

**UNESP**

**Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá**

**Guaratinguetá 2011**

Daniel Hagestedt Ferreira

Cogeração em uma indústria automobilística.

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientadora: José Alexandre Matelli

Guaratinguetá 2011

F383c Ferreira, Daniel Hagededt  
Cogeração em uma indústria automobilística / Daniel Hagededt  
Ferreira – Guaratinguetá : [s.n], 2011.  
33 f : il.  
Bibliografia: f. 32

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade  
Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2011.  
Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli

1. Energia elétrica e calor - Cogeração 2. Motores de combustão  
interna I. Título

CDU 536.72

COGERAÇÃO EM UMA INDÚSTRIA AUTOMOBILÍSTICA

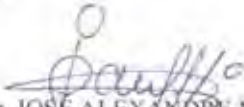
DANIEL HAGESTEDT FERREIRA

ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO  
COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE  
GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO  
DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Dr. Mauro Hugo Mathias  
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI  
Orientador/UNESP-FEG



Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI  
UNESP-FEG



Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA  
UNESP/FEG

Dezembro de 2011

## **DADOS CURRICULARES**

**Daniel Hagedstedt Ferreira**

NASCIMENTO 01.01.1986 – Rio de Janeiro / RJ  
FILIAÇÃO Oswaldo Luiz da Silva Ferreira; Margarete Aparecida  
Hagedstedt Ferreira

2005/2011 Curso de Graduação Faculdade de Engenharia  
Campus de Guaratinguetá – UNESP.

Ferreira, Daniel H. **Cogeração em uma indústria automobilística**. 2011. 33 f. Trabalho de Graduação (Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

## **RESUMO**

A busca pela melhoria da eficiência energética é uma preocupação comum das organizações. A cogeração é uma técnica bem conhecida, porém não muito difundida no país, mas que pode levar à redução dos custos com energia através da recuperação de calor residual de acionadores primários. Neste trabalho, é conduzido um estudo preliminar de viabilidade técnica e econômica da instalação de uma central de cogeração em uma indústria automobilística da grande São Paulo. Foi prevista, através de modelagem matemática, a necessidade de três motores de combustão interna de 2435 kW cada e recuperação do calor associado aos gases de exaustão para geração de vapor saturado. Comparada com a situação atual (sem cogeração), uma despesa energética de cerca de 2,2 MR\$ é evitada, resultando em um *payback* de pouco menos de 3 anos.

**PALAVRAS CHAVE:** Cogeração, análise técnica e econômica, motor de combustão interna.

FERREIRA, DANIEL H. **Cogeneration in an automotive company**. 2011. 33 f. Monograph (Graduate in Mechanical Engineering) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2010.

### **ABSTRACT**

The search for energy efficiency improvement is a common concern in many companies. Cogeneration is a well known technique but not so spread in Brazil, despite its potential for energy costs reduction through heat recovery from prime movers. In this work, a preliminary technical and economic study is carried out for a cogeneration plant application in an automotive industry of São Paulo. Through mathematics modeling, three 2435 kW internal combustion engines are selected. When compared to the current status (no cogeneration), annual savings of about 2,2 MR\$ are obtained, resulting a almost 3 years payback.

**KEYWORDS:** Cogeneration, technical and economic analysis, internal combustion engine.

## Lista de Figuras

|  |    |
|--|----|
| Figura 1: Esquema de sistema de cogeração. ....                                | 13 |
| Figura 2: Desenho esquemático dos quatro tempos do MCI.....                    | 16 |
| Figura 3: Ciclo Otto teórico e real.....                                       | 17 |
| Figura 4: Ilustração esquemática de uma caldeira de recuperação .....          | 19 |
| Figura 5: Definição de $\Delta T_{pp}$ .....                                   | 20 |
| Figura 6: Demanda horária de energia elétrica e vapor saturado. ....           | 22 |
| Figura 7: Fluxograma do sistema de cogeração proposto. ....                    | 23 |
| Figura 8: Curva de rendimento elétrico por carga do motor. ....                | 24 |
| Figura 9: Curva de vazão mássica de gás de exaustão por carga do motor. ....   | 24 |
| Figura 10: Curva de temperatura dos gases de exaustão por carga do motor. .... | 25 |
| Figura 11: Modelo implementado no EES. ....                                    | 27 |



## **Lista de Tabelas**

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1: Resultados da simulação horária do sistema de cogeração. .... | 28 |
| Tabela 2: Parâmetros X e Fc tabelados (ANEEL, 2000) .....               | 30 |
| Tabela 3: Principais insumos e seus gastos na planta. ....              | 31 |
| Tabela 4: Despesas atuais e com cogeração. ....                         | 32 |

## Sumário

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | Introdução .....                                    | 11 |
| 2     | Cogeração .....                                     | 13 |
| 3     | Equipamentos de cogeração .....                     | 15 |
| 3.1   | Motores de Combustão Interna .....                  | 15 |
| 3.1.1 | - Características .....                             | 15 |
| 3.1.2 | - Ciclo Otto .....                                  | 16 |
| 3.1.3 | - Emprego.....                                      | 17 |
| 3.2   | Caldeiras de recuperação.....                       | 18 |
| 3.2.1 | Temperatura de <i>pinch point</i> .....             | 20 |
| 4     | MATERIAIS E MÉTODOS.....                            | 21 |
| 4.1.  | Levantamento de dados.....                          | 21 |
| 4.2.  | Concepção e modelagem do sistema de cogeração ..... | 22 |
| 5     | Resultados .....                                    | 28 |
| 5.1.  | Resolução da ANEEL.....                             | 29 |
| 6     | Análise econômica.....                              | 31 |
| 7     | Conclusão.....                                      | 33 |
| 8     | Bibliografia .....                                  | 35 |

## 1 INTRODUÇÃO

Cogeração é a geração simultânea de energia mecânica e térmica a partir da queima de um mesmo combustível (BRASIL, 2005). Historicamente a cogeração já é observada desde o século XIV, e no Brasil foi impulsionada recentemente para aplicações no setor terciário e no setor industrial devido à maior disponibilidade do gás natural.

A cogeração pode operar segundo diversos ciclos como Rankine, Otto, Diesel e Brayton e existem diversas tecnologias que podem ser empregadas, sendo as mais difundidas:

- Turbina a vapor;
- Turbina a gás;
- Caldeira convencional;
- Caldeira de recuperação;
- Motor de combustão interna;
- Trocadores de calor;
- Sistemas de refrigeração por absorção;

Nesse trabalho, é proposta como solução uma planta de cogeração para geração de energia elétrica e vapor saturado em uma indústria automobilística da Grande São Paulo. A meta é conduzir um estudo preliminar de viabilidade técnica e econômica da substituição de um sistema de geração de energia térmica e elétrica convencional por um sistema de cogeração. Considera-se um conceito baseado em motor de combustão interna e caldeira de recuperação operando na estratégia *topping*, ou seja, o calor oriundo da queima de combustível para gerar energia eletro-mecânica é recuperado na caldeira para gerar energia térmica na forma de vapor. Como a demanda por vapor da empresa considerada é bem menor que a demanda de energia elétrica, o estudo é feito para a operação em paridade térmica, para evitar um super dimensionamento do

sistema quanto à disponibilidade de energia térmica e conseqüente diminuição da eficiência global.

## 2 COGERAÇÃO

Sempre se verificou na indústria uma busca por auto-suficiência na obtenção de alguns insumos, como energia elétrica (BRASIL, 2005). A cogeração é uma solução de engenharia que pode viabilizar economicamente a auto-produção de energia elétrica. A cogeração é ilustrada na Fig. 1. O sistema mostrado poderia, por exemplo, ser baseado em um motor de combustão interna. Ao queimar gás natural para geração de energia elétrica, o motor também gera resíduos energéticos, como calor da água de arrefecimento do motor, calor dos gases de exaustão e, em menor escala, calor do óleo de lubrificação e calor do *intercooler* no caso de motores turbinados. Ao se recuperar estes resíduos para geração de energia térmica útil (por exemplo, vapor), através de equipamentos apropriados, tem-se a cogeração perfeitamente caracterizada.

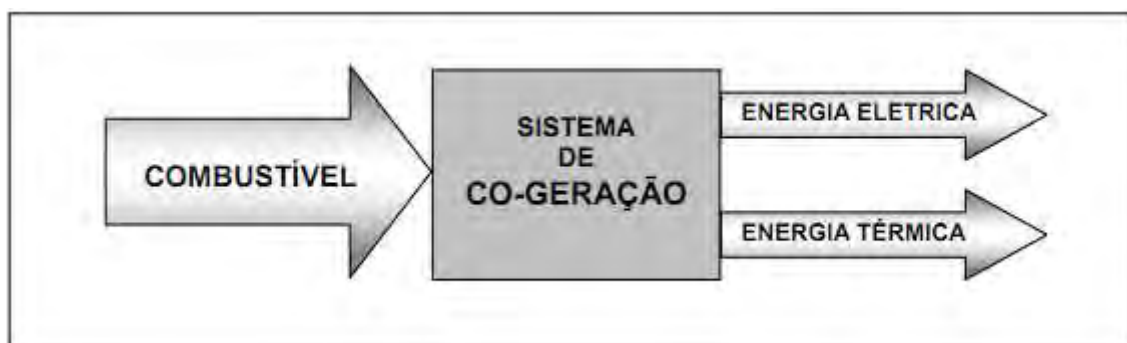


Figura 1: Esquema de sistema de cogeração (BRASIL, 2005).

Existem diversas vantagens quando se trata de plantas de cogeração. A mais atraente está atrelada ao aspecto econômico, na redução de custos operacionais. Tem-se também uma maior confiabilidade no fornecimento de energia elétrica, já que, por se tratar de um sistema de auto-produção de energia a partir da queima de um combustível, não está sujeito a interrupções do suprimento da rede (BRASIL, 2005).

Os ciclos de cogeração podem ser definidos como *topping* e *bottoming*. Uma planta de cogeração que opera no ciclo *topping* tem como produto energético prioritário a eletricidade ou potência mecânica. As plantas queimam combustível para geração de energia elétrica e o calor residual dessa queima é utilizado como recurso energético para geração de energia térmica útil. No ciclo *bottoming*, o produto

energético primário é a energia térmica, no qual o combustível é queimado para obtenção de tal. O calor residual dessa queima é geralmente recuperado para geração de vapor, que é expandido em uma turbina para geração de energia elétrica ou potência mecânica.

Na instalação de uma planta de cogeração deve-se primeiro verificar qual sua principal aplicação, de modo a se definir se o sistema irá operar em paridade térmica ou elétrica. Na paridade térmica, a planta gera energia térmica para qualquer que seja a aplicação (vapor, água fria/quente) na medida em que é demandada pela aplicação. Neste caso, deve ser estudada a possibilidade de venda de energia elétrica para a rede caso exista um excedente, ou sua compra em caso contrário. Na paridade elétrica, a planta gera energia elétrica na medida demandada, e o déficit de energia térmica é completado com queima suplementar em uma caldeira de reserva, por exemplo. No caso de excedente de energia térmica, as opções são a termo-acumulação ou o simples descarte.

### 3 EQUIPAMENTOS DE COGERAÇÃO

O foco do capítulo é apresentar as principais características e o emprego do motor de combustão interna (MCI) e caldeira de recuperação em aplicações estacionárias de cogeração.

#### 3.1 Motores de Combustão Interna

##### 3.1.1 - Características

O princípio de funcionamento do motor é alternativo, ou seja, um conjunto de pistões que se movimenta linearmente entre seu ponto morto superior (PMS) e o ponto morto inferior (PMI) transmite movimento para um eixo rotativo (virabrequim), através de um elemento chamado biela.

O movimento linear dos pistões ocorre devido à queima de um combustível na câmara de combustão, e se distinguem em motores de 2 ou 4 tempos (Balestieri, 2009). Tanto nos motores de 2 ou 4 tempos ocorrem os ciclos de admissão, compressão expansão e exaustão. O que os difere é que no motor de dois tempos o ciclo se completa em uma volta do eixo. Dessa forma, chama-se o primeiro tempo de compressão e admissão e o segundo, de expansão e exaustão.

No motor de quatro tempos são necessárias duas rotações do virabrequim, sendo projetado para que o ciclo de cada cilindro não seja coincidente, ou seja, que a explosão de um cilindro ocorra na admissão de outro, para dar estabilidade ao motor.

Os quatro tempos são definidos a seguir e ilustrados na Figura 2:

- 1º tempo (admissão): ocorre quando o pistão se afasta do PMS, provocando uma zona de baixa pressão na câmara de combustão e, dessa forma, aspirando a mistura ar/combustível através das válvulas de admissão;

- 2º tempo (compressão): com as válvulas de admissão e descarga fechadas, o pistão retorna ao ponto morto superior pela ação do virabrequim, comprimindo a mistura. Ao final deste processo, terá ocorrido uma rotação completa;
- 3º tempo (explosão): Nessa etapa ocorre a queima da mistura na câmara de combustão, devido a uma centelha ou apenas devido à compressão. A explosão força o cilindro do PMS para o PMI, transmitida pela biela para o virabrequim;
- 4º tempo (escape): A válvula de escape se abre e conforme o pistão retorna ao PMS (novamente pela ação do virabrequim), os gases de exaustão são expelidos da câmara. Ao final deste processo, duas rotações são feitas pelo virabrequim e se inicia um novo ciclo;

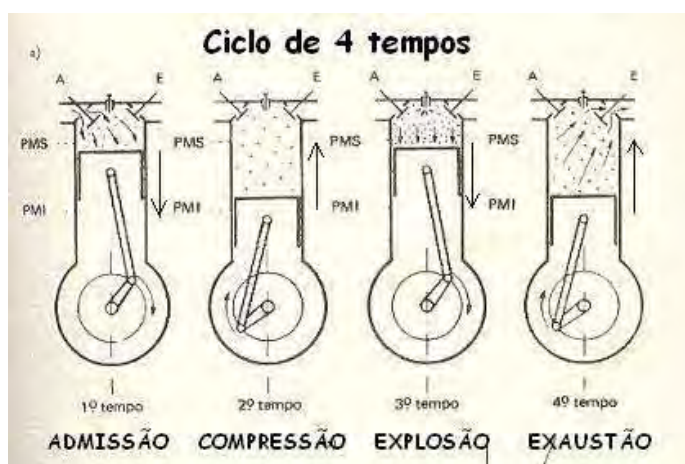


Figura 2: Desenho esquemático dos quatro tempos do MCI  
(<http://acer.forestales.upm.es>)

### 3.1.2 - Ciclo Otto

Os motores de combustão interna podem operar segundo os ciclos Otto e Diesel. No presente trabalho são considerados apenas motores operando no ciclo Otto e queimando gás natural.

Do ponto de vista termodinâmico, o ciclo teórico Otto ocorre em dois processos isocóricos e dois processos isentrópicos.



A Figura 3 ilustra o ciclo teórico (linha pontilhada) e o real (linha cheia). A diferença entre ambos se dá por perdas térmicas, atrito mecânico e principalmente pelo fato de um motor real ser um sistema aberto, ao contrário do sistema fechado idealizado.

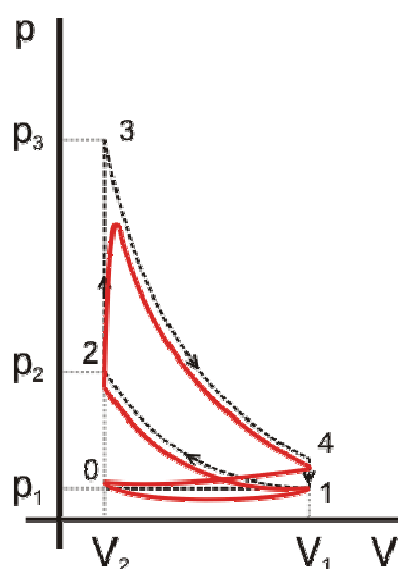


Figura 3: Ciclo Otto teórico e real (<http://acer.forestales.upm.es>)

No processo 1-2 acontece a compressão da mistura de ar/combustível. No processo 2-3 ocorre a ignição por uma centelha, causando a explosão da mistura. Em 3-4, ocorre a expansão causada pela explosão, onde a energia química do combustível se transforma em energia mecânica. No processo 4-1, a pressão diminui e a mistura se resfria, liberando calor. (Balestieri, 2009).

### 3.1.3 – Emprego

Além de ter grande aplicação na propulsão de veículos, o motor de combustão interna pode ser empregado em aplicações estacionárias. O MCI é utilizado em larga escala nas unidades de cogeração, devido à sua elevada confiabilidade, rapidez de partida e de resposta na variação da carga, e na razão entre potência e calor gerado. São especialmente aplicados em ciclos *topping* associados a caldeiras de recuperação acopladas na saída dos gases de exaustão para geração de vapor ou trocadores de calor

acoplados aos circuitos de água de arrefecimento ou óleo de lubrificação para geração de água quente (Balestieri, 2009).

Os principais parâmetros de escolha de um MCI para uma aplicação de geração de energia são listados abaixo (Balestieri, 2009):

- potência de eixo;
- consumo específico de combustível;
- eficiência;
- rotação;
- frequência de geração;
- velocidade média do pistão;
- diâmetro e curso do pistão.

Outros trabalhos nesse mesmo campo já foram realizados. Os autores Diego Erberelli e Badami, conduziram estudos do fornecimento de uma planta de cogeração para indústrias automotivas. As duas plantas operam com motores de combustão interna, sendo que Erberelli propôs a planta no Vale do Paraíba e Badami propôs uma planta no centro de desenvolvimento da Fiat em Turin, Itália. O segundo trabalho sugere o fornecimento de motores automotivos modificados para a cogeração e ambos apresentam viabilidade econômica favorável, com payback de 2 a 5 anos.

### 3.2 Caldeiras de recuperação

A caldeira de recuperação é o sistema térmico mais indicado para a geração de vapor a partir dos gases de exaustão de um motor de combustão interna. Na caldeira, os gases de exaustão trocam calor com água para evaporá-la (e, eventualmente, superaquecê-la), podendo haver queimadores para queima suplementar em caso de necessidade (Figura 4):

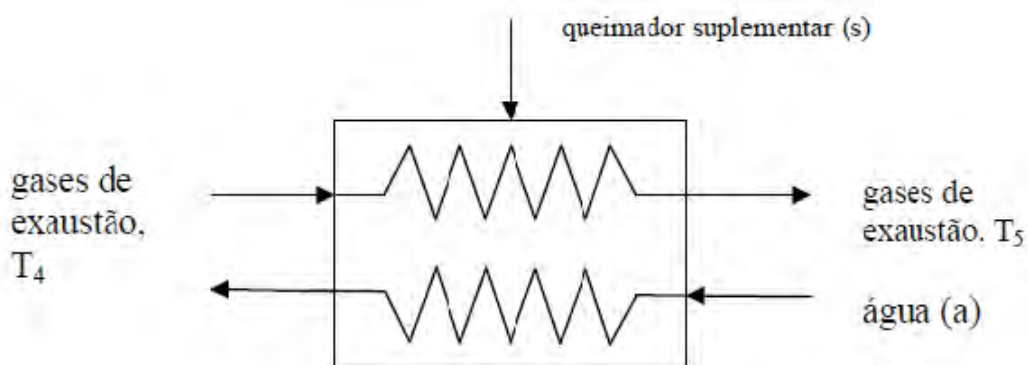


Figura 4: Ilustração esquemática de uma caldeira de recuperação (Balestieri, 2009)

A eficiência de uma caldeira de recuperação é afetada por suas características construtivas e materiais empregados. Seu balanço de energia é expresso pela Equação 1:

$$\eta_c(\dot{Q}_g + \dot{Q}_{qs}) = \dot{Q}_v \quad (1)$$

No qual:

$\eta_c$ : eficiência da caldeira de recuperação (adimensional);

$\dot{Q}_g$ : taxa de transferência de calor dos gases de exaustão (kW)

$\dot{Q}_{qs}$ : taxa de transferência de calor da queima suplementar de combustível (kW)

$\dot{Q}_v$ : taxa de transferência de calor para o vapor gerado (kW)

A temperatura dos gases de exaustão que entra na caldeira está na faixa de 300°C a 600°C, troca calor com a água e deve sair a uma temperatura na faixa de 120°C e 200°C, chamada de temperatura de chaminé. Valores abaixo de 120°C favorecem a formação de ácidos que danificam a chaminé, enquanto que valores acima de 200°C podem representar desperdício de energia (Balestieri, 2009). Caso a energia cedida pelos gases de exaustão não sejam suficientes para atender a demanda de vapor, pode-se usar queima suplementar na caldeira.

### 3.2.1 Temperatura de *pinch point*

O projeto da caldeira de recuperação é feito a partir de um parâmetro chamado temperatura de *pinch point* ( $\Delta T_{pp}$ ), que é a diferença entre a temperatura dos gases de exaustão na saída do evaporador e a temperatura de vapor saturado, como mostrado na Figura 5.

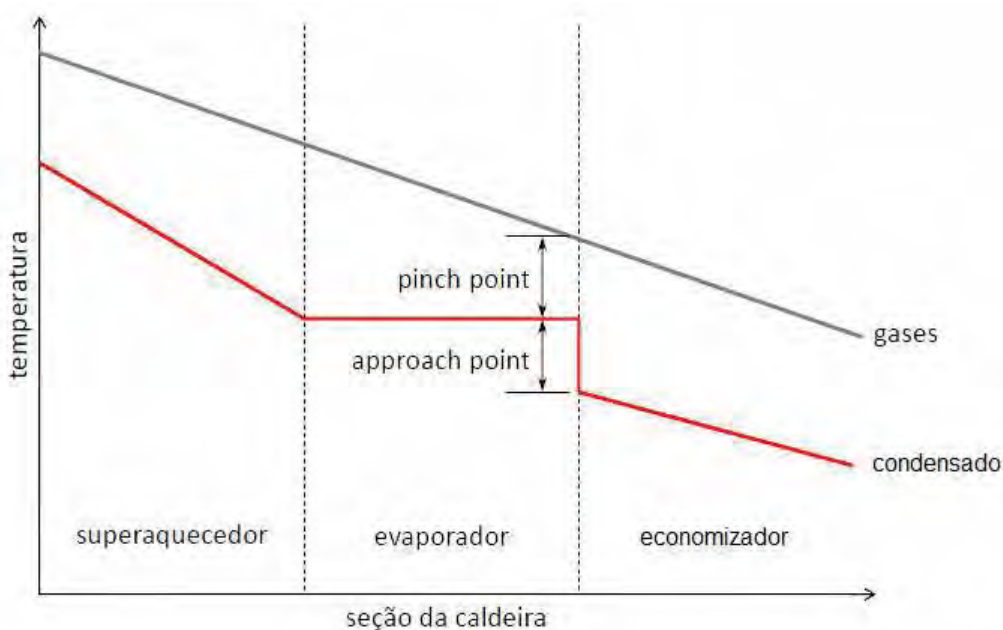


Figura 5: Definição de  $\Delta T_{pp}$  (MATELLI, 2011)

Por razões econômicas, recomenda-se que o  $\Delta T_{pp}$  situe-se entre 10°C e 30°C. Se o  $\Delta T_{pp}$  estiver abaixo do limite inferior, a área de troca de calor da caldeira se torna muito grande, aumentando seu custo e inviabilizando economicamente o sistema. Se acima do limite superior, a temperatura dos gases de exaustão na saída da chaminé será muito alta, o que significa desperdício de energia. (Balestieri, 2009).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

A indústria automobilística em questão conta com duas centrais de distribuição de utilidades que, em conjunto, possuem cinco caldeiras. O alvo do estudo é a central que fornece maior energia térmica, composta de duas caldeiras a gás natural, sendo uma de reserva, e uma caldeira elétrica, também de reserva. O vapor saturado é gerado a 1,1 MPa de pressão absoluta e retorna como líquido saturado a 90°C. Também foram levantados dados de consumo de energia elétrica, com a intenção de se avaliar o fornecimento de uma planta de cogeração para suprir as demandas de vapor e de energia elétrica.

### 4.1. Levantamento de dados

Os dados de fornecimento de água para caldeira são lidos pelos operadores a cada hora do dia e lançados em planilhas, que formam um banco de dados de demanda de vapor. O mesmo acontece com a demanda de energia elétrica, sendo medida de hora em hora e armazenados em um banco de dados. De posse desses valores é possível traçar curvas de demanda de energia térmica e elétrica em base horária.

A produção opera em cinco turnos diferentes, vinte e quatro horas por dia. Foram levantados dados de energia elétrica e vazão de vapor em um intervalo de tempo de um ano, de setembro de 2010 até agosto de 2011. Desse período de tempo de um ano, foram descontadas três semanas devido às férias coletivas dos funcionários. Através de planilha eletrônica, tirou-se a mediana dos valores para cada hora do dia, cujos resultados são apresentados na Figura 6. Com base na diferença entre a ordem de grandeza das demandas térmica e elétrica observada na Figura 6, fica evidente a opção pela estratégia de paridade térmica, já que a paridade elétrica resultaria em uma disponibilidade de energia térmica muito maior do que a energia térmica demandada.

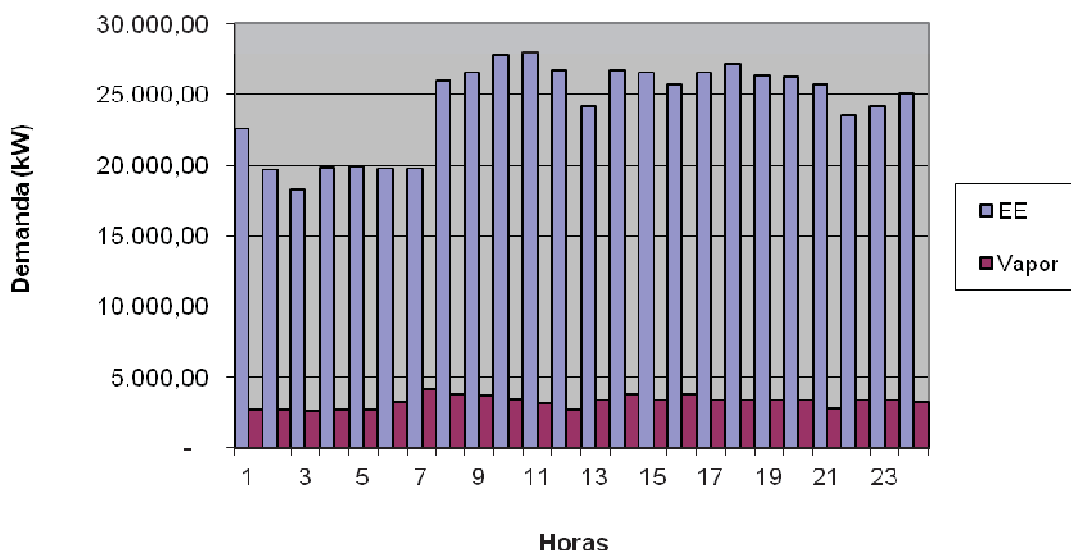


Figura 6: Demanda horária de energia elétrica e vapor saturado.

Com os dados de pressão, temperatura e estado do vapor e do condensado, é possível definir seus estados termodinâmicos. Para vapor saturado a 1,1 MPa, a entalpia é de 2781,7 kJ/kg ( $h_v$ ) e do líquido saturado a 90°C e 1,1 MPa é 376,92 kJ/kg ( $h_l$ ). Pode-se então calcular os valores de energia térmica pela Equação 2:

$$\dot{Q}_{vap} = \dot{m}_v(h_v - h_l) \quad (2)$$

#### 4.2. Concepção e modelagem do sistema de cogeração

Na Figura 7 é mostrado o fluxograma do sistema de cogeração proposto, no qual os gases de exaustão dos motores são recuperados em uma caldeira de recuperação. As caldeiras do sistema atual são mantidas como reserva.

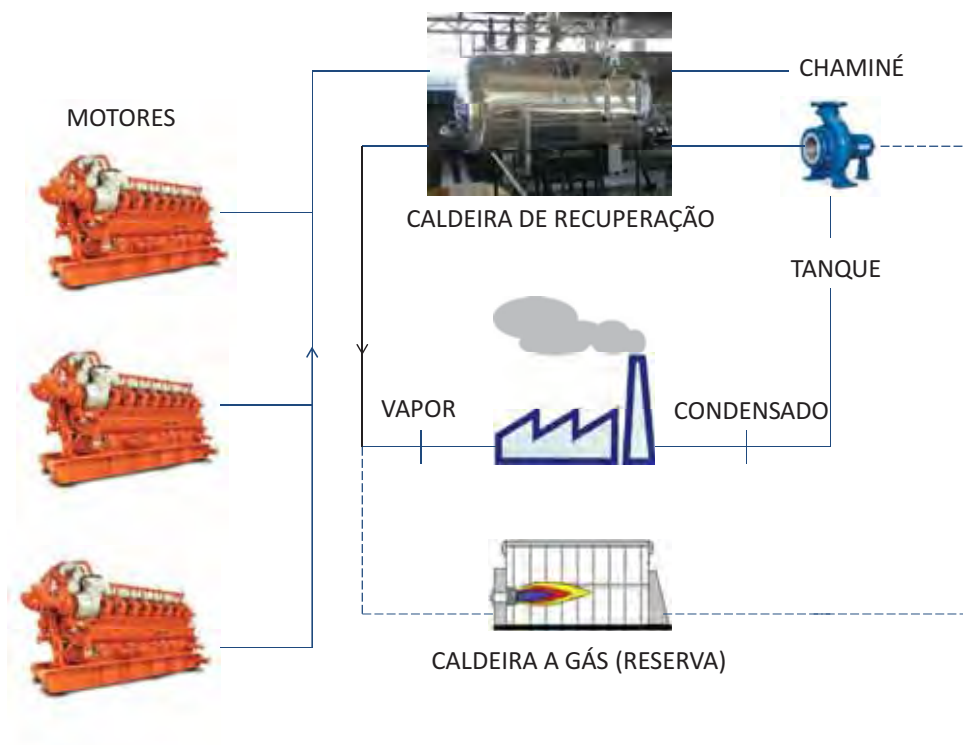


Figura 7: Fluxograma do sistema de cogeração proposto.

O sistema foi dimensionado com base no motor Waukesha 12V275GL+, que tem uma potência nominal de 2435 kW a plena carga (ver catálogo em anexo A). As equações de carga para esse motor foram obtidas a partir de informações do fabricante e são apresentadas nas Figuras 8, 9 e 10.

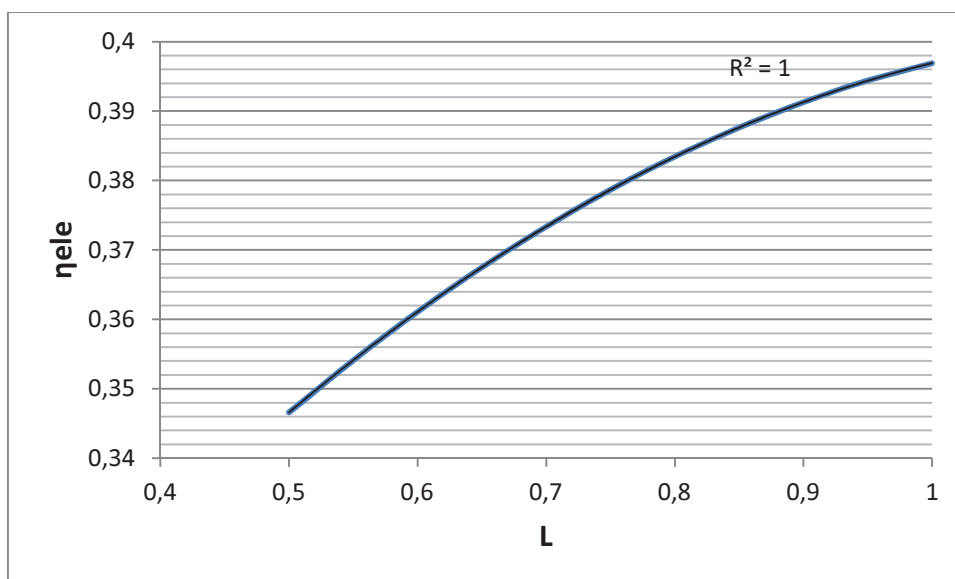


Figura 8: Curva de rendimento elétrico por carga do motor.

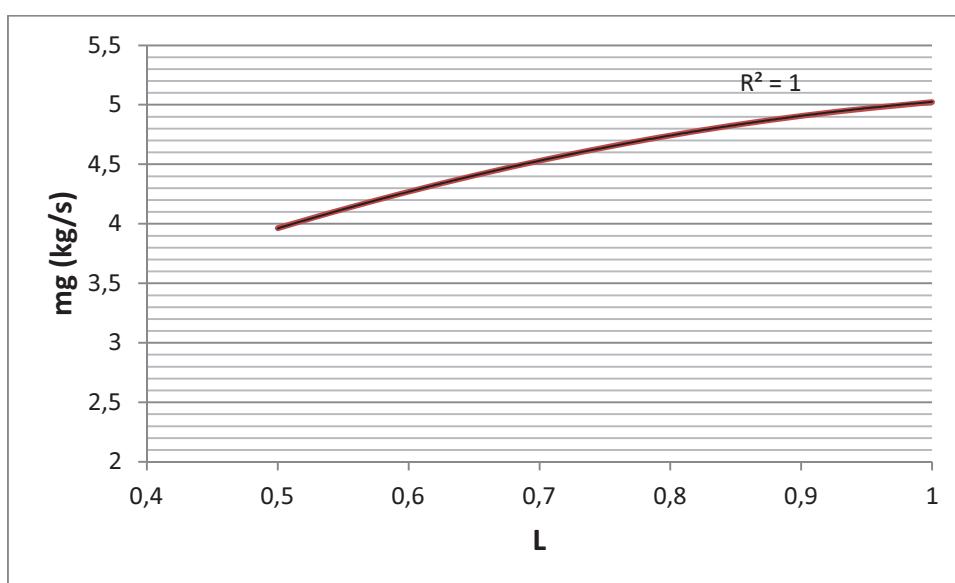


Figura 9: Curva de vazão mássica de gás de exaustão por carga do motor.



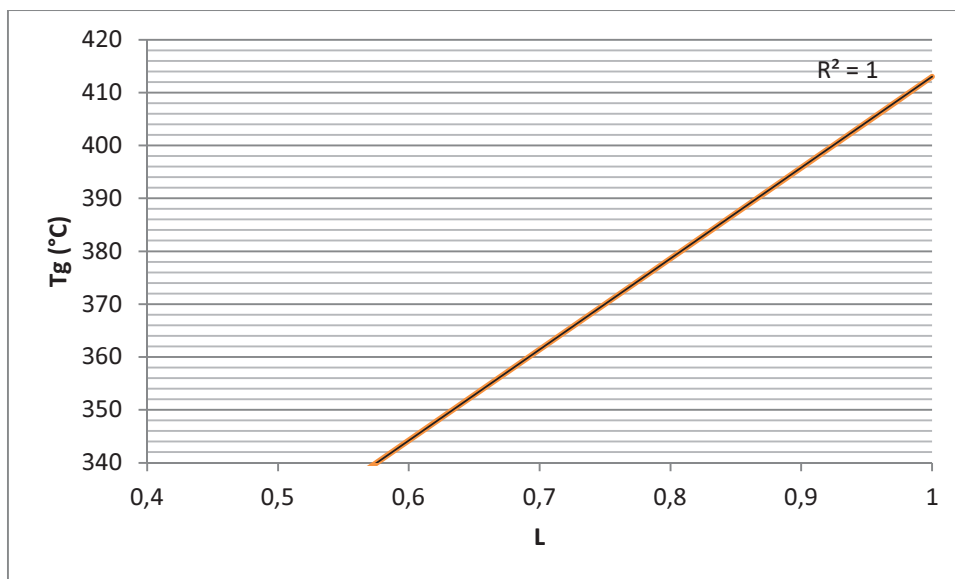


Figura 10: Curva de temperatura dos gases de exaustão por carga do motor.

As curvas das Figuras 8, 9 e 10 foram tratadas numericamente por meio de regressão linear e resultam nas Equações 3, 4 e 5.

$$\eta_{el} = -0,1112 \times L^2 + 0,2674 \times L + 0,2407 \quad (3)$$

$$\dot{m}_g = -2,387 \times L^2 + 5,705 \times L - 1,706 \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (4)$$

$$T_g = 172 \times L + 241 [^{\circ}C] \quad (5)$$

Com essas equações, é possível determinar o rendimento elétrico, a vazão e a temperatura do gás de exaustão para condições diferentes da nominal, ou seja, quando o motor está funcionando a carga parcial. As demais equações do modelo são apresentadas a seguir.

Propriedades do gás natural (Comgás, 2011):

$$PCI_v = 39348,4 \frac{kJ}{Nm^3} \quad (6)$$

$$\rho_{gn} = 0,76 \frac{kg}{Nm^3} \quad (7)$$

Potência nominal do motor, número de motores e carga:

$$\dot{W}_{el,nom} = 2435 \text{ kW} \quad (8)$$

$$N = 3 \quad (9)$$

$$L = 1 \quad (10)$$

Esses valores são para o dimensionamento do sistema na maior demanda térmica, ou seja, no maior consumo de vapor saturado. Nessa hora, o sistema irá operar a plena carga com três motores.

Desempenho dos N motores a carga parcial:

$$\dot{W}_{el} = N L \dot{W}_{el,nom} \text{ [kW]} \quad (11)$$

Consumo de energia térmica do sistema de cogeração:

$$\dot{Q}_c = \frac{\dot{W}_{el}}{\eta_{el}} \text{ [kW]} \quad (12)$$

$$\dot{v}_c = \frac{\dot{Q}_c}{PCI_v} \left[ \frac{m^3}{s} \right] \quad (13)$$

$$\dot{m}_c = \dot{v}_c \rho_{gn} \left[ \frac{kg}{s} \right] \quad (14)$$

Calor disponível nos gases de exaustão de um motor e na caldeira de recuperação:

$$\dot{Q}_g = \dot{m}_g 1,15 (T_g - T_{ch}) \text{ [kW]} \quad (15)$$

$$\dot{Q}_{cald} = N \dot{Q}_g \text{ [kW]} \quad (16)$$

Para um cálculo preliminar considera-se suficientemente preciso adotar o  $C_{p,g} = 1,15 \text{ kJ/kg K}$  (Balestieri, 2009)

Calor do gás de combustão no *pinch point*, Sendo  $T_{gp}$  a temperatura do gás nessa região e  $h_{l,sat} = 781,32 \text{ kJ/kg}$ .

$$\dot{Q}_{gp} = N \dot{m}_g 1,15 (T_g - T_{gp}) = \dot{m}_v (h_v - h_{l,sat}) \text{ [kW]} \quad (17)$$

Calor total transferido ao vapor, sendo  $h_l = 376,92 \text{ kJ/kg}$ .

$$\dot{Q}_{vap} = \dot{m}_v (h_v - h_l) \text{ [kW]} \quad (18)$$

O calor na caldeira de recuperação deve ser o mesmo que deve ser transferido para o vapor, para garantir a paridade térmica.

$$\dot{Q}_{cald} = \dot{Q}_{vap} [kW] \quad (19)$$

Pinch Point:

$$\Delta T_{pp} = T_{gp} - T_{sat} \quad (20)$$

sendo  $T_{sat}$  a temperatura de saturação do vapor a 1,1 MPa (184,09 °C).

Devido à complexidade dos cálculos e por apresentar diversas variáveis que não poderiam ser determinadas, utilizou-se o programa EES, Engineering Equation Solver, que é uma ferramenta de solução de equações, com uma interface muito simples e bem intuitiva. Como demonstrado na Figura 11, as equações para o problema em questão foram relacionadas na janela de equações, em linhas de programação específicos do software.

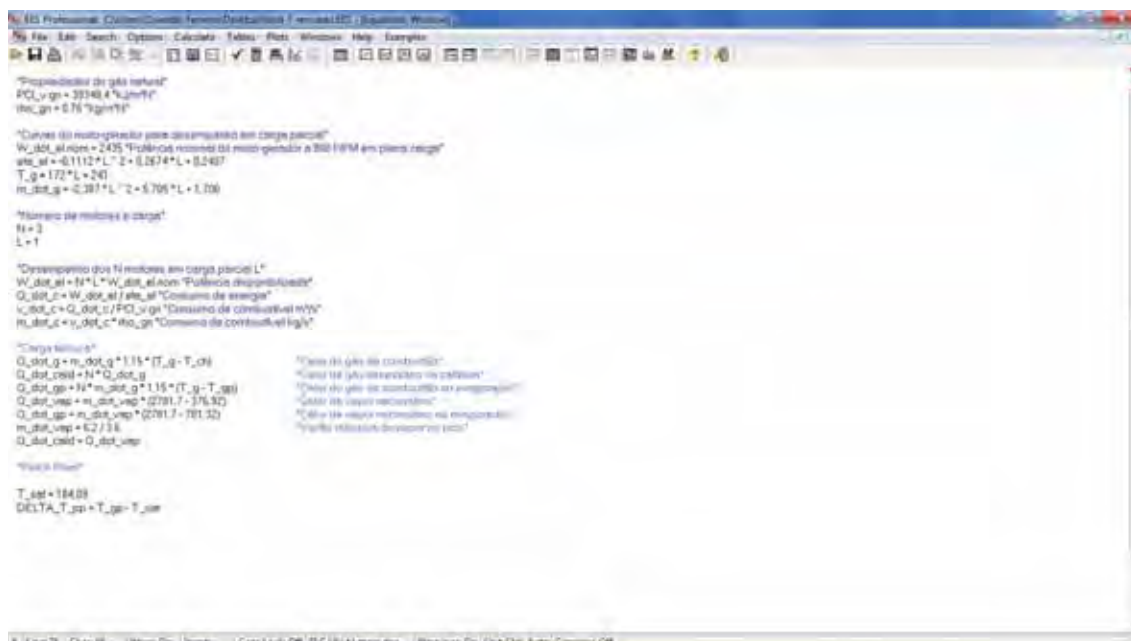


Figura 11: Modelo implementado no EES.

## 5 RESULTADOS

Para dimensionar o sistema de cogeração, deve-se verificar a temperatura de pinch point. Para isso, a ferramenta EES se mostrou mais uma vez necessária, pois foi possível, de maneira interativa, determinar o número de motores e sua carga para que o *pinch point* permanecesse dentro dos limites recomendados.

O sistema foi dimensionado para o pior caso possível, ou seja, para a maior demanda de vapor, que acontece às sete horas da manhã para um valor de 6,2 toneladas de vapor. Assim, o modelo apresentado na seção 4.2 foi simulado para esta condição.

Uma vez dimensionado, o sistema foi simulado para as outras horas do dia, sendo que dessa vez variou-se somente o números de motores e carga na qual eles operam além da demanda de vapor. A Tabela 1 mostra os resultados da simulação para todas as horas do dia.

Tabela 1: Resultados da simulação horária do sistema de cogeração.

| Horas | mv (ton) | Qv (kW)  | Qcald (kW) | N (motores) | L (carga) | $\Delta T_{pp}$ (°C) | Tch (°C) | Wnom gerada (kW) | Vcomb (m <sup>3</sup> ) |
|-------|----------|----------|------------|-------------|-----------|----------------------|----------|------------------|-------------------------|
| 1     | 4,10     | 2.738,78 | 2.739,00   | 2,00        | 1,00      | 31,75                | 176,00   | 4.870,00         | 1.122,48                |
| 2     | 4,00     | 2.671,98 | 2.762,00   | 2,00        | 0,97      | 30,25                | 175,20   | 4.724,00         | 1.092,96                |
| 3     | 3,90     | 2.605,18 | 2.605,00   | 2,00        | 0,95      | 30,79                | 176,60   | 4.627,00         | 1.073,16                |
| 4     | 4,00     | 2.671,98 | 2.762,00   | 2,00        | 0,97      | 30,25                | 175,20   | 4.724,00         | 1.092,96                |
| 5     | 4,00     | 2.671,98 | 2.762,00   | 2,00        | 0,97      | 30,25                | 175,20   | 4.724,00         | 1.092,96                |
| 6     | 4,80     | 3.206,37 | 3.206,00   | 3,00        | 0,80      | 31,49                | 182,60   | 5.844,00         | 1.394,28                |
| 7     | 6,20     | 4.141,57 | 4.142,00   | 3,00        | 1,00      | 30,15                | 174,10   | 7.305,00         | 1.683,72                |
| 8     | 5,70     | 3.807,57 | 3.808,00   | 3,00        | 0,92      | 29,09                | 175,60   | 6.721,00         | 1.566,36                |
| 9     | 5,60     | 3.740,77 | 3.741,00   | 3,00        | 0,91      | 30,14                | 177,20   | 6.648,00         | 1.551,60                |
| 10    | 5,20     | 3.473,57 | 3.474,00   | 3,00        | 0,85      | 29,73                | 178,80   | 6.209,00         | 1.465,56                |
| 11    | 4,70     | 3.139,57 | 3.140,00   | 3,00        | 0,78      | 30,13                | 181,70   | 5.698,00         | 1.366,20                |
| 12    | 4,10     | 2.738,78 | 2.739,00   | 2,00        | 1,00      | 31,75                | 176,00   | 4.870,00         | 1.122,48                |
| 13    | 5,10     | 3.406,77 | 3.407,00   | 3,00        | 0,84      | 30,76                | 180,40   | 6.136,00         | 1.451,16                |
| 14    | 5,70     | 3.807,57 | 3.808,00   | 3,00        | 0,92      | 29,09                | 175,60   | 6.721,00         | 1.566,36                |
| 15    | 5,00     | 3.339,97 | 3.340,00   | 3,00        | 0,82      | 29,44                | 179,50   | 5.990,00         | 1.422,72                |
| 16    | 5,70     | 3.807,57 | 3.808,00   | 3,00        | 0,92      | 29,09                | 175,60   | 6.721,00         | 1.566,36                |
| 17    | 5,10     | 3.406,77 | 3.407,00   | 3,00        | 0,84      | 30,76                | 180,40   | 6.136,00         | 1.451,16                |
| 18    | 5,00     | 3.339,97 | 3.340,00   | 3,00        | 0,82      | 29,44                | 179,50   | 5.990,00         | 1.422,72                |
| 19    | 5,00     | 3.339,97 | 3.340,00   | 3,00        | 0,82      | 29,44                | 179,50   | 5.990,00         | 1.422,72                |
| 20    | 5,00     | 3.339,97 | 3.340,00   | 3,00        | 0,82      | 29,44                | 179,50   | 5.990,00         | 1.422,72                |
| 21    | 4,20     | 2.805,58 | 2.806,00   | 3,00        | 1,00      | 26,94                | 170,20   | 4.870,00         | 1.122,48                |
| 22    | 5,00     | 3.339,97 | 3.340,00   | 3,00        | 0,82      | 29,44                | 179,50   | 5.990,00         | 1.422,72                |
| 23    | 5,00     | 3.339,97 | 3.340,00   | 3,00        | 0,82      | 29,44                | 179,50   | 5.990,00         | 1.422,72                |
| 24    | 4,80     | 3.206,37 | 3.206,00   | 3,00        | 0,80      | 31,49                | 182,60   | 5.844,00         | 1.394,28                |

Extrapolando-se o consumo de gás natural para um mês, tem-se aproximadamente um milhão de m<sup>3</sup> de combustível consumido. Esse valor entra na faixa da classe 5 de tarifação da Comgás, cogeração de energia elétrica destinado ao consumo próprio ou à venda ao consumidor final. No entanto, essa tarifação só é aplicável se os termos da Resolução 235/2006 da ANEEL são atendidos.

### 5.1. Resolução da ANEEL

A ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, tem como objetivo regular e fiscalizar a geração, a transmissão, a distribuição e a comercialização da energia elétrica, além de conceder, permitir e autorizar instalações e serviços de energia. Sua missão é proporcionar condições para o desenvolvimento do mercado de energia elétrica com equilíbrio entre os agentes e em benefício na sociedade. Para o caso específico de cogeração, criou a Resolução n° 235, de 14 de Novembro de 2006 (em anexo B), que visa implementar a política de incentivo ao uso racional de energia elétrica no país, além de incentivar e fiscalizar o uso da cogeração.

Segundo o artigo quarto da resolução, as centrais de cogeração devem atender os requisitos mínimos da racionalidade de energia, satisfazendo as inequações 21 e 22.

$$E_t \geq 0,15 \times E_c \quad (21)$$

$$\frac{E_e + \frac{E_t}{X}}{E_c} \geq F_c \quad (22)$$

Sendo:

$E_c$  é a energia disponibilizada pelo combustível nos últimos doze meses, em MWh, com base no PCI;

$E_e$  é a energia elétrica gerada nos últimos doze meses, em MWh;

$E_t$  é a energia térmica utilizada, proveniente da central de cogeração, nos últimos doze meses, em MWh;

$F_c$  Fator de cogeração;

X Fator de ponderação;

Os fatores  $F_c$  e X são aplicados em função da potência total instalada e do combustível utilizado, e são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Parâmetros X e  $F_c$  tabelados (ANEEL, 2006)

| Potência Instalada                          | Combustível Principal                       |       |               |       |
|---|---|-------|---------------|-------|
|   | Derivados de Petróleo, Gás Natural e Carvão |       | Demais Fontes |       |
|   | X   | $F_c$ | X             | $F_c$ |
| Inferior ou igual a 5 MW                    | 2,00  | 0,47  | 2,50          | 0,32  |
| Superior a 5 MW e inferior ou igual a 20 MW | 1,86  | 0,51  | 2,14          | 0,37  |
| Superior a 20 MW                            | 1,74  | 0,54  | 1,88          | 0,42  |

A partir dos dados constantes na Tabela 1, extrapola-se o volume de combustível para doze meses e multiplica-se pelo PCI fornecido pela Comgás, resultando em  $E_c = 128720$  MWh. Da Figura 6, temos os dados de demanda térmica por hora fornecida pela central de cogeração, que extrapolados para doze meses resulta em  $E_t = 28112$  MWh. Estes valores satisfazem a inequação 21.

Na planta proposta, são previstos três motores a gás natural com 2435 kW cada, totalizando total de 7305 kW de potência instalada. Assim, a planta se enquadra na faixa de 5 MW a 20 MW da tabela 2 da resolução da ANEEL. Dessa tabela,  $X = 1,86$  e  $F_c = 0,51$ . Da Tabela 1, extrapola-se o valor de energia elétrica gerada pela planta em dozes meses, resultando em  $E_e = 50160$  MWh. Desse modo, a inequação 22 também é satisfeita e a planta atende aos requisitos mínimos de racionalidade energética, sendo enquadrada na classificação de cogeração qualificada.

## 6 ANÁLISE ECONÔMICA

Neste capítulo é conduzida uma análise preliminar da viabilidade econômica da planta proposta, com base em alguns dados foram levantados na própria empresa. Na situação atual, a empresa é classificada na classe tarifária industrial 3 da Comgás e paga R\$ 0,94/m<sup>3</sup> de gás consumido mais um valor fixo mensal de R\$ 42.864,90. Há também uma despesa bastante expressiva de energia elétrica, que representa 54% do gasto total em insumos na planta. A Tabela 3 apresenta as despesas de gás natural e energia elétrica na situação atual da empresa.

Tabela 3: Principais insumos e seus gastos na planta.

| Insumo           | Unidade        | Consumo Anual | Custo unitário (R\$/un) | Despesa Anual | Percentual |
|------------------|----------------|---------------|-------------------------|---------------|------------|
| Energia Elétrica | MWh            | 190.730,00    | 171,43                  | 32.695.973,00 | 54%        |
| Gás Natural      | m <sup>3</sup> | 2.464.167,60  | 0,94                    | 2.978.535,60  | 5%         |

Considerando o sistema de cogeração, a tarifação da Comgás passara a ser de classe de cogeração 5 com um valor de R\$ 0,77/m<sup>3</sup>. O sistema passará a consumir mais combustível, mas também irá gerar energia elétrica, fazendo com que a empresa evite uma despesa significativa. Utilizando a tarifa da Comgás e o custo unitário de energia elétrica apresentado na Tabela 3 (custo unitário médio para o período de um ano), pode-se calcular as despesas da planta no período de um ano, que são mostradas na Tabela 4.

O custo para manutenção do motor foi disponibilizado pelo próprio fabricante em um valor de 1,91 USD/MWh e inclui trocas periódicas de óleo, velas, cabos e filtros, top-over ou top-end (remoção do cabeçote para verificação e reparos) a cada 16.000 horas de operação e over-haul (inspeção e reparo do motor) a cada 32.000 horas de operação.

Tabela 4: Despesas atuais e com cogeração.

| Situação Atual               |                      | Após o sistema de cogeração  |                      |
|------------------------------|----------------------|------------------------------|----------------------|
| Despesa de gás por ano (R\$) | 2.978.535,60         | Despesa de gás por ano (R\$) | 8.784.624,27         |
| Receita de EE gerada (R\$)   | -                    | Receita de EE gerada (R\$)   | 8.216.675,56         |
| Despesa de EE por ano (R\$)  | 32.695.973,00        | Despesa de EE por ano (R\$)  | 24.479.297,44        |
| Manutenção do motor (R\$)    | -                    | Manutenção do motor (R\$)    | 168.636,31           |
| <b>Despesa total (R\$)</b>   | <b>35.674.508,60</b> | <b>Despesa total (R\$)</b>   | <b>33.432.558,02</b> |

Os dados de receita de energia gerada no motor foram obtidos extrapolando-se os valores da tabela 1 e multiplicando pelo custo unitário médio de energia elétrica fornecido pela empresa, tabela 3. Novamente na tabela 1, extrapola-se o valor de combustível consumido pelo sistema e multiplica-se pelo valor cedido pela Comgás, dessa forma define-se a despesa total de gás natural por ano.

Na Tabela 4, pode-se observar que haverá uma receita devido à redução de despesas da ordem de 2,2 MR\$/ano, se utilizado o sistema de cogeração.

O investimento inicial é devido à aquisição de equipamentos e execução de obras civis, discriminados abaixo:

- Moto-gerador Waukesha 12V275GL+ com potência de 2435 kW: R\$ 1.364.679,00 por motor;
- Caldeira de recuperação com capacidade de 4142kW: R\$ 261.568,00;
- Obras civis: considera-se que representam 30% do total investido;
- Total: R\$ 5.662.287,00.

Diversos parâmetros para avaliação de atratividade de investimentos estão disponíveis. Um deles é o *payback* composto, que é o período no qual o dinheiro investido retorna ao investidor (Equação 23).

$$PBC = - \frac{\ln \left(1 - \frac{k \times P}{R}\right)}{\ln (1+k)} \quad (23)$$

No qual:

k é a taxa de juros de mercado, também pode ser considerado como a taxa mínima de atratividade, se comparada com a TIR, a qual a empresa considera 8% ao ano.

P é o valor do investimento inicial.



R é a receita anual gerada pelo investimento.

Tem-se então que o PBC é 2,93 anos. Outro parâmetro muito utilizado é a TIR (taxa de interna de retorno), definida como a taxa na qual o valor presente líquido é zero (Equação 24). A TIR é comparada com a taxa mínima de atratividade para se determinar a viabilidade do investimento.

$$VPL = \frac{F}{(1+TIR)^t} - P = 0 \quad (24)$$

No qual:

F é o valor futuro.

t é o tempo de investimento.

Resolvendo-se a Equação 24, obtem-se uma TIR de 9%, que está acima da TMA de 8% considerado pela empresa.

## 7 CONCLUSÃO

O objetivo deste trabalho de estudar o fornecimento de uma planta de cogeração a uma indústria automobilística obteve resultados bastante coerentes. O levantamento de dados iniciais permitiu, em conjunto com o software EES Professional, modelar matematicamente o problema e fazer a seleção do conjunto.

O motor escolhido foi o Waukesha 12V275GL+, pois apresenta um consumo específico de combustível favorável em relação à potência de eixo e ao calor dos gases de exaustão obtidos. De forma iterativa escolheu-se três motores deste modelo, de forma que fosse suprida toda a carga térmica necessária pela planta, ou seja, o sistema iria operar em paridade térmica. Com isso foram levantados dados de como o motor se comportaria em carga parcial. Verificou-se que cerca de 25% da energia elétrica consumida pela fábrica poderia ser gerada no motor e que este iria demandar cerca de um milhão de metros cúbicos de gás natural todos os meses.

A ANEEL exige que critérios mínimos de racionalidade energética sejam satisfeitas para que a o sistema seja reconhecido como cogeração qualificada, o que foi

atendido pela planta proposta. Com todos os custos levantados, foi feita uma análise econômica para verificar a viabilidade da planta de cogeração, sendo que o investimento foi avaliado pelos critérios de *payback* composto (PBC) e taxa interna de retorno (TIR).

A TIR, em particular, apresentou valores superiores à taxa mínima de atratividade (TMA) da empresa, o que é um bom indício de viabilidade, embora o *payback* seja considerado alto no segmento da indústria em questão. Finalmente, cumpre ressaltar o caráter preliminar da análise aqui proposta. Um projeto real de engenharia requer uma análise mais detalhada e cuidadosa antes de se tomar qualquer decisão de investimento.

## 8 BIBLIOGRAFIA

Balestieri, José. **Máquinas Térmicas**: material de apoio à disciplina. Guaratinguetá: Unesp, 2009.

Matelli, José. **Cogeração**: material de apoio à disciplina. Guaratinguetá: Unesp, 2011.  
Brasil, Newton. **Apostila de cogeração**. 2009.

Blas, Teresa. **Termodinámica**: segundo principio. Universidad Politécnica de Madrid (UPM) – España. Disponível em: <[http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/termo2p/termo2p\\_por\\_tada.html](http://acer.forestales.upm.es/basicas/udfisica/asignaturas/fisica/termo2p/termo2p_por_tada.html)>. Acesso em 14/10/2011.

Sun, Zhi-Gao. **Energy efficiency and economic feasibility analysis of cogeneration system driven by gas engine**. Engineering School, Sun Yat-Sen University, 2007

BADAMI, M. et.al. **Performance of an innovative 120 We natural gas cogeneration system**. Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino, 2005

ONIVWIONA, Hycienth; UGURSAL, Ismet; FUNG, Alan. **Modeling of internal combustion engine based cogeneration systems for residential applications**. Department of Mechanical Engineering, Dalhousie University, 2006.

ERBERELLI, Diego. **Estudo de implementação de planta de cogeração em planta automotiva**. Guaratinguetá: Unesp, 2009.

WYLEN, Van; SONNTAG, Richard; BORGNAKKE, Claus. **Fundamentos da termodinâmica**. Sexta Edição. Editora EDGARD BLUCHER LTDA. 577 p.

COMGÁS. **Comgás natural**: Natural na sua vida. Disponível em: <<http://www.comgas.com.br>>. Acesso em 25/10/2011.

ANEEL. **ANEEL**: Agência Nacional de Energia Elétrica. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em 25/10/2011.

Anexo A: Catálogo do motor Waukesha 12V275GL+

Anexo B: Resolução ANEEL

# Waukesha\* gas engines 275GL\* 12V 275GL +



#### Constant Torque Ratings

3625 bhp (2703 kWb) @ 1000 rpm  
3265 bhp (2435 kWb) @ 900 rpm  
2720 bhp (2028 kWb) @ 750 rpm

GE's Waukesha 275GL+ represents the most advanced generation of high-horsepower engines designed for optimum performance in gas compression and other mechanical drive applications. A unique combination of robust construction and innovative technology, the 275GL+ lean-burn engine delivers best-in-class fuel flexibility, efficiency, power output and emissions for unmatched performance.

The 275GL+ features Waukesha's ESM\* control, which integrates engine functionality into a single, closed-loop system with direct NO<sub>x</sub> measurement.

Key components such as the oil filters, oil cooler, pre-lube pump, and jacket water and auxiliary thermostats have been mounted on the engine, simplifying the packaging process and skid layout.

## technical data

|                              |                                |
|------------------------------|--------------------------------|
| Cylinders                    | V12                            |
| Piston displacement          | 13048 cu. in. (214 l)          |
| Compression Ratio            | 9:1                            |
| Bore & stroke                | 10.83" x 11.81" (275 x 300 mm) |
| Jacket water system capacity | 100 gal. (379 l)               |
| Lube oil capacity            | 220 gal. (883 l)               |
| Starting system              | 150 psi (10.3 bar)             |
| Fuel pressure                | 45 - 60 psi (3.1 - 4.1 bar)    |

#### Dimensions: x x w x h (inch / mm)

188.8 (4796) x 91.3 (2320) x 126.4" (3211)

#### Weights (lb / kg)

50,020 (22689)



imagination at work

\*Trademark of General Electric Company

## technical features

| Feature  | Description   | Advantages   |
|--|---|--|
| <b>Best-in-class fuel efficiency</b>             | Fuel efficiency advantage increases to over 3% at partial speeds and loads  | Minimize fuel costs and maximize profits across the entire range of speed and load combinations  |
| <b>Single, closed-loop engine control system</b> | Waukesha's proven ESM <sup>®</sup> control integrates the following into a single, closed-loop system: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Air/Fuel Ratio Control</li> <li>• Wastegate Control</li> <li>• Turbocharger Bypass Control</li> <li>• Ignition Timing</li> <li>• Knock Detection</li> <li>• Fault Monitoring</li> </ul> | Directly measures NO <sub>x</sub> emissions; adjusts operating parameters to prevent NO <sub>x</sub> emissions from exceeding 0.5 g/bhp-hr with no manual intervention or setup                  |
| <b>Best-in-class fuel flexibility</b>            | More power on more fuels, including full-load down to 600 Btu/B <sup>1</sup> and operation up to 2300 Btu/B <sup>1</sup>  | More power on more fuels means more profits without the additional costs associated with fuel treatment skids. The 275GL+ can achieve full load down to 60% methane and 70% load on pure ethane. |
| <b>Best-in-class emissions</b>                   | 0.5 g NO <sub>x</sub> emissions plus lower CO and NMHC emissions make it easier to meet current emission requirements   | Lower CO <sub>2</sub> and methane emissions provide a smaller carbon footprint and confidence you can meet future regulations today  |

## performance data

| Waukesha 275GL+ (Temperature 1000 (3000) °F) |   | 1.95 (1.95)   | 2.00 (2.00)   | 2.05 (2.05)   |
|--|---|---------------|---------------|---------------|
| Emissions                                    | Power bhp (kW)  | 3625 (2703)   | 3265 (2435)   | 2720 (2028)   |
|  | BSEC (L/H) (Btu/bhp-hr (kJ/kWh))  | 6519 (9251)   | 6412 (9071)   | 6265 (8865)   |
|  | NO <sub>x</sub> g/bhp-hr (mg/Nm <sup>3</sup> @ 5% O <sub>2</sub> )                  | 0.5 (230)     | 0.5 (230)     | 0.5 (230)     |
|  | CO g/bhp-hr (mg/Nm <sup>3</sup> @ 5% O <sub>2</sub> )                               | 1.7 (771)     | 1.6 (723)     | 1.4 (652)     |
|  | NMHC g/bhp-hr (mg/Nm <sup>3</sup> @ 5% O <sub>2</sub> )                             | 0.9 (413)     | 0.88 (406)    | 0.86 (396)    |
|  | THC g/bhp-hr (mg/Nm <sup>3</sup> @ 5% O <sub>2</sub> )                              | 6.0 (2754)    | 5.9 (2708)    | 5.7 (2642)    |
|  | Methane g/bhp-hr (mg/Nm <sup>3</sup> @ 5% O <sub>2</sub> )                          | 5.1 (2341)    | 5.02 (2302)   | 4.84 (2246)   |
|  | Formaldehyde g/bhp-hr (mg/Nm <sup>3</sup> @ 5% O <sub>2</sub> )                     | 0.18 (83)     | 0.18 (83)     | 0.18 (83)     |
|  | CO <sub>2</sub> g/bhp-hr (g/Nm <sup>3</sup> @ 5% O <sub>2</sub> )                   | 400 (184)     | 392 (180)     | 383 (176)     |
|  | CO <sub>2e</sub> (greenhouse gas) g/bhp-hr (g/Nm <sup>3</sup> @ 5% O <sub>2</sub> ) | 507 (233)     | 497 (228)     | 485 (223)     |
| Heat Balance                                 | Heat Rejection to Jacket Water (Btu/hr*1000 (kW))                                   | 2104 (617)    | 1899 (557)    | 1607 (471)    |
|  | Heat to Lube Oil (Btu/hr*1000 (kW))   | 905 (263)     | 772 (226)     | 680 (199)     |
|  | Heat Rejection to Intercooler (Btu/hr*1000 (kW))                                    | 2299 (673)    | 1999 (586)    | 1563 (458)    |
|  | Total Exhaust Heat (Btu/hr x 1000 (kW))   | 9232 (2703)   | 7972 (2335)   | 6221 (1822)   |
|  | Heat to Radiation (Btu/hr x 1000 (kW))  | 396 (116)     | 368 (114)     | 390 (111)     |
| Inlet/Exhaust System                         | Induction Air Flow SCFM (Nm <sup>3</sup> /hr)                                       | 9762 (15004)  | 9108 (13999)  | 8481 (13035)  |
|  | Exhaust Gas Flow Rate (lb/hr (kg/hr))   | 42725 (19585) | 39865 (18088) | 37117 (16841) |
|  | Exhaust Stack Temperature °F (°C)   | 628 (442)     | 776 (413)     | 663 (351)     |

All data according to full load and subject to technical development and modification.

Consult your local GE Energy representative for system application assistance. The manufacturer reserves the right to change or modify without notice the design or equipment specifications or herein set forth without incurring any obligation either with respect to equipment previously sold or in the process of construction except when otherwise specifically guaranteed by the manufacturer.



imagination at work

GE Energy  
1301 West Saint Paul Ave.  
Waukesha, WI 53186-4999  
P: 262.547.3311  
F: 262.549.2739

Visit us online at:  
[www.waukeshaengine.com](http://www.waukeshaengine.com)

©2011 General Electric Company  
All Rights Reserved

1294 0711 12-16-10880

\*Trademark of General Electric Company

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL

RESOLUÇÃO Nº 21, DE 21 DE JANEIRO DE 2000.

Estabelece os requisitos necessários à qualificação de centrais cogedoras de energia e dá outras providências.

(\*) Vide alterações e inclusões no final do texto

O DIRETOR-GERAL DA AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL, no uso de suas atribuições regimentais, de acordo com deliberação da Diretoria, tendo em vista o disposto nos incisos I, IV, IX e XXXI do art. 4º do Anexo I do Decreto nº 2.335, de 6 de outubro de 1997, nos incisos II, IV e VIII do art. 1º e no inciso I do art. 2º da Lei 9.478, de 6 de agosto de 1997, e considerando:

a necessidade de implementar políticas de incentivo ao uso racional dos recursos energéticos do País;

que a atividade de cogeração de energia elétrica contribui com a racionalidade energética, uma vez que possibilita um melhor aproveitamento dos combustíveis, apresentando menor consumo total, quando comparada à geração individual de calor e energia elétrica e gerando conseqüentes benefícios para a sociedade, resolve:

Art. 1º Estabelecer os requisitos necessários à obtenção de qualificação, junto à Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, de centrais cogedoras de energia, para fins de participação das políticas de incentivo a cogeração.

Art. 2º O disposto nesta Resolução aplica-se a:

I - pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que produzam ou venham a produzir energia elétrica destinada à serviço público ou à produção independente;

II - pessoa física, pessoa jurídica ou empresas reunidas em consórcio que produzam ou venham a produzir energia elétrica destinada ao seu uso exclusivo;

Art. 3º A cogeração de energia é definida como o processo de produção combinada de calor útil e energia mecânica, geralmente convertida total ou parcialmente em energia elétrica, a partir da energia química disponibilizada por um ou mais combustíveis.

Art. 4º As centrais de cogeração, para fins de enquadramento na modalidade de "cogeração qualificada" deverão satisfazer aos seguintes requisitos:

I - estar regularizadas perante a Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL, atendendo ao disposto na Resolução ANEEL nº 112, de 18 de maio de 1999 e legislação específica.

II - atender aos requisitos mínimos de racionalidade energética, mediante o cumprimento das inequações, abaixo:

$$Et \geq 0,15 Ec$$

$$\frac{Ee + Et/X}{Ec} \geq Fc$$

Onde:

Ec Energia disponibilizada pelo combustível ou combustíveis nos últimos doze meses, calculada em MWh, com base no poder calorífico inferior dos combustíveis utilizados;

Ee Energia eletromecânica, resultante do somatório de trabalho e energia elétrica gerados nos últimos doze meses, em MWh;

Et Energia térmica utilizada, proveniente da central de cogeração, resultante do somatório do calor efetivamente consumido nos últimos doze meses, em MWh;

Fc Fator de cogeração;

X Fator de ponderação;

§ 1º Os valores de X e Fc referidos na fórmula contida no inciso II serão aplicados em função da potência elétrica instalada na central de cogeração e do combustível principal, conforme tabela abaixo:

| Potência Instalada                          | Combustível Principal                       |      |               |      |
|---|---|------|---------------|------|
|   | Derivados de Petróleo, Gás Natural e Carvão |      | Demais Fontes |      |
|   | X   | Fc   | X             | Fc   |
| Inferior ou igual a 5 MW                    | 2,00  | 0,47 | 2,50          | 0,32 |
| Superior a 5 MW e inferior ou igual a 20 MW | 1,86  | 0,51 | 2,14          | 0,37 |
| Superior a 20 MW                            | 1,74  | 0,54 | 1,88          | 0,42 |

§ 2º Para fins de determinação dos valores de X e Fc, contidos na tabela de que trata o parágrafo anterior, nos casos de queima alternada ou mesclada de diferentes combustíveis, entende-se por combustível principal oriundo de "Demais Fontes", quando a energia disponibilizada por derivados de petróleo, gás natural ou carvão mineral não exceder a vinte e cinco por cento da energia disponibilizada por todos os combustíveis consumidos, calculada com base no poder calorífico inferior desses combustíveis.

§ 3º A qualificação de central de cogeração deverá ser solicitada à ANEEL, mediante requerimento, conforme modelo anexo, acompanhado de relatório contendo os seguintes requisitos:

a) declaração e demonstrativo dos requisitos solicitados no inciso II do "caput" deste artigo;

b) finalidade (s) a que se destina a energia térmica gerada;

c) balanço energético da planta para as principais condições de operação da central, explicitando a potência elétrica total gerada, potência mecânica, potência térmica utilizada e a potência disponibilizada pelo combustível, apresentado em forma de diagrama que indique os respectivos fluxos de massa e energia.

Art. 5º A não apresentação das informações e documentos referidos no art. 4º desta Resolução, acarretará a interrupção do prazo para análise do respectivo requerimento até o integral cumprimento de todas as exigências.



Art. 6º Por um período transitório de 24 meses, contados a partir da data de publicação desta Resolução, os requisitos de racionalidade energética definidos no inciso II do art. 4º poderão limitar-se à exigência de que a energia térmica utilizada, acumulada para os últimos doze meses, seja igual ou superior a quinze por cento da energia disponibilizada pelo combustível ou combustíveis no mesmo período, e nesses casos a qualificação será necessariamente temporária, limitada à data de término deste período transitório.

Art. 7º As instalações de cogeração que não possuem condições de fornecer as informações energéticas dos últimos doze meses, mencionados no art. 4º ou no art. 6º desta Resolução, poderão efetuar o requerimento de qualificação, baseando-se nos dados nominais de seus equipamentos e no planejamento anual de operação da central.

Parágrafo único. Estas centrais cogedoras poderão ser qualificadas em regime precário por um período máximo de até 18 meses, não renovável.

Art. 8º Deverão ser informadas à ANEEL as alterações superiores a cinco por cento dos dados apresentados nos termos dos art. 4º ou 6º desta Resolução, para qualificação da central cogedora.

Parágrafo único. A área de fiscalização da ANEEL efetuará, a seu critério, inspeções nas centrais cogedoras, a fim de avaliar a conformidade das informações prestadas para a qualificação, sujeitando o agente ao cancelamento da qualificação da central, assim como as penalidades previstas na Resolução ANEEL nº 318, de 06 de outubro de 1998 e legislação específica.

Art. 9º A ANEEL poderá solicitar outros dados e informações adicionais ou a complementação daqueles já apresentados, para melhor instrução e análise do requerimento de qualificação da central cogedora.

Art. 10. Esta Resolução entra em vigor na data de sua publicação.

OSÉ MÁRIO MIRANDA ABDO

Este texto não substitui o publicado no D.O. de 24.01.2000, seção 1, p. 36, v. 138, n. 16.

(\*) Revogada pela REN ANEEL 235 de 14.11.2006, D.O. de 22.11.2006, seção 1, p. 78, v. 143, n. 223.

Endereço: SGAN 603 Módulo H1, Anápolis, DF CEP 70.830-030, Brasília/DF Tel.: (61) 312-5750 Fax: (61) 312-5777

1. IDENTIFICAÇÃO DO EMPREENDIMENTO

|                                |                |                 |              |
|--------------------------------|----------------|-----------------|--------------|
| DENOMINAÇÃO DO EMPREENDIMENTO: |                |                 |              |
| PROPRIETÁRIO:                  |                |                 |              |
| ENDEREÇO DO PROPRIETÁRIO:      |                |                 |              |
| DISTRITO:                      |                | MUNICÍPIO:      |              |
| ESTADO:                        |                | ESTADO:         |              |
| CNPJ/CPF:                      | TEL.: ( )      | FAX.: ( )       | E-mail:      |
| PRODUTOS INDUSTRIAIS           | PRINCIPAL..... | SECUNDÁRIO..... | TERCIÁRIO... |
| PRODUÇÃO ANUAL (t, m3, etc...) | .....          | .....           | .....        |

2. LOCALIZAÇÃO DO EMPREENDIMENTO

|                         |  |                                   |
|-------------------------|--|-----------------------------------|
| ENDEREÇO:               |  |                                   |
| DISTRITO:               | MUNICÍPIO:                             | ESTADO:                           |
| TEL.: ( )               | FAX.: ( )                              | Correio Eletrônico:               |
| COORDENADAS GEOGRÁFICAS | LATITUDE:                              | LONGITUDE:                        |
| ALTITUDE (m):           | Temperatura Ambiente Média Anual (OC): | Umidade Relativa Média Anual (%): |

3. CENTRAL COGERADORA

|                                   |  |
|-----------------------------------|--|
| Potência Elétrica Instalada (kW): | Consumo interno anual de energia elétrica (MWh): |
| No de Unidades Geradoras:         | Fator de Disponibilidade:                        |

COMBUSTÍVEIS CONSUMIDOS

| COMBUSTÍVEL  | CONSUMO NOMINAL (kg / dia) | PODER CALORÍFICO INFERIOR (kJ/kg) |
|--------------|----------------------------|-----------------------------------|
| Principal    |                            |                                   |
| Secundário 1 |                            |                                   |
| Secundário 2 |                            |                                   |

GERADORES ELÉTRICOS

| GERADORES | Potência Nominal (kVA) | Tensão Nominal (kV) | Fator de Potência Nominal (%) |
|-----------|------------------------|---------------------|-------------------------------|
| 01        |                        |                     |                               |
| 02        |                        |                     |                               |
| (1)       |                        |                     |                               |

EQUIPAMENTOS FORNECENDO DIRETAMENTE TRABALHO MECÂNICO (SOPRADORES, MOENDAS, ETC)

| EQUIPAMENTO MOTRIZ | Tipo (a vapor, gás, ...) | Potência (kW) | Rotação (rpm) | Destino (soprador, moenda, ...) | Consumo Específico □ (—/kWh) |
|--------------------|--------------------------|---------------|---------------|---------------------------------|------------------------------|
| 01                 |                          |               |               |                                 |                              |
| 02                 |                          |               |               |                                 |                              |
| (1)                |                          |               |               |                                 |                              |

**MISTURADORES DE VAPOR (DESTINADO AO PROCESSO INDUSTRIAL)**

| MISTURADORES | Tipo | Destino | Consumo de vapor (t/h) | Pressão do vapor (bar) | Temperatura do vapor (°C) |
|--------------|------|---------|------------------------|------------------------|---------------------------|
| 01           |      |         |                        |                        |                           |
| 02           |      |         |                        |                        |                           |
| (1)          |      |         |                        |                        |                           |

**FORNOS (GASES QUENTES)**

| FORNOS | Gás (Ar, produtos da combustão, ...) | Destino | Vazão de gás quente (t/h) | Temperatura de entrada do gás (°C) | Temperatura de saída do gás (°C) |
|--------|--------------------------------------|---------|---------------------------|------------------------------------|----------------------------------|
| 01     |                                      |         |                           |                                    |                                  |
| 02     |                                      |         |                           |                                    |                                  |
| (1)    |                                      |         |                           |                                    |                                  |

**TROCADORES DE CALOR (DESTINADO AO PROCESSO INDUSTRIAL)**

| TROCADORES | Tipo | Destino | Fluido primário | Pressão do vapor (bar) | Temperatura do vapor (°C) |
|------------|------|---------|-----------------|------------------------|---------------------------|
| 01         |      |         |                 |                        |                           |
| 02         |      |         |                 |                        |                           |
| (1)        |      |         |                 |                        |                           |

RESPONSÁVEL TÉCNICO PELAS INFORMAÇÕES:

NOME:

CARGO / CREA:

LOCAL:

DATA:

ASSINATURA:

(1) NÃO SENDO OS ESPAÇOS SUFICIENTES PARA ENTRADA DE TODOS OS DADOS (OU DADOS ESPECÍFICOS DE UM DETERMINADO EQUIPAMENTO), FAVOR AMPLIÁ-LOS ADEQUADAMENTE. (Incluir linhas onde necessário)