como a energia mecânica do eixo de saída. É onde são analisados os rendimentos do gerador de energia elétrica, o trocador de calor da água de refrigeração e a caldeira de recuperação de calor dos gases do escapamento. Com os valores calculados anteriormente, através do balanço de energia da figura 10, pode-se avaliar o rendimento desta fase.

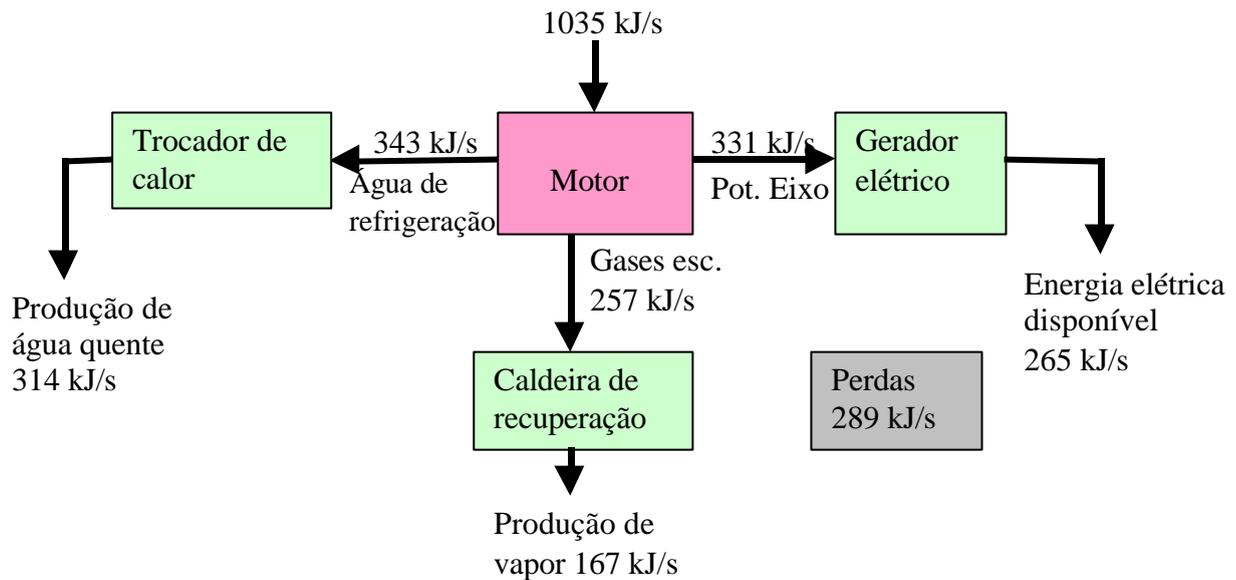


Figura 10. Balanço de energia da segunda fase cogeração.

Como pode ser observado no balanço de energia, o somatório das energias utilizadas nesta fase totaliza 746 kJ/s, originário de um combustível com 1035 kJ/s. Considerando a equação do rendimento 3.12 como sendo o total da energia utilizada pela energia de entrada, obtém-se o rendimento nesta fase, como é mostrado a seguir.

Diante deste resultado,  $\zeta = 72\%$  admite-se dizer que o rendimento dos equipamentos que transformam a energia do motor tem importância fundamental neste processo. Até o momento estamos considerando as perdas existentes no gerador de energia elétrica, no trocador de calor e na caldeira de recuperação, que chega a um valor de 28%, ou seja, aproximadamente 289 kJ/s deixam de ser utilizados nestes equipamentos.

Esta etapa da cogeração, disponibiliza a energia na condição de ser usada no processo industrial, porém uma análise mais completa é feita quando percorremos as etapas de transformação da energia até o consumidor final. Neste caso vamos considerar os equipamentos que consomem estas energias na empresa, portanto são os motores elétricos, iluminação, os

secadores e lavadoras. São considerados nesta fase final da cogeração os rendimentos destes equipamentos consumidores da energia. Com base nos dados coletados pode-se atribuir um valor de rendimento para todo o sistema de cogeração, até então descrito.

Para avaliar o rendimento nesta fase, com relação ao consumo de energia elétrica, foram estabelecidos alguns parâmetros estatísticos principalmente relativos aos motores das máquinas utilizadas na empresa.

Como a maioria dos motores é de potência semelhante, foi tomado como dado principal uma média de potência dos motores, visto que o rendimento de motores elétrico varia conforme sua potência, conforme catálogo eletrônico do fabricante Weg, 2003. Para o caso de motores usados nas máquinas e equipamentos da empresa o rendimento é da ordem de 77 % onde foram considerados motores de 5 CV.

A iluminação como sendo parte integrante do consumo de energia elétrica, porém em escala bem menor comparada com a potência instalada de motores, pode ser considerada juntamente com carga dos motores, para efeito de análise do aproveitamento da energia elétrica.

De forma que os 265 kJ/s que são produzidos no gerador, apenas 77 %, é útil efetivamente. Isto significa que de toda a energia elétrica que entra em um motor elétrico, 77 % é disponibilizada como energia mecânica no eixo.

Na figura 11, se representa o rendimento de energia do motor elétrico.

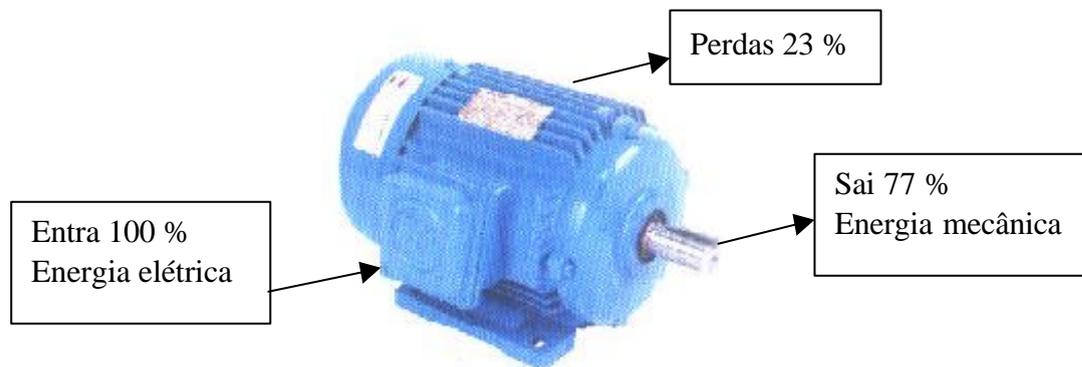


Figura 11: Rendimento de motor elétrico

Analogamente ao rendimento dos equipamentos elétricos, também estão os rendimentos dos equipamentos consumidores da energia térmica, conforme cálculos anteriormente efetuados.

De forma que se ponderar todos estes equipamentos, se pode ter uma avaliação final de todo o sistema de cogeração aplicado na indústria. É conveniente lembrar que nesta etapa final analisa-se desde a energia de entrada no motor da cogeração (combustível) até o consumidor final sendo ponderado todas as transformações ocorridas durante o processo.

### 4.3 RENDIMENTO DA ETAPA FINAL DA COGERAÇÃO

A fase final da cogeração mostra o caminho completo que a energia faz desde o combustível até o consumo final e por este caminho por ela sofrer várias transformações, passando por vários equipamentos, ela vai perdendo um pouco de sua quantidade, isto é, a quantidade de energia consumida é bem menor do que a energia presente no combustível, como pode ser avaliada pelo balanço de energia abaixo.

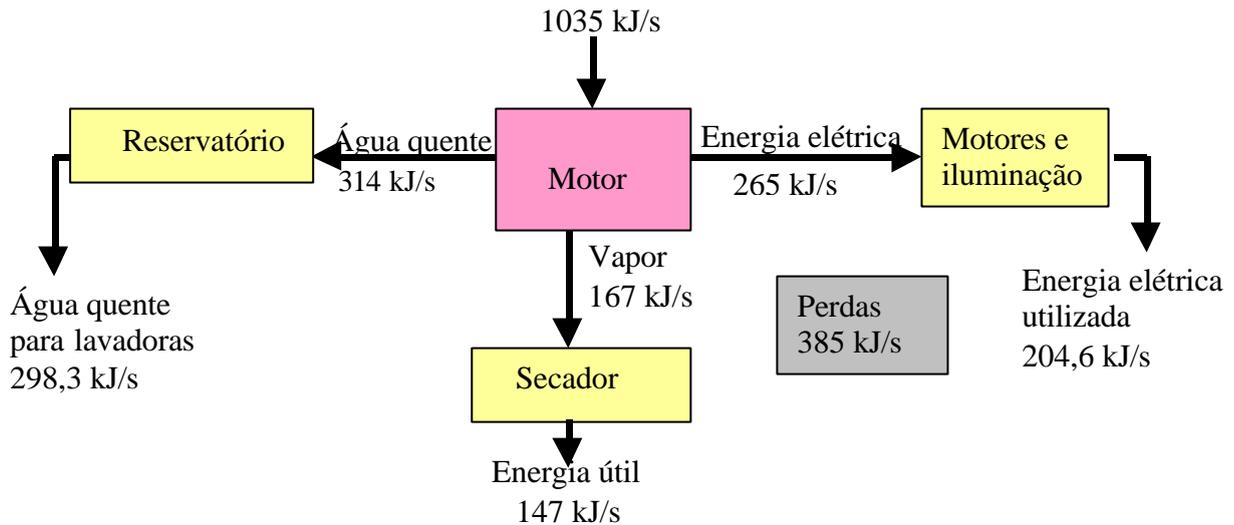


Figura 12: Balanço de energia da última etapa da cogeração

Aplicando a equação de rendimento 3.12 com os valores acima apresentados, conforme o balanço energético da figura 12, conclui-se a eficiência de todo o sistema de cogeração. Fazendo um somatório de todas as energias utilizadas efetivamente pelos consumidores finais, chega-se ao valor de 650 kJ/s, de forma que como o combustível disponibiliza 1035 kJ/s, o rendimento encontrado passa a ser de  $\eta = 62,8 \%$ .

O rendimento total mostra que a maior parte da energia contida no combustível é utilizada, mas o restante, as perdas, são uma porção muito significativa. Verificando quanto custa à energia perdida, isto é, aquela parcela de energia que não se pode usar em virtude dos equipamentos não permitirem este uso, encontra-se resultados muito significativos. A quantidade de 1035 kJ/s de energia contida no combustível que entra no motor custa cerca de R\$ 51,59 por hora e, no entanto destes são aproveitados R\$ 32,40 e os outros R\$ 19,19 são desperdiçados. No mês esta perda significa um valor de R\$ 13.817,86, que são dissipados na atmosfera.

O gráfico da figura 13 mostra o rendimento de cada fase, sendo considerado na primeira fase a energia disponível no motor, na segunda fase a energia disponível no gerador, na água

quente de refrigeração e nos gases do escapamento e na última fase da cogeração a energia aproveitada nos equipamentos da empresa.

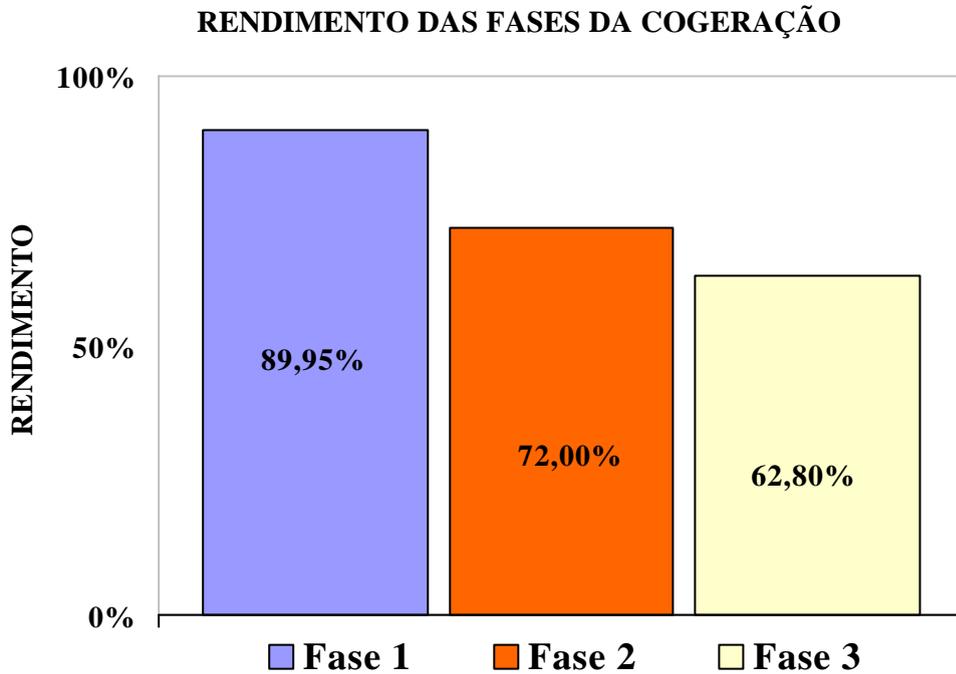


Figura 13:  
Gráfico dos rendimentos das fases da cogeração

## 5. ANÁLISE DE CUSTOS

A análise de custo que será demonstrada foi baseada na coleta de dados dos fornecedores dos equipamentos necessários para instalar uma estação de cogeração. Nos fornecedores de energia foi verificado o custo de acordo com a demanda, por exemplo, no caso de gás natural o preço sofre variações de acordo com a demanda. Da mesma forma o custo do óleo combustível para alimentação da caldeira existente na empresa.

Para começar esta análise determina-se o custo operacional do grupo motor-gerador.

### 5.1 CUSTO OPERACIONAL DO GRUPO-GERADOR

O custo operacional do grupo motor-gerador visa mensurar todos os gastos necessários para mantê-lo em funcionamento, sendo considerados neste caso os custos de filtros, lubrificantes, mão de obra, etc. O fabricante recomenda que se faça reserva financeira para manutenção de acordo com a potência do grupo motor-gerador, ou seja, a potência elétrica útil disponível no gerador e estabelece um valor adequado.

Para se calcular o custo operacional relaciona-se a reserva para manutenção juntamente com o custo do combustível.

Como o preço do combustível é de R\$ 0,4080  $Nm^3$ , representado por (A), conforme a tomada de preço efetuada na distribuidora Sulgás e tomando-se o preço base referente ao mês de dezembro/03. O consumo de combustível já é conhecido, sendo de  $105 Nm^3/h$  e representado por (B). A reserva financeira para a manutenção como é sugerida pelo próprio fabricante do motor é R\$ 33,00/MW gerado ( \$11,00/MW), ou seja, o custo da reserva para 265 kW passa a ser de R\$ 8,75 representado por (C).

A equação 3.13 calcula o custo operacional do grupo motor-gerador por hora.

$$C_{op} = A.B + C \quad (3.13)$$

Resolvendo a equação, o valor do custo operacional  $C_{op} = R\$ 51,59$ .

De maneira que o custo unitário do kWh gerado passa a ser de R\$ 51,59 / 265 kWh, ou seja, **R\$ 0,21 / kWh**. Uma hora do grupo gerador custa R\$ 51,59 gerando 265 kW de potência elétrica, a razão de R\$ 0,21/kWh, 257 kJ/s de energia térmica produzida pelos gases do escapamento e 343 kJ/s de energia térmica proveniente da água de refrigeração.

## 5.2 CUSTO OPERACIONAL DA CALDEIRA EXISTENTE NA EMPRESA

O sistema de cogeração além de produzir a energia elétrica para a empresa também produz uma parcela de energia térmica utilizada no processo industrial. Ao aproveitar esta energia térmica obviamente se reduz o consumo da energia térmica produzida pela caldeira, ocasionando menor consumo de combustível. Para poder comparar com o custo da energia térmica da cogeração deve-se analisar o custo de combustível da caldeira, como é mostrado abaixo.

A caldeira utiliza como combustível óleo BPF (baixo ponto de fluidez), do tipo 1A fornecido pela Companhia Ipiranga Distribuidora S/A, ao custo de R\$ 0,6153 /kg, valor referente ao mês de janeiro de 2004.

O consumo de combustível da caldeira é 170 kg por hora, para produzir 2000 kg de vapor d'água por hora. Os custos de manutenção com a caldeira não foram computados por motivo de que se encontram dissolvidos no custo de manutenção geral da empresa.

Dados da caldeira:

- Custo do combustível                      R\$ 0,6153 / kg
- Consumo de combustível                      170 kg / h
- Total do custo                                      R\$ 104,60 / h

A caldeira trabalhando durante uma hora produz cerca de 2000 kg de vapor, custando R\$ 104,60.

Aproveitando a energia do trocador de calor (298kJ/s) e também da caldeira de recuperação(167 kJ/s), totalizando 465 kJ/s do sistema de cogeração, e aplicando estas energias nos mesmos consumidores da empresa, pode-se ter uma economia de vapor produzido pela caldeira a óleo. Levando em conta o rendimento da caldeira da empresa que é de 65%, o consumo de combustível para produzir 2000 kg de vapor, ou seja, 1324 kJ/s é de 170 kg de comb/h. Portanto quando for utilizada a energia térmica do sistema de cogeração, a caldeira da empresa deverá produzir apenas 859 kJ/s sendo necessário 110 kg de combustível por hora.

Com estes novos valores, calcula-se um novo custo operacional da caldeira da empresa.

Custo do combustível	R\$ 0,6153 / kg
Consumo de combustível	110 kg / h
Total do custo	R\$ 67,68 / h

A caldeira trabalhando durante uma hora produz cerca de 859 kJ/s de energia na forma de vapor, custando R\$ 67,68. O restante da demanda de vapor (465 kJ/s) seria completado pelo sistema de cogeração.

### **5.3 ANÁLISE DA CONTA DE ENERGIA ELÉTRICA DA EMPRESA**

O fornecimento de energia elétrica para a indústria é de acordo com a demanda no que se refere à tarifa da energia.

A seguir será analisada a tarifa verde dentro dos parâmetros de consumo da empresa.

É muito importante lembrar que existe uma diferenciação tarifária de acordo com o horário que é utilizada a energia.

### **5.3.1 HORÁRIO DE PONTA**

O horário de ponta é composto por 3 horas consecutivas, situadas no intervalo compreendido diariamente, entre as 17 e 22 horas, exceção feita aos sábados e domingos, definido pela concessionária, considerando as características do seu sistema elétrico.

Neste horário o custo de energia elétrica chega a ser até 11 vezes mais caro do que no horário normal.

A tarifa verde é composta por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica, de acordo com as horas de utilização do dia e os períodos do ano, e por uma única tarifa de demanda de potência em qualquer horário de utilização. Abaixo segue uma lista de itens que compõe a tarifa verde.

- Demanda na ponta e fora (seco ou úmido)
- Consumo na ponta úmido
- Consumo fora da ponta úmido
- Consumo na ponta seco
- Consumo fora da ponta seco

O horário fora de ponta (fp) - composto pelas 21 horas diárias complementares ao horário de ponta.

Sábados e domingos são considerados horários fora de ponta.

Período úmido (u) - período de 5 meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro de um ano a abril do ano seguinte.

Período seco (s) - período de 7 meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de maio a novembro.

O horário de ponta significa o período em que as linhas de transmissão estão mais sobrecarregadas pelo elevado consumo principalmente nas residências, onde existe um consumo excessivo devido a chuveiros e a iluminação e por isso as concessionárias penalizam as empresas que usam a energia neste período, elevando excessivamente a tarifa.

### **5.4 DADOS DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Estes valores foram coletados com medições efetuadas diretamente na empresa e relacionando com o período de funcionamento da mesma.

O período fora de ponta foram relacionados 21 dias úteis com 21 horas diárias mais quatro sábados e quatro domingos com 24 horas, totalizando 654 horas, sendo consumido em média uma potência de 260 kWh. Portanto foram consumidos 170040 kWh.

Para o período na ponta são considerados 22 dias úteis com 3 horas diárias, totalizando 66 horas, sendo consumido em média uma potência de 260 kWh. Foram consumidos na ponta 17160 kWh. O total de consumo (na ponta e fora dela) é de 187200 kWh.

O total da conta de energia perfaz um valor de R\$ 19.483,88, para um consumo de 187200 kWh, custando a razão de R\$ 0,104 / kWh. Estes valores são referidos ao mês de dezembro / 2003, conforme pode ser observado na tabela 1.

A empresa mantém o consumo com pequenas variações durante o ano.

## 5.5 CUSTO DA ENERGIA DA EMPRESA SEM GERADOR

A empresa tem despesas com energia elétrica da concessionária e com o consumo de combustível para a caldeira.

O custo de combustível ( $C_{comb}$ ) para a caldeira durante o mês inteiro é de R\$ 75.312,72, chegando neste valor através da equação 3.14, onde é relacionado o consumo da caldeira ( $D$ ) = 170 kg/h, o custo do combustível ( $F$ ) = R\$ 0,6153 / kg e o número de horas no mês ( $G$ ).

$$C_{comb} = D \cdot F \cdot G \quad (3.14)$$

Somando o custo do combustível para a caldeira mais o custo da energia elétrica, encontra-se um total de R\$ 94.796,60.

Um dos objetivos da possível implantação de um sistema de cogeração na empresa é a redução do valor da conta de energia total da empresa.

Comparando com o custo operacional do grupo motor-gerador, juntamente com a caldeira da empresa, obtêm-se os valores para comparações.

## 5.6 CUSTO DA ENERGIA PARA A EMPRESA USANDO COGERAÇÃO

Os valores apresentados a seguir é uma estimativa do custo que a empresa teria, se pusesse o grupo motor-gerador operando 24 horas por dia, gerando eletricidade e energia térmica, ao processo da empresa.

Usando a equação 3.14, levando em consideração que o consumo de combustível para a caldeira agora é menor ( $D$ ) = 110 kg/h, o custo mensal é de R\$ 48.731,76.

O custo de operação do grupo motor-gerador já calculado é de R\$ 51,59/h, e considerando 720 horas no mês totaliza o valor de R\$ 37.144,80.

Assim é possível afirmar que o custo de energia para a empresa passaria a ser de R\$ 85.876,56.

## 5.7 CUSTO DA INSTALAÇÃO DO SISTEMA DE COGERAÇÃO

Ao se avaliar a viabilidade de um sistema de cogeração em uma empresa, é fundamental preocupar-se com o custo dos equipamentos necessários para poder fazer a geração de energia elétrica bem como o uso da energia térmica. Após longa pesquisa de mercado, encontraram-se várias empresas que executam a venda e instalação dos equipamentos necessários ao sistema. A relação de equipamentos necessários, por exemplo, o conjunto motor-gerador, uma caldeira de recuperação, um trocador de calor a placas, um radiador auxiliar, quadros de distribuição de energia elétrica, reservatório para água quente, tubulações, isolamentos e demais partes que integram o sistema de cogeração, juntamente com a instalação dos mesmos revelou valores para serem analisados pela empresa.

Para ter um sistema de cogeração com as capacidades já descritas, a empresa faria um investimento de:

Valor do investimento = U\$ 385.000,00 (trezentos e oitenta e cinco mil dólares).

Este valor convertido em reais à razão de três reais por dólar daria:

Valor do investimento = R\$ 1.155.000,00 (Um milhão cento e cinquenta e cinco mil reais).

Com este valor a empresa pode por em funcionamento um sistema de cogeração, trabalhando com um grupo motor-gerador produzindo 265 kW de energia elétrica suprindo toda a necessidade da empresa e aproveitar a energia térmica ao processo produtivo.

## 5.8 RETORNO DO INVESTIMENTO

Considerando todos dados mencionados pode-se fazer algumas comparações em relação à implantação do sistema de cogeração, como por exemplo, o tempo de retorno do investimento.

Neste caso fazendo a diferença entre o valor da conta de energia da empresa e o valor da conta de energia considerando a cogeração em funcionamento, se tem o valor de R\$ 8.920,04.

Com este valor é possível avaliar o retorno do investimento.

Com esta economia, a empresa terá o retorno do capital empregado em 130 meses, ou seja, 10 anos e 10 meses.

## **6. ALTERNATIVA PARA REDUÇÃO DO CUSTO DA ENERGIA SEM USAR COGERAÇÃO**

O elevado custo de um sistema de cogeração deve ser muito bem avaliado do ponto de vista econômico e prático, ou seja, devemos saber muito bem quanto custa o aproveitamento de energia para ponderar a viabilidade da implantação do sistema.

Uma alternativa de reduzir o valor da conta de energia elétrica é a produção desta no horário em que ela custa mais caro, isto é, no horário de ponta.

Para a produção de energia elétrica somente no horário de ponta é necessário um grupo motor-gerador semelhante ao usado no sistema de cogeração. Porém neste caso é muitas vezes mais econômico usar um motor que utiliza como combustível não o gás natural, mas sim o óleo diesel.

Os motores que funcionam com óleo diesel custam bem menos do que os que funcionam com gás natural, até mesmo a estrutura do motor é bem mais leve. Neste caso teremos apenas a geração de energia por um período curto, cerca de três horas por dia, ou eventualmente nos casos em que haja falta de energia por parte da concessionária.

Muitas empresas adotam este método para redução da conta de energia elétrica, sendo economicamente viável o investimento.

Economicamente o custo do kWh gerado pelo grupo motor-gerador a diesel chega a 50 % do custo em relação ao da concessionária no horário de ponta.

Para exemplificar o custo de um grupo gerador a diesel devemos levar em conta os principais fatores como o custo de funcionamento, ou seja, o consumo de óleo combustível, lubrificante e ainda o custo operacional.

Tomando-se como base os valores que são computados pelas empresas que implantam estes grupos geradores, pode-se atribuir que o custo do kWh gerado nestas condições é de R\$ 0,26. Analisando a conta de energia elétrica da empresa colocando no lugar do custo da concessionária o custo do kWh gerado a diesel, pode-se verificar alterações significativas, principalmente no valor referente ao horário de ponta, conforme é apresentado na tabela 4.

Tabela 4: Conta de energia da empresa com gerador a diesel

Tarifa verde					
Custo da energia					R\$
Consumo FP	170.040	kWh x	0,054	R\$/kWh	9.182,16
Consumo P	17.160	kWh x	0,26	R\$/kWh	<b>4.461,60</b>
Demanda	260	kW x	5,83	R\$/kW	1.515,80

Demanda ultrap.	0	kW x		R\$/kW	0,00
	TOTAL				<b>15.159,56</b>
Custo por kWh	15.159,56	R\$ /	187.200	kWh	<b>0,08</b>

Pode-se verificar com os dados da tabela 4 que somente no horário de ponta é possível fazer uma economia de R\$ 4.324,32 mensais, comparando com os dados apurados na conta de energia da empresa, apresentada na tabela 1.

Se for analisado de forma global o custo de energia elétrica, observa-se que o preço do kWh fica reduzido em cerca de 20 %, passando a valer R\$ 0,08.

## 6.1 CUSTO DO GRUPO MOTOR GERADOR A DIESEL

Após comparações entre fornecedores, como foi feito para o grupo motor-gerador a gás natural, onde também foram avaliados vários itens como qualidade, período de manutenção, potência de eixo, peças de reposição, etc, se conseguiu um grupo adequado para atender a demanda de energia elétrica da empresa, chegando ao de valor mais acessível.

O valor do grupo gerador é de R\$ 250.000,00, já instalado. A partir deste valor se pode fazer uma análise econômica e estabelecer o tempo de retorno do investimento.

## 6.2 RETORNO DO INVESTIMENTO (GRUPO GERADOR DIESEL)

É notável que uma grande parte da energia térmica produzida pelo grupo é jogada fora, não sendo aproveitada de forma alguma, até porque para aproveitar esta energia seriam necessários os equipamentos relatados no sistema de cogeração e também não haveria possibilidade de usar estes equipamentos, devido ao fato de que seria necessário um regime permanente para poder estabilizar o processo, o que não ocorre quando se trabalha com o gerador apenas no horário de ponta. De forma que a redução é diretamente na conta de energia elétrica.

Então considerando a economia produzida pelo grupo a diesel R\$ 4324,32 e o custo do equipamento R\$ 250.000,00, pode-se estabelecer o tempo médio de retorno do investimento que é de 58 meses ou aproximadamente 5 anos.

Sob este aspecto a economia que a empresa terá é muito mais significativa do que usando um sistema de cogeração. Ainda com relação a garantia de funcionamento, não é tão crítica porque se houver algum problema com o grupo motor-gerador, a energia elétrica da

concessionária estará também disponível, não sendo obrigatório o uso de dois grupos, sendo um para reserva como ocorre no sistema de cogeração.

## **7. CONCLUSÃO**

O aproveitamento da energia hoje é um fator determinante na economia de uma empresa e devem merecer atenção especial os rendimentos dos equipamentos que usam energia. A cogeração é uma maneira fácil de gerar energia elétrica e aproveitar ao máximo o potencial energético do combustível. O aproveitamento da energia térmica está presente na cogeração em

segundo plano, de forma que quando se projeta um sistema de cogeração, tem-se como objetivo principal a produção de energia elétrica.

1. A cogeração com motores alternativos ainda é a melhor solução em produção de energia elétrica, sendo de menor custo e com várias possibilidades de combustível. O tipo de combustível mais utilizado para este fim é o gás natural, por ser um combustível que pouco polui o meio ambiente.
2. Os custos dos equipamentos para sistemas de cogeração possuem preços diferenciados, sendo bem mais onerosos.
3. Os sistemas de cogeração apresentam várias etapas para utilização das energias que são produzidas simultaneamente com a geração de energia elétrica e dependendo de como serão convertidas estas energias para o uso, depende o rendimento do sistema como um todo.
4. Para o caso estudado, os cálculos mostraram que o retorno do investimento aplicado na implantação de um sistema de cogeração torna inviável a aplicação sob o ponto de vista econômico.
5. Sem dúvidas é muito mais econômica a geração apenas de energia elétrica, somente no horário de ponta, através de um grupo motor-gerador a Diesel sendo que neste caso o retorno do investimento ocorre em menos tempo.
6. Apesar de todas as inovações tecnológicas nas mais diversas áreas de construção de equipamentos até mesmo na área de materiais, os custos dos componentes para um sistema de cogeração ainda são muito onerosos.

## **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

Babcock, George H., Wilcox, Stephen, 1992. “**Steam, Its Generation and Use**” Stultz, S. C.; Kitto, J. B.

Faires, Virgil M., Simmang, C. M. 1983. **“Termodinâmica”** Guanabara Dois S/A.

Incropera, Frank P., Dewitt, David P., 1998. **“Fundamentos de transferência de Calor e de Massa”** LTC- Livros Técnicos e Científicos Editora S/A.

Kern, Donald Q., 1987. **“Processos de Transmissão de Calor”** Guanabara Koogan S/A.

Kosow, Irving I., 1994. **“Máquinas Elétricas e Transformadores”** Globo S/A.

Mesny, Marcelo, 1976. **“Generacion Del Vapor – Calderas”** Marymar Ediciones, S/A.

Sontag, R.E., Borgnakke, C., Wylen, G. J. V., 1998. **“Fundamentos da Termodinâmica Clássica”** Edgar Blücher LTDA.

## **EMPRESAS CONSULTADAS**

Aalborg Industries S/A., departamento técnico, RJ.

Suzuki S/A , Engenharia, PR.

Stemac S/A, Grupos geradores, dep. Técnico, RS.

Renova Lavanderias, RS.

Sulgás distribuidora RS.

Companhia Distribuidora Ipiranga RS.

Alfa Laval, trocadores de calor, SP.

## **PAGINAS DA WEB CONSULTADAS**

[www.ceee.com.br](http://www.ceee.com.br)

[www.ctgas.com.br](http://www.ctgas.com.br)

[www.cogerar.com.br](http://www.cogerar.com.br)

[www.dinamotor.com.br](http://www.dinamotor.com.br)

[www.energia.cemig.com.br](http://www.energia.cemig.com.br)

[www.energetica21.com/articulo3.html](http://www.energetica21.com/articulo3.html)

[www.galpenenergia.com](http://www.galpenenergia.com)

[www.ipiranga.com.br](http://www.ipiranga.com.br)

[www.isover.com.br](http://www.isover.com.br)

[www.mwm.com.br](http://www.mwm.com.br)

[www.walkesha.com](http://www.walkesha.com)

## **REVISTAS CONSULTADAS**

- Brasil energia
- Mundo energia
- Energia e computacion , 14 ed.
- Revista Científica y Tecnológica de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
- Revista Petroquímica ed. 242 , 2002.