

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA DA USP

RAFAEL ROVAI GIGLIO DE SOUZA

**Estudo de viabilidade técnica e econômica de uma solução pronta de
cogeração**

São Paulo
2019

RAFAEL ROVAI GIGLIO DE SOUZA

**Estudo de viabilidade técnica e econômica de uma solução pronta de
cogeração**

Monografia apresentada ao PECE - Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

São Paulo
2019

RAFAEL ROVAI GIGLIO DE SOUZA

**Estudo de viabilidade técnica e econômica de uma solução pronta de
cogeração**

Monografia apresentada ao PECE - Programa de Educação Continuada da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética.

Área de concentração: cogeração de energia, eficiência energética, geração distribuída, gás natural.

Orientador: Prof. Msc. Ronaldo Andreos

São Paulo
2019

Souza, Rafael Rovai Giglio de

Estudo da viabilidade técnica e econômica de uma solução pronta de cogeração / Souza, Rafael Rovai Giglio de. – São Paulo, 2019

Monografia (Especialização em Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Programa de Educação Continuada em Engenharia.

1.Cogeração de energia 2.Gás Natural 3.CHP 4.Eficiência energética I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. PECE – Programa de Educação Continuada em Engenharia II.t.

Dedico este trabalho aos meus pais, Paulo Cesar
Giglio de Souza e Paula de Cassia Rovai de Souza.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais, não apenas pela base, pelos conselhos e pelo apoio, mas também pelo exemplo.

Agradeço ao meu irmão, Henrique Rovai Giglio de Souza pelo companheirismo e pela confiança.

Agradeço aos amigos que fiz graças a este curso, pelo apoio e paciência em todos os momentos desta jornada.

Ao meu amigo e colega de profissão Thiago José Martinelli, pelos ensinamentos e pelo incentivo a sempre continuar aprendendo.

Ao Prof. Msc. Ronaldo Andreos, pela orientação e pelos ensinamentos.

RESUMO

Esta monografia tem como objetivo fazer o estudo da viabilidade técnica e econômica de um projeto de cogeração utilizando uma solução pronta de cogeração. Esta solução tem a capacidade de geração de energia elétrica, água quente e vapor, utilizando um motor a gás natural. Neste caso, os valores da demanda da indústria estudada são grandezas típicas de indústrias químicas.

Nos primeiros capítulos, é apresentada uma introdução à cogeração e aos objetivos deste trabalho, além dos motivos que levaram ao desenvolvimento do mesmo. Serão discutidos também os conceitos de cogeração, seus tipos de dimensionamento e quais as configurações e tecnologias utilizadas atualmente, com exemplos reais de diferentes aplicações. Nos capítulos finais, após apresentadas as principais características do equipamento a ser avaliado, inicia-se o estudo de caso.

Com base nos resultados do estudo de caso, são discutidas as melhores alternativas, não apenas para o setor estudado, mas também para os demais setores da indústria.

Palavras-chave: Cogeração, CHP, gás natural, geração de energia.

ABSTRACT

This work aims to study the technical and economic feasibility of a cogeneration project using a “plug and play” cogeneration solution. This solution has the capacity to generate electricity, hot water and steam using a natural gas internal combustion engine. In this case, the demand values are typical from a chemical industry.

In the first chapters, an introduction to cogeneration and the objectives of this work is presented, as well as the reasons that led to its development. The concepts of cogeneration, their types of design and what configurations and technologies are used today are also discussed, with real examples of different applications. In the final chapters, after presenting the main characteristics of the equipment to be evaluated, the study in subject is started.

Based on the study results, the best alternatives are discussed, not only for the mentioned sector, but also for the other sectors of the industry.

Keywords: Cogeneration, CHP, natural gas, combined heat and power, energy generation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores F_c % e X (Andreos, 2013)	27
Tabela 2 - Dados de catálogo da solução a ser estudada (Catálogo..., 2019).....	36
Tabela 3 – Cálculo do custo de E.E. na operação atual (autor)	41
Tabela 4 – Cálculo do custo com G.N. na operação atual (autor).....	42
Tabela 5 – Custo com a cogeração – solução pronta (autor).....	43
Tabela 6 – Custo do G.N. para queima direta – solução pronta (autor)	43
Tabela 7 – Custo da E.E. comprada da rede – solução pronta (autor)	44
Tabela 8 – Investimento inicial – solução pronta (Acervo pessoal)	44
Tabela 9 – Salto entálpico (Andreos, 2018)	46
Tabela 10 – Capacidade de geração de vapor – solução customizada (autor).....	48
Tabela 11 – Custo operacional da cogeração – solução customizada (autor)	49
Tabela 12 - Custo do G.N. para queima direta – solução customizada (autor).....	49
Tabela 13 – Custo da E.E. comprada da rede – solução customizada (autor)	49
Tabela 14 - Investimento inicial – solução customizada (Andreos, 2018)	50

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Balanço energético de geração simples de energia (adaptado de Moreira, 2017)	23
Figura 2 - Balanço energético com cogeração de energia (Adaptado de Moreira, 2017)	23
Figura 3 - Exemplo de dimensionamento topping cycle (adaptado de Mitsubishi..., 2016)	25
Figura 4 - Exemplo de dimensionamento bottoming cycle (autor, 2019).....	25
Figura 5 - Possibilidades da cogeração (Mitsubishi..., 2016)	30
Figura 6 - Exemplo de uma planta de cogeração (Mitsubishi..., 2016).....	31
Figura 7 - Primeira proposta de cogeração (Mitsubishi..., 2016)	31
Figura 8 - Segunda proposta de cogeração (Mitsubishi..., 2016)	32
Figura 9 - Cogeração com fornecimento de energia elétrica e água gelada (Mitsubishi..., 2016)	33
Figura 10 - Cogeração com fornecimento de energia elétrica e água quente (Mitsubishi..., 2016)	34
Figura 11 - Planta de cogeração com flexibilidade (Mitsubishi..., 2016).....	35
Figura 12 - Layout interno do container de 40 pés (Mitsubishi..., 2016)	37
Figura 13 - Esquema simplificado dos containers de geração e cogeração (Catálogo..., 2019)	37
Figura 14 - Transporte da solução completa (Mitsubishi..., 2016).....	38
Figura 15 - Preparação da fundação (Acervo pessoal)	38
Figura 16 - Preparação da base (Acervo pessoal)	39
Figura 17 - Entrega do equipamento (Acervo pessoal)	39
Figura 18 - Layout de planta com 5 unidades de cogeração (Mitsubishi..., 2016).....	39
Figura 19 - Wärtsilä 20V31SG (Wärtsilä, 2019)	54
Figura 20 – Ciclo Rankine Orgânico (Turboden, 2019)	56
Figura 21 – Turbina a gás da Solar Turbines (Solar Turbines, 2019).....	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Demanda média anual de carga elétrica (autor).....	40
Gráfico 2 – Gráfico da demanda média anual de vapor (autor).....	40

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações

CHP	Combined Heat and Power
kW	Quilowatt
FUE	Fator de Utilização de Energia
W	Trabalho
Qu	Calor útil
m	massa
$\dot{W}$	Trabalho por unidade de tempo ou Energia mecânica
$\dot{Q}$	Fluxo de calor
$\dot{m}$	Fluxo de massa
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
PCI	Poder Calorífico Inferior
T.V.	Turbina a vapor
T.G.	Turbina a gás
GN	Gás natural
Et	Energia térmica
Ef	Energia da fonte
Ee	Energia elétrica
E.E.	Energia elétrica
A.Q.	Água quente
A.G.	Água gelada
X	Fator de Ponderação
Fc %	Fator de cogeração
kWh/h	Quilowatt hora por hora
MCI	Motor de combustão interna

kWe	Quilowatt elétrico
kWth	Quilowatt térmico (Thermal)
t/h	Tonelada (s) por hora
ton	Tonelada (s)
Nm ³ /h	Normal metro cúbico por hora
TR	Toneladas de refrigeração
m ³ /h	Metros cúbicos por hora
MW	Megawatt
MWe	Megawatt elétrico
Hz	Hertz
V	Volts
°C	Graus célsius
MPa	Megapascal
kg/h	Quilograma por hora
rpm	Revoluções por minuto
MWh	Megawatt hora
R\$	Reais
ORC	Ciclo Rankine Orgânico (Organic Rankine Cycle)
ABEGÁS	Associação Brasileira das Empresas Distribuidoras de Gás Canalizado

SUMÁRIO

1	Introdução	20
1.1	Objetivos	20
1.2	Motivação	20
2	Estado da arte	22
2.1	Conceito de cogeração	22
2.1.1	Fator de Utilização de Energia	24
2.1.2	Dimensionamento da Cogeração	24
2.1.3	Qualificação da Cogeração	26
2.1.4	Vantagens das plantas de geração de energia a gás natural	27
2.2	Configurações e possibilidades	28
2.3	Exemplos de plantas de cogeração	31
2.3.1	Energia elétrica, água gelada, vapor e aquecimento de óleo	31
2.3.2	Energia elétrica e água gelada	33
2.3.3	Energia elétrica e água quente	34
2.3.4	Planta com geração “multipropósito”	34
3	Estudo de caso	36
3.1	Solução a ser estudada	36
3.2	Demanda	40
3.2.1	Demanda elétrica	40
3.2.2	Demanda térmica	40
3.3	Cálculos com a solução proposta	41
3.3.1	Cálculo do custo da operação atual	41
3.3.2	Cálculo do custo da operação com cogeração	42
3.3.3	Qualificação da cogeração	44

3.4	Cálculos com solução customizada	47
3.4.1	Custo da operação com solução customizada	48
3.4.2	Qualificação da cogeração – solução customizada	50
4	Conclusões	52
4.1	Motivos que levaram ao resultado encontrado.....	52
4.1.1	Tipo de demanda.....	52
4.1.2	Tipo de dimensionamento	53
4.1.3	Solução ideal utilizando MCI para este cliente	53
4.1.4	Cliente ideal para a solução pronta	54
4.2	Alternativas	55
4.2.1	Bottoming cycle	55
4.2.2	Topping cycle.....	56
4.2.3	Considerações finais	58

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos

Analisar a viabilidade técnica e econômica de uma solução pronta de cogeração (ou CHP – *Combined Heat and Power*). O objeto deste estudo resume-se em um container de 40 pés com um grupo motogerador a gás de 1200 kW de potência elétrica e um container separado de 20 pés, que será chamado aqui de unidade de cogeração, e possui os equipamentos necessários para geração de água quente e vapor.

Após realizados os cálculos referentes a esta solução, será brevemente estudada também uma solução de cogeração customizada para o cliente, levando em conta suas necessidades a título de comparação.

Além disso, tem-se também como objetivo, apresentar os conceitos de cogeração e as configurações que são aplicadas atualmente no mercado. No próximo capítulo serão apresentadas uma série de possíveis soluções, de forma que se possa ter uma ideia de quão amplo é o mercado da cogeração.

1.2 Motivação

A grande motivação para falar sobre cogeração, é o fato de enxergá-la como uma alternativa bastante eficaz para aumento da eficiência energética de empreendimentos em geral e para ir de encontro às tendências ambientais, utilizando combustíveis menos poluentes e com menor impacto ambiental. Além disso, a cogeração também permite uma operação mais segura, podendo trabalhar em paralelo com a rede.

Dentro da cogeração, optou-se pelo estudo das soluções prontas. A cogeração engloba uma ampla gama de equipamentos e configurações. Dentre estes equipamentos, pode-se citar como exemplos motores e turbinas a gás das mais variadas características e eficiências, caldeiras, bombas de calor, chillers, etc. Não é apenas este motivo que torna cada projeto de cogeração muito singular, mas também a questão de existirem diversos tipos de potenciais clientes, como edifícios comerciais, shopping centers, hospitais, universidades, hotéis, indústrias, centros industriais, áreas isoladas, dentre outros, cada um com suas necessidades e

demandas particulares de energia elétrica e térmica, seja esta em forma de água quente, água gelada ou vapor (Balestieri, 2002). Este fato desperta a curiosidade de estudar o comportamento de soluções prontas em um ambiente tão variado e flexível.

Além disso, a solução estudada é de fabricação japonesa e não vem apresentando boa aceitação no mercado. Sendo assim, este trabalho deve mostrar quão relevante é o desenvolvimento de projetos específicos para cada cliente, ou se estas soluções prontas que estão aparecendo no mercado podem se tornar uma tendência no futuro.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Conceito de cogeração

Segundo Balestieri (2002), a cogeração corresponde à produção de diferentes formas de energia útil, como as energias eletromecânica e térmica, para suprir as necessidades de uma unidade de processo, seja ela do setor industrial, agrícola, terciário ou um sistema isolado, a partir de uma mesma fonte energética primária. Em outras palavras, é o aproveitamento de parte da energia que seria rejeitada, de acordo com a Segunda Lei da Termodinâmica, resultando no aumento do rendimento global do ciclo térmico. Esta fonte energética primária pode ser óleo, gás natural, carvão, biogás, dentre outros, porém o combustível mais utilizado atualmente para cogeração é o gás natural.

Além de menos poluente se comparado ao óleo diesel, o gás natural permite um funcionamento contínuo do grupo gerador, sem necessidade de pensar em uma logística de combustível, já que chega ao equipamento através dos gasodutos (COMGÁS, 2019). Por outro lado, a utilização de grupos geradores a gás em regiões afastadas dos gasodutos torna-se um grande desafio, já que envolve uma logística muito mais complexa do que a dos combustíveis líquidos.

As máquinas térmicas transformam a energia química de um combustível em energia mecânica ou térmica. Sabe-se que toda máquina térmica apresenta um valor de eficiência que é representado pela energia desejada que é obtida dividida pela energia interna do combustível gasto (Andreos, 2013). Portanto, para obter a eficiência elétrica de um grupo gerador, divide-se a energia elétrica gerada pela energia interna do combustível gasto para gerar esta quantidade de energia (massa de combustível multiplicada pelo seu poder calorífico inferior). Segundo Machado (2015), nas plantas termelétricas convencionais, em média um terço da energia do combustível é convertida em energia elétrica, sendo o restante perdido em forma de calor. Nos sistemas de cogeração, as perdas podem ser reduzidas para até 15%.

Tomando o motor a combustão interna como exemplo, existem no mercado motores de 28 a 49% de eficiência. No caso de motores a gás natural de média rotação, a grande maioria está na faixa dos 32 a 43% de eficiência. Portanto, grande parte da energia gasta num motor é perdida na forma de calor. A figura 1 mostra o balanço energético de um grupo gerador com 35% de eficiência elétrica:

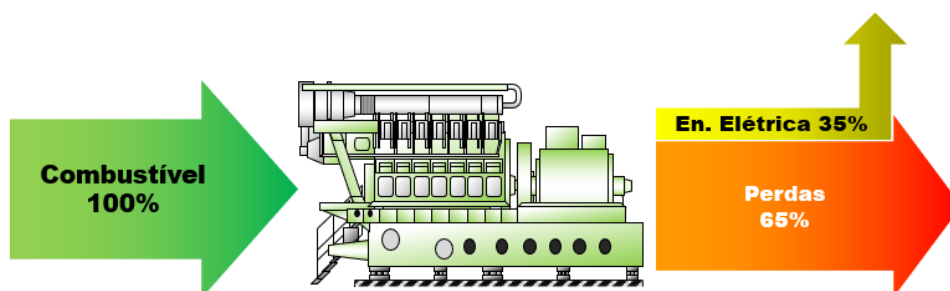


Figura 1 - Balanço energético de geração simples de energia (adaptado de Moreira, 2017)

A figura 1 mostra uma solução convencional para geração de energia utilizando um grupo motogerador a gás natural, que consiste de um motor a combustão interna (MCI) acoplado a um alternador. A ideia da cogeração é aproveitar este calor que seria perdido e utiliza-lo para outros fins.

O objetivo principal da cogeração é obter o máximo aproveitamento da energia contida na fonte primária, de forma a utilizar o combustível de maneira mais eficiente e racional possível (Andreos, 2013).

Segundo Martens (1998), num sistema com cogeração, pode-se atingir eficiências globais da ordem de 85%, dependendo da configuração. A figura 2 mostra o balanço energético da figura 1, porém, agora considerando equipamentos para cogeração, resultando num rendimento global de 85%:

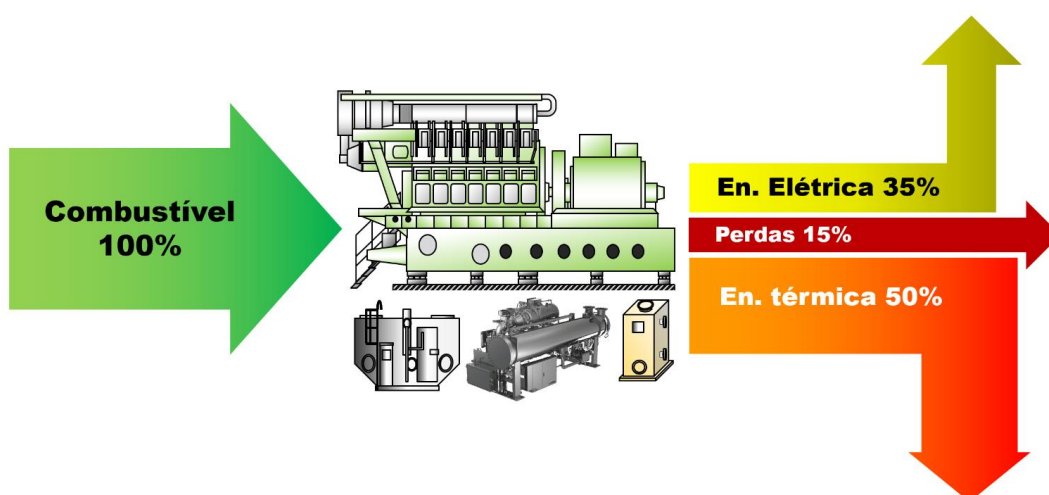


Figura 2 - Balanço energético com cogeração de energia (Adaptado de Moreira, 2017)

2.1.1 Fator de Utilização de Energia

Como na cogeração, tem-se como objetivo não apenas a obtenção da energia eletromecânica, mas também da energia térmica, utiliza-se o fator de utilização de energia (FUE) para definir a eficiência do projeto (Moreira, 2017):

$$FUE = \frac{\dot{W} + \dot{Q}_u}{\dot{m} \times PCI} \quad (2.1)$$

Onde:

$\dot{W}$: Potência de eixo produzida pela máquina (kW)

$\dot{Q}_u$: Taxa de calor útil produzido ou recuperado (kW)

PCI : Poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg)

$\dot{m}$: vazão de massa de combustível (kg/s)

Portanto, pode-se dizer que o balanço energético apresentado na figura 1 possui FUE de 35%, enquanto na figura 2, o FUE equivale a 85%.

2.1.2 Dimensionamento da Cogeração

Como mencionado anteriormente, os usuários finais dos projetos de cogeração são muito diversos e apresentam demandas ainda mais diversas. O dimensionamento da planta de cogeração sempre deverá ser feito de forma a ajustar-se adequadamente a cada tipo de demanda.

Basicamente, são dois os tipos de dimensionamento de projetos de cogeração, o dimensionamento chamado *topping cycle* e o *bottoming cycle*. A cogeração *topping cycle* considera a energia elétrica como a geração principal, em outras palavras, o combustível primário é utilizado para gerar energia elétrica e parte do calor que seria perdido no processo é aproveitado para gerar energia térmica (Moreira et al., 2017). A figura a seguir mostra um exemplo típico deste tipo de dimensionamento.

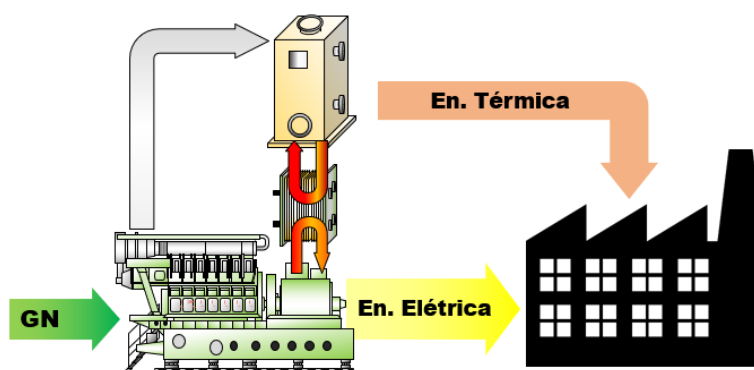


Figura 3 - Exemplo de dimensionamento topping cycle (adaptado de Mitsubishi..., 2016)

Nesta figura, o gás natural é queimado em um grupo gerador, fornecendo energia elétrica para a instalação. Parte do calor que seria perdido para o ambiente é recuperado dos gases de escape e do líquido refrigerante, fornecendo também a energia térmica.

A cogeração *bottoming cycle*, por sua vez, considera a energia térmica como principal objetivo e, portanto, o combustível primário é utilizado para gerar a energia térmica que será utilizada no processo da indústria e o calor recuperado é utilizado na geração de energia elétrica (Moreira et al., 2017). Pode-se ver na figura 4 um exemplo desta configuração.

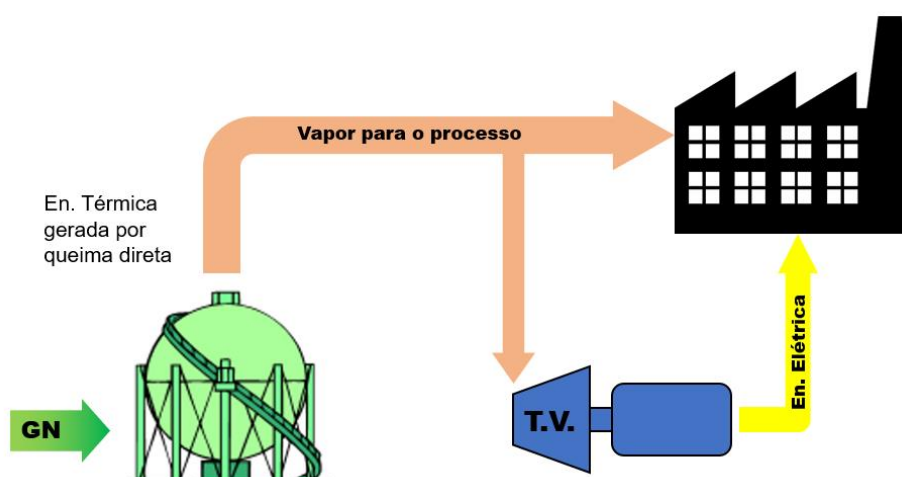


Figura 4 - Exemplo de dimensionamento bottoming cycle (autor, 2019)

Neste exemplo, o gás natural é queimado de forma direta em uma caldeira, que recebe água condensada e fornece vapor para o processo, atendendo toda a

demanda da fábrica e possibilitando que o excedente de vapor passe por uma turbina a vapor, que fornece energia elétrica para a fábrica.

Este tipo de dimensionamento é bastante visto em usinas que possuem acesso a um combustível de baixo custo, como em usinas de cana de açúcar, que utilizam o bagaço de cana.

2.1.3 Qualificação da Cogeração

Segundo Andreos (2013), para que a planta seja enquadrada na modalidade de cogeração qualificada, além de estar regularizada perante a ANEEL (Resolução nº 390 de 15 de dezembro de 2009), ela deve atender aos seguintes requisitos:

$$\frac{Et}{Ef} \geq 15\% \quad (2.2)$$

$$\left(\frac{Et}{Ef}\right) \div X + \frac{Ee}{Ef} \geq Fc \% \quad (2.3)$$

Onde:

E_f Energia da fonte. É a energia do combustível utilizado na cogeração. Medida através do PCI do combustível.

E_e Energia elétrica útil gerada pela planta de cogeração.

E_t Energia térmica útil gerada pela planta de cogeração.

Fc % Fator de cogeração. Parâmetro que depende da potência instalada e do combustível. É definido pela tabela 1, que segue.

X Fator de ponderação. Parâmetro que também depende da potência instalada e do combustível e é definido pela tabela 1, que segue.

A tabela 1, que segue explica e enquadra os critérios para definição dos fatores de cogeração e de ponderação de acordo com a capacidade da planta e o tipo de combustível utilizado.

Fonte/potência elétrica instalada	<i>X</i>	<i>Fc</i>%
Derivados de Petróleo, Gás Natural e Carvão:		
Até 5 MW	2,14	41
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,13	44
Acima de 20 MW	2,00	50
Demais combustíveis:		
Até 5 MW	2,50	32
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,14	37
Acima de 20 MW	1,88	42
Calor recuperado de processo:		
Até 5 MW	2,60	25
Acima de 5 MW e até 20 MW	2,17	30
Acima de 20 MW	1,86	35

Tabela 1 – Fatores Fc % e X (Andreos, 2013)

Vale salientar que *Ef*, *Ee* e *Et* são todos com base no regime médio de operação da planta e medidos em kWh/h.

2.1.4 Vantagens das plantas de geração de energia a gás natural

Segundo a ABEGÁS (2019), as plantas de geração de energia a gás natural apresentam diversas vantagens não apenas técnicas, mas também sociais e econômicas:

- Representam um baixo impacto ambiental se comparadas a outros combustíveis fósseis;
- Podem ser construídas próximo aos centros de consumo;
- São mais seguras do que as termelétricas convencionais;
- São economicamente mais vantajosas;
- Dispensam áreas para estocagem de carvão ou parque de tanques de óleo;
- Pode ser construído em menos tempo e com menor investimento, se comparadas às plantas convencionais;
- Necessitam de menos empregados para o seu funcionamento;

- Maior flexibilidade;
- Geração de energia elétrica junto aos centros de consumo;
- Disponibilidade ampla;
- Custo bastante competitivo com relação a outros combustíveis;
- Desenvolvimento regional;
- Contribui para a preservação da natureza e do meio ambiente;
- Substitui a lenha, reduzindo o desmatamento e a desertificação;
- Melhoria do rendimento energético;
- Diversificação da matriz energética;
- Redução da dependência do petróleo;
- Aumento da competitividade das empresas;
- Atração de investimentos externos;
- Redução do uso do transporte rodo-ferro-hidroviário para transporte de combustível;
- Permite obter as vantagens oferecidas pelo Protocolo de Kyoto.

Segundo a Comgás (2019), a segurança referida acima, deve-se ao fato de o gás natural apresentar densidade menor do que a do ar, e, portanto, dissipa-se na atmosfera em caso de vazamento. Desta forma, o risco de explosão é drasticamente reduzido e não gera contaminação do solo.

2.2 Configurações e possibilidades

Na seção 2.1 foi apresentada a definição de cogeração e qual seu propósito. Esta seção pretende explicar de forma sucinta quais os produtos finais que a cogeração nos possibilita obter, bem como quais os equipamentos necessários para cada tipo de demanda.

Para facilmente assimilar as possibilidades e a infinidade de configurações possíveis em um projeto de cogeração, tomemos como exemplo um grupo gerador.

Este grupo gerador é constituído de um motor de combustão interna (MCI) a gás natural acoplado a um alternador. Já sabemos que a fonte de energia primária é o gás natural. Supõe-se que este grupo gerador tenha capacidade de transformar 35% da energia do combustível em energia elétrica e que o restante, 65%, é perdido para o ambiente em forma de calor. A maior parte deste calor é perdida através de dois meios. O primeiro meio é o líquido refrigerante, que normalmente é dividido em dois circuitos, um circuito, chamaremos de circuito de alta temperatura, responsável por manter a temperatura de trabalho do motor em um nível adequado, e outro, que chamaremos de circuito de baixa temperatura, é responsável por reduzir a temperatura do ar de admissão após ser comprimido pelo turbocompressor. Quando o grupo gerador trabalha sem um sistema de cogeração, todo este calor é cedido ao ambiente através de um radiador, torre de refrigeração ou trocador de calor, mantendo o líquido refrigerante a uma temperatura de trabalho adequada. O segundo meio são os gases de escape. Estes gases são gerados pela queima do combustível no interior da câmara de combustão e são expelidos para o meio ambiente. A maior parte do calor perdido é expulso junto aos gases de escape. Além destes dois meios, ainda há uma pequena parte do calor que é transferida à atmosfera por meio de condução e convecção.

A partir deste exemplo, pode-se começar a observar a figura 5. A operação deste grupo gerador possibilita três fontes de energia: energia elétrica, o calor do líquido refrigerante e o calor dos gases de escape. Nesta figura, pode-se ver os equipamentos para recuperação de calor, bem como o que pode ser obtido através de cada equipamento.

Neste ponto, começamos a ver que existem inúmeras configurações e que as possibilidades para cada projeto de cogeração são muitas.

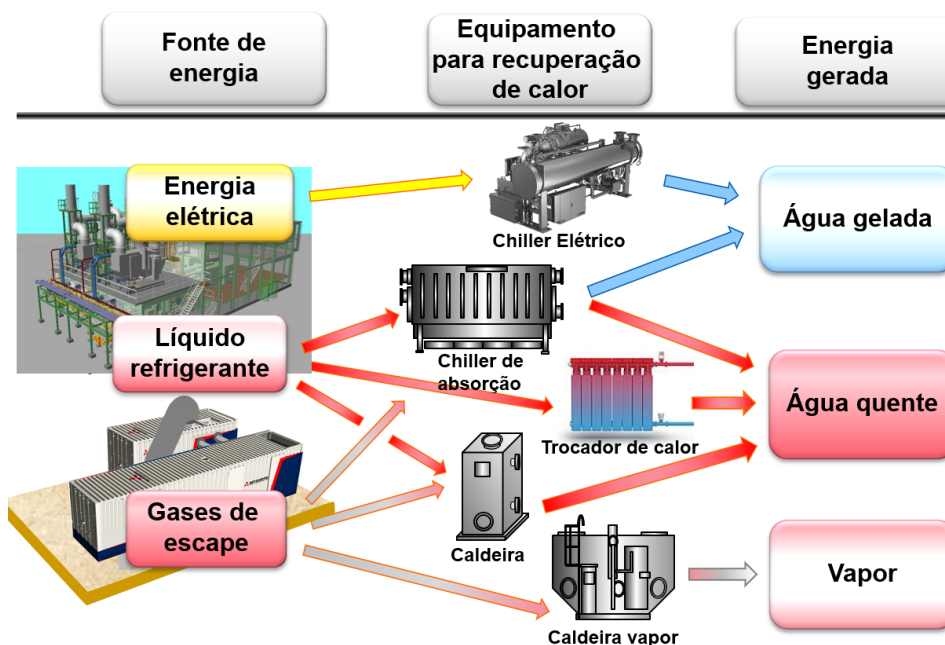


Figura 5 - Possibilidades da cogeração (Mitsubishi..., 2016)

A água gelada, obtida através do chiller, pode ser utilizada para climatização do ambiente. A água quente pode ser utilizada para aquecimento em geral ou então para o processo produtivo. O vapor é utilizado para o processo de diversas indústrias, principalmente das indústrias de papel e celulose e químicas em geral.

Na figura 6, que segue, pode-se ver um sistema de cogeração que pode atingir eficiência global de 81,5%. Neste caso, tem-se um grupo gerador com potência de 5750 kWe e capacidade de aproveitar 4592 kW para fornecimento de água quente, ou então 1127 kW de água quente juntamente com 2585 kW de vapor. Neste caso, a planta de cogeração permite escolher entre o fornecimento de 100% de água quente ou então parte em água quente e parte em vapor. Muito provavelmente, o usuário desta planta apresenta uma demanda flexível, então optou por ter uma planta de cogeração que possa atendê-la da melhor forma possível.

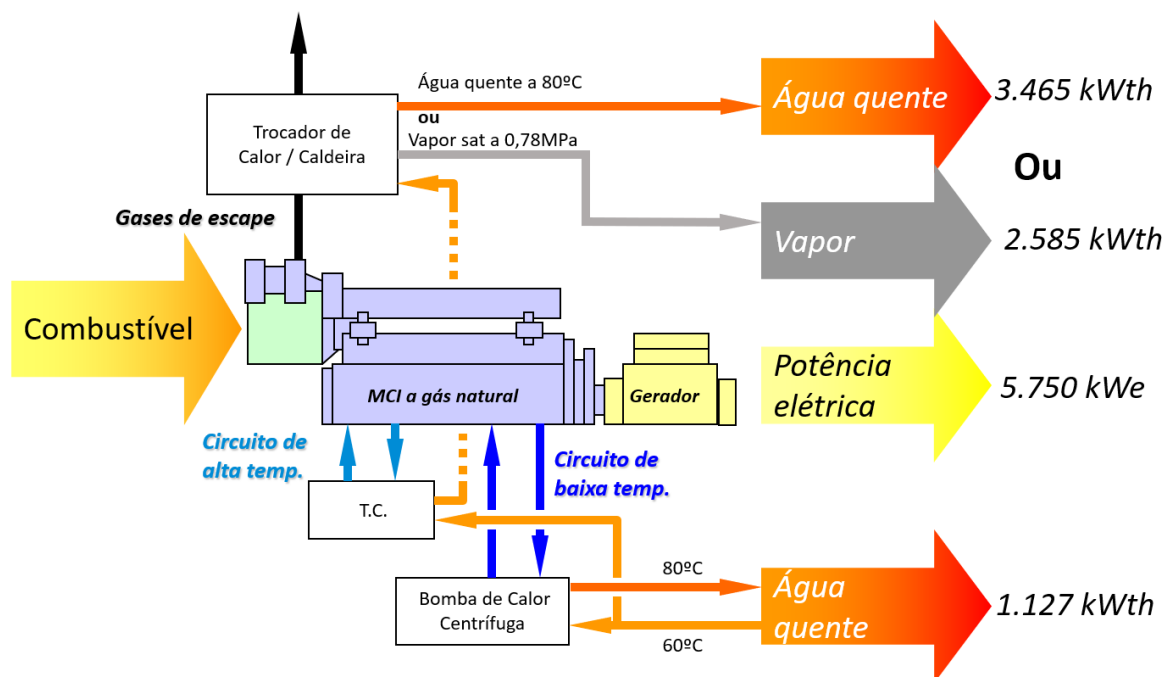


Figura 6 - Exemplo de uma planta de cogeração (Mitsubishi..., 2016)

2.3 Exemplos de plantas de cogeração

2.3.1 Energia elétrica, água gelada, vapor e aquecimento de óleo

Neste exemplo, serão apresentadas duas soluções diferentes para um mesmo cliente. As figuras 7 e 8 mostram uma indústria que tem uma demanda de 15000kW de eletricidade, 3300TR para climatização do ambiente, 200m³/h de óleo quente e 8 toneladas por hora de vapor. As figuras da esquerda representam o funcionamento atual da planta enquanto as figuras da direita mostram duas propostas diferentes de soluções para cogeração.

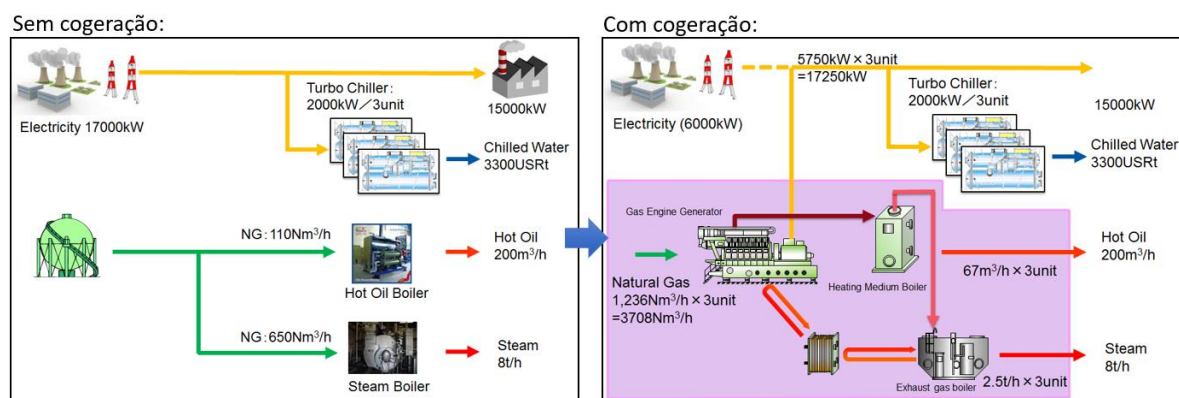


Figura 7 - Primeira proposta de cogeração (Mitsubishi..., 2016)

Pode-se ver que, inicialmente, o cliente compra 17MW da rede elétrica, sendo 15MW para suprir as necessidades de eletricidade da rede e 2MW utilizados nos chillers elétricos para gerar os 3300TR necessários. O óleo quente e o vapor são obtidos através da queima direta de gás natural nas caldeiras.

Nas duas soluções foram sugeridas a instalação de grupos motogeradores a gás natural com capacidade total de gerar 17250kW de energia elétrica. A diferença está na configuração da cogeração. Na figura 7, a energia elétrica gerada pelo gerador é utilizada para atender a 100% da demanda elétrica da indústria e também para continuar alimentando os mesmos chillers elétricos para obtenção dos 3300TR. Com o reaproveitamento do calor dos gases de escape e do líquido refrigerante dos motores nas caldeiras, pode-se atender toda a demanda do vapor e do óleo quente (Mitsubishi..., 2016).

A figura 8, que segue, mostra a segunda solução proposta:

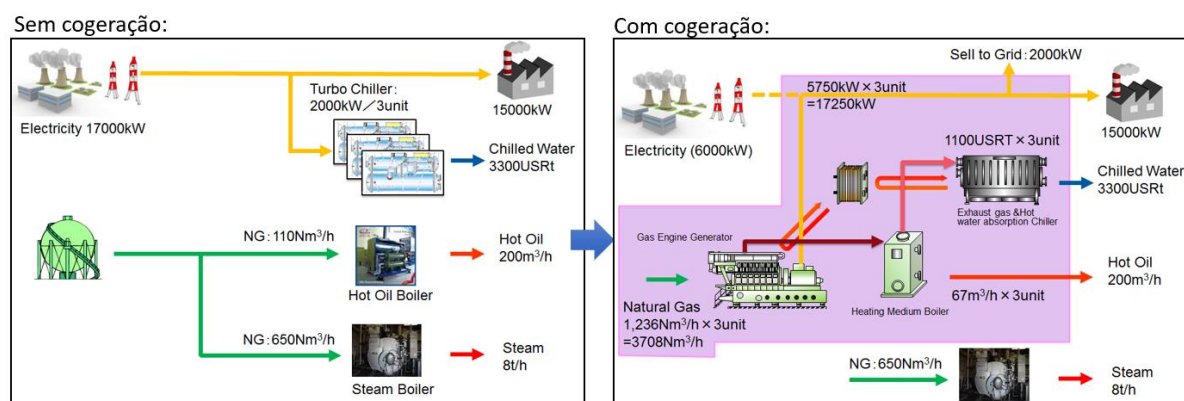


Figura 8 - Segunda proposta de cogeração (Mitsubishi..., 2016)

Neste caso, os 3300TR necessários não são mais obtidos através dos chillers elétricos, mas através de chillers de absorção, aproveitando o calor rejeitado pelo motor. Da mesma forma, o calor reaproveitado consegue ainda atender a demanda de óleo quente, porém não é suficiente para atender à demanda de vapor. Então, para atender a demanda de vapor, deve-se continuar com a queima direta de gás natural. Neste caso, há um excedente de 2000kWe (Mitsubishi..., 2016).

Para entender qual solução seria mais viável, teríamos que conhecer o mercado onde está localizada a indústria. Por exemplo, quais são os preços do gás e da energia elétrica e também se existe a possibilidade de venda do excedente de energia, o que poderia tornar a segunda proposta mais atrativa. Independente disto, pode-se perceber que existem diversas possibilidades para atender a uma mesma demanda. Além das variadas opções de configuração quanto ao sistema de cogeração, há também a possibilidade de modificar o meio de geração de energia elétrica. Por exemplo, ao trocar os motores por uma única turbina a gás ou então por um único motor de maior potência e baixa rotação, mudam também os parâmetros de entrada para dimensionamento do sistema de cogeração. Normalmente as turbinas a gás apresentam maior potencial de reaproveitamento do calor dos gases de escape, se comparadas aos MCIs (Mitsubishi..., 2016).

2.3.2 Energia elétrica e água gelada

Esta planta de cogeração é localizada na Universidade da Flórida e iniciou a operação em 2012.

Geração de 5500kW em energia elétrica e 1000 toneladas de refrigeração. Neste exemplo, tanto o calor dos gases de escape quanto o calor do líquido refrigerante são aproveitados por um *chiller* de absorção para atender à demanda de água gelada, utilizada no sistema de ar condicionado (Mitsubishi..., 2016).

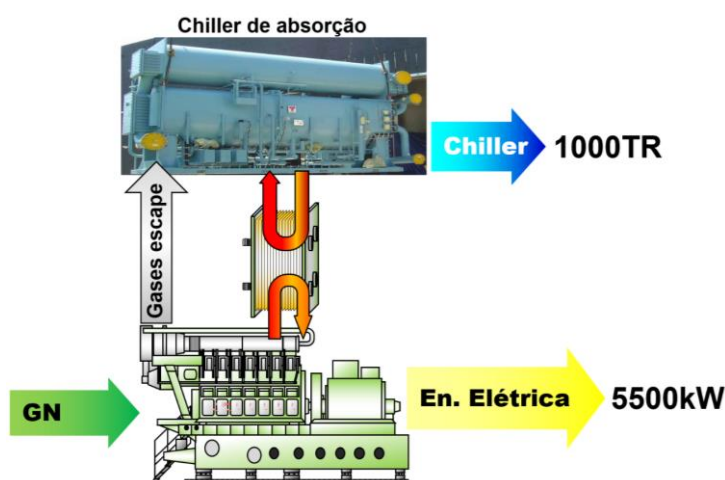


Figura 9 - Cogeração com fornecimento de energia elétrica e água gelada (Mitsubishi..., 2016)

2.3.3 Energia elétrica e água quente

Esta planta atende à demanda de energia elétrica e água quente em um hospital na França. São gerados 4450 kW de energia elétrica e 3500 kW de água quente, utilizada não apenas na área de limpeza, para higienização e assepsia, mas também na cozinha, chuveiros e tratamentos (Mitsubishi..., 2016).

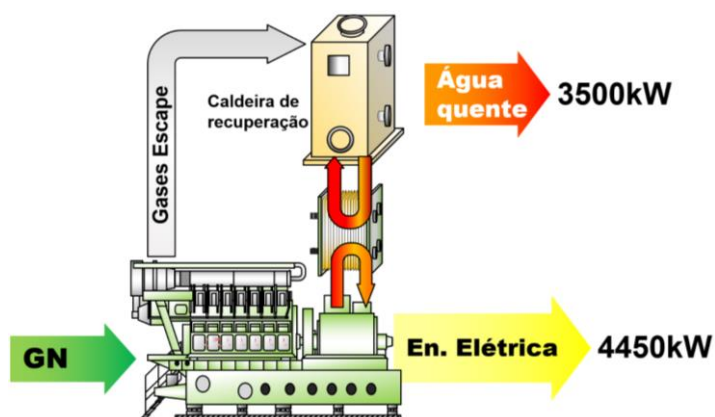


Figura 10 - Cogeração com fornecimento de energia elétrica e água quente (Mitsubishi..., 2016)

2.3.4 Planta com geração “multipropósito”

Neste exemplo em um shopping center na China, são utilizados 3 grupos geradores a gás de 1,5 MWe cada. Além do reaproveitamento do calor dos gases de escape e do líquido refrigerante no chiller de absorção, parte da energia elétrica gerada é utilizada no chiller elétrico (Mitsubishi..., 2016).

Desta forma, a planta de cogeração tem capacidade de gerar no total 3066kW de energia elétrica e 3600kW de água gelada no verão ou 3624kW de água quente no inverno, sendo possível fazer a climatização do ambiente durante todo o ano.

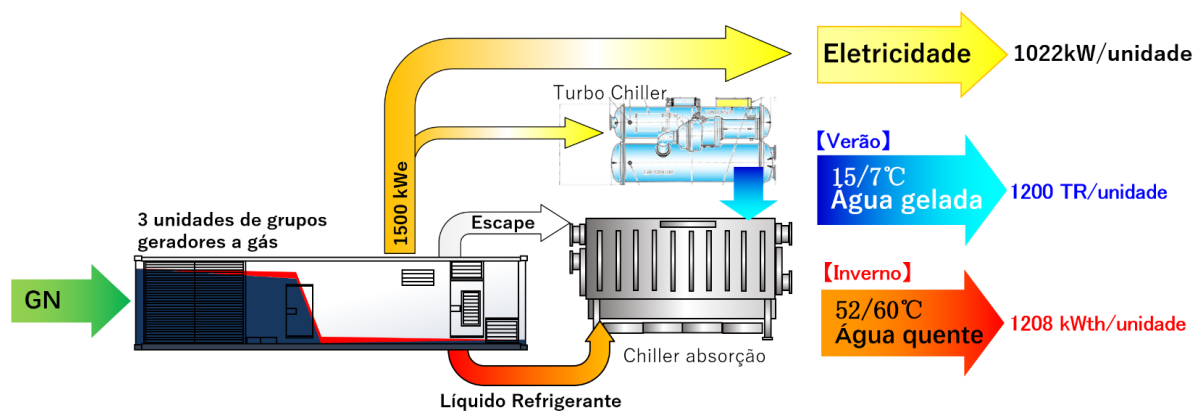


Figura 11 - Planta de cogeração com flexibilidade (Mitsubishi..., 2016)

3 ESTUDO DE CASO

Neste capítulo, será realizada a avaliação da solução apresentada no capítulo anterior em uma indústria química. Esta indústria possui demanda por energia elétrica e vapor e atualmente possui demanda contratada de energia elétrica de 12 MW no mercado livre de energia e toda a demanda de vapor é atendida com a queima direta de gás natural em caldeira com capacidade de 100 toneladas por hora de vapor, consumindo 6 milhões de m³ de gás natural por ano.

3.1 Solução a ser estudada

A fim de proporcionar maior agilidade, soluções prontas para cogeração de energia têm aparecido no mercado. A dúvida que surge com relação a este fato leva em conta o que foi visto no capítulo 2, onde cada cliente apresenta uma demanda diferente e para cada demanda existem múltiplas configurações e possibilidades, tanto no que se refere a quais equipamentos devem ser utilizados como quais as características individuais de cada equipamento que será utilizado.

Portanto, surgiu a ideia de verificar a utilização de uma solução completa. O equipamento a ser estudado neste trabalho apresenta as características exibidas na tabela 2, retirada do catálogo do fabricante.

Potência	1200 kW
Frequência	60 Hz
Tensão	480 / 4160 / 6600V
Eficiência Elétrica	43,1%
Eficiência Global	74,0%

Tabela 2 - Dados de catálogo da solução a ser estudada (Catálogo..., 2019)

A solução consiste em 2 containers, o primeiro, de 40 pés, comporta o grupo gerador a gás natural, os radiadores, sistema de ventilação, tubulação de gás e todos os painéis elétricos necessários, conforme exibido na figura 12.

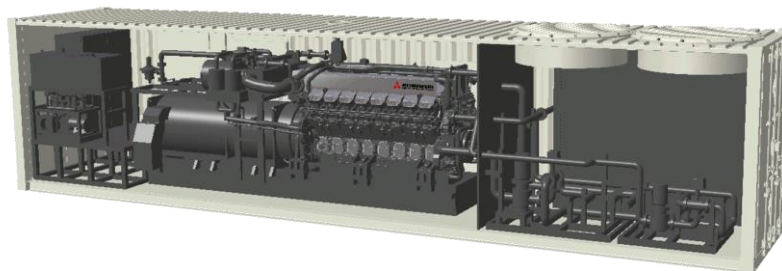


Figura 12 - Layout interno do container de 40 pés (Mitsubishi..., 2016)

O segundo container comporta os equipamentos responsáveis pelo reaproveitamento do calor dos gases de escape e do líquido refrigerante. Como pode-se ver na figura 13, retirada de um catálogo do fabricante, um trocador de calor possibilita aquecimento de até 59 m³/h de água de 83°C até 88°C a partir do líquido refrigerante e uma caldeira possibilita geração de até 735 kg/h de vapor a 0,78 MPa, reaproveitando os gases de escape.

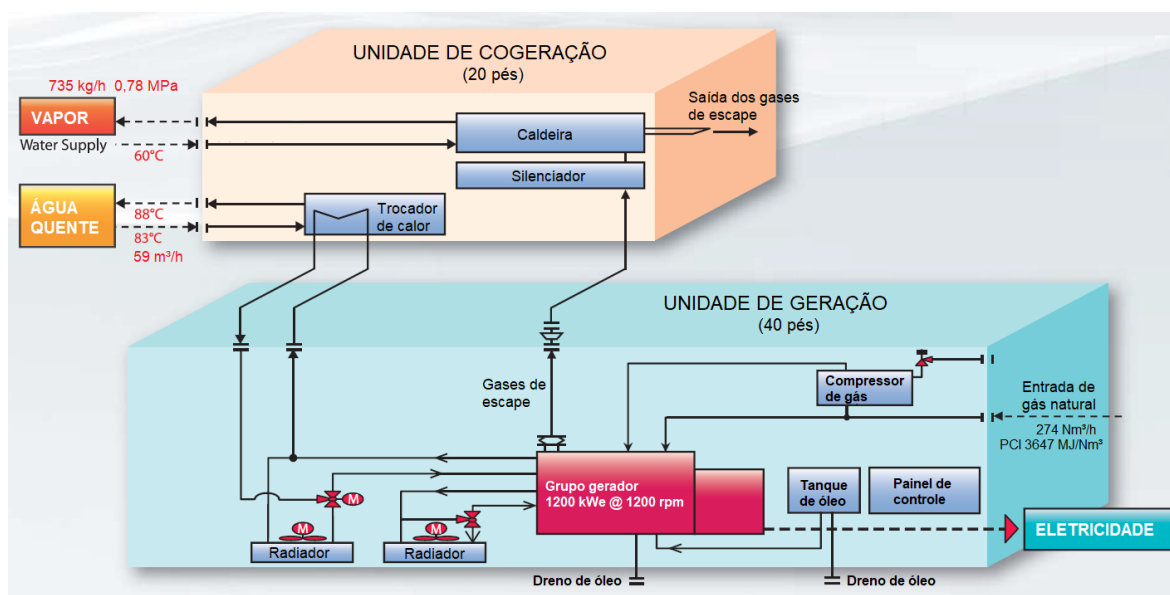


Figura 13 - Esquema simplificado dos containers de geração e cogeração (Catálogo..., 2019)

A ideia desta solução pronta é facilitar o transporte, a entrega, a instalação e também, simplificar a construção civil. As imagens que seguem mostram este processo.



Figura 14 - Transporte da solução completa (Mitsubishi..., 2016)

Pode-se ver na figura 14 o transporte de um container de 40 pés mais à direita, onde está o grupo gerador, e de um container de 20 pés, onde fica o equipamento de cogeração.

A figura 15 mostra a preparação da fundação para receber o equipamento.



Figura 15 - Preparação da fundação (Acervo pessoal)

A figura 16, que segue, mostra como é feita a base, antes que o grupo gerador seja entregue e instalado.



Figura 16 - Preparação da base (Acervo pessoal)

A figura 17 mostra a entrega do equipamento ao local de operação. Pode-se perceber que a entrega, preparo do local e instalação são bem mais simples do que em projetos convencionais.



Figura 17 - Entrega do equipamento (Acervo pessoal)

A figura 18 mostra um exemplo de *layout* de uma planta com 5 unidades geradoras e 5 unidades de cogeração. A capacidade total desta planta seria de 6.000 kW de energia elétrica, 3.675 kg/h de vapor e 295 m³/h de água quente a 88°C.



Figura 18 - Layout de planta com 5 unidades de cogeração (Mitsubishi..., 2016)

3.2 Demanda

3.2.1 Demanda elétrica

Como dito anteriormente, a demanda contratada no mercado livre é de 12 MW. O consumo elétrico é de 7.776 MWh/mês ou 93.312 MWh/ano. O gráfico 1 mostra o comportamento da demanda:

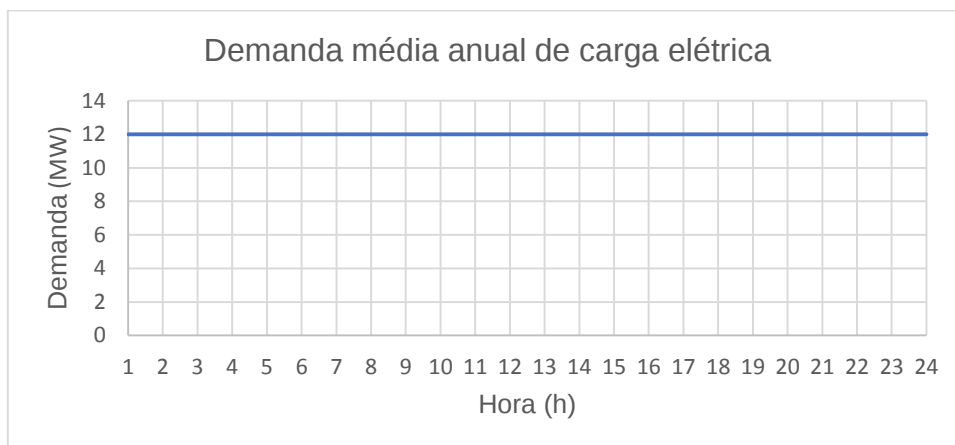


Gráfico 1 - Demanda média anual de carga elétrica (autor)

3.2.2 Demanda térmica

A caldeira possui capacidade de fornecer 100 toneladas de vapor saturado a 8 bar por hora. Sua eficiência é de 80% e o consumo atual de gás natural na caldeira é de 6 milhões de m³/mês.

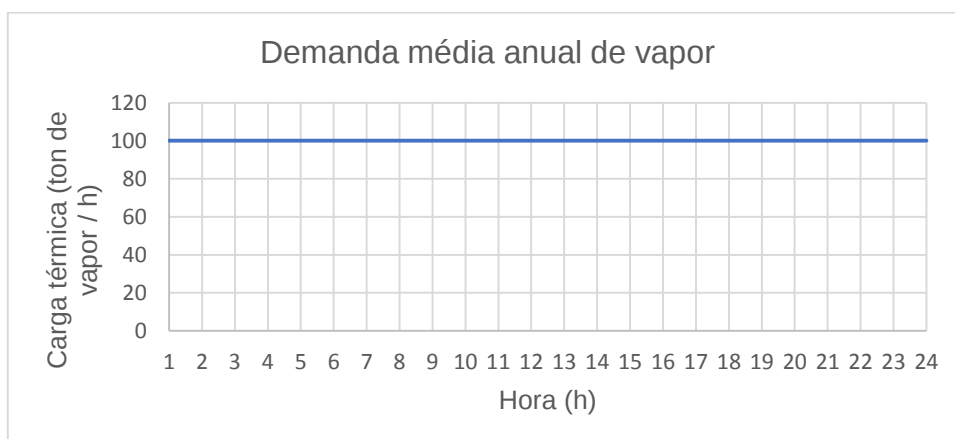


Gráfico 2 – Gráfico da demanda média anual de vapor (autor)

3.3 Cálculos com a solução proposta

Como a demanda elétrica da indústria é de 12 MW e a solução proposta tem capacidade de geração de energia elétrica muito maior do que térmica, e é uma cogeração dimensionada por *topping cycle*, serão utilizadas dez unidades da planta de geração com dez unidades do container de cogeração. A demanda de vapor que não for atendida pela planta de cogeração continuará a ser suprida por queima direta de gás natural na caldeira.

3.3.1 Cálculo do custo da operação atual

A tabela que segue mostra os gastos que a indústria tem com energia elétrica atualmente. Conhecendo-se o consumo de energia elétrica anual e o custo efetivo da energia elétrica, pode-se calcular o custo anual com energia elétrica que a companhia tem sem cogeração.

Contratação de Mercado	LIVRE
Demanda	12.000 kW
Fator de Carga	88,8%
Consumo Energia elétrica anual	93.312 MWh
Custo efetivo da energia elétrica sem impostos	R\$ 320,00 /MWh
Custo anual com energia elétrica	R\$ 29.859.840

Tabela 3 – Cálculo do custo de E.E. na operação atual (autor)

O próximo passo é realizar o cálculo dos gastos atuais com gás natural. Pode-se ver na tabela 4 que, conhecendo-se a demanda de vapor, quanto gás natural é necessário para atendê-la e qual é a tarifa paga pela indústria pelo gás natural, calcula-se o custo anual com gás natural para queima direta.

Demanda de vapor @ 8 bar	100 Ton/h
Demanda anual de vapor @ 8 bar	777.600 Ton
Geração de vapor com queima direta de GN	777.600 Ton
Geração de vapor pela cogeração	-
Consumo mensal de gás natural	6.000.000 m ³
Consumo anual de gás natural	72.000.000 m ³
Custo do gás natural industrial sem impostos	1,384 R\$/m ³
Custo anual Gás natural para queima direta	R\$ 99.648.000

Tabela 4 – Cálculo do custo com G.N. na operação atual (autor)

Somando os resultados encontrados na tabela 3 e na tabela 4, pode-se calcular o gasto total com energia elétrica e vapor, que é de R\$ 129.507.840,00 por ano. Este é o valor base, que será utilizado para a verificação da viabilidade econômica do equipamento estudado.

3.3.2 Cálculo do custo da operação com cogeração

Como dito anteriormente, serão utilizadas 10 unidades do grupo gerador com capacidade de 1200 kW cada. Da figura 13, retira-se a capacidade de geração de vapor por hora. Cada conjunto tem a capacidade de gerar 735 kg/h ou 0,735 ton/h. Esta capacidade é relativamente pequena se comparada a outros projetos. Este fato se deve à alta eficiência elétrica do equipamento (43,1%, segundo a tabela 2) e também porque este equipamento não utiliza todo o calor que seria perdido para a geração de vapor. Parte deste calor pode ser usada para gerar água quente. Como esta indústria não tem demanda por água quente, neste estudo, considera-se que esta parcela do calor realmente é perdida.

Conhecendo-se o rendimento elétrico do equipamento, que é 43,1%, e o PCI do gás natural, de 8560 kcal/m³, pode-se calcular o consumo específico do combustível, e, por sua vez, o consumo anual de gás natural. Isto permite encontrar o valor em reais por metros cúbicos de gás e, conseqüentemente, o gasto anual com combustível.

Considerando o valor de manutenção médio do equipamento de R\$75,00/MWh, tem-se o custo total com a cogeração, conforme exibido na tabela 5, que segue.

Capacidade total	12.000 kW
Disponibilidade	95%
Geração de vapor a 8 bar	7,350 Ton/h
Geração de vapor anual	54.296 Ton
Consumo específico	233,22 m ³ /MWh
Geração de energia elétrica anual	88.646 MWh
Consumo anual de Gás Natural	20.674.113 m ³
Custo gás natural (cogeração) sem impostos	R\$ 1,295000 /m ³
Custo anual com Gás Natural	R\$ 26.772.977
Custo com manutenção	R\$ 75 /MWh
Custo anual com manutenção	R\$ 6.648.480
Custo total com a Cogeração	R\$ 33.421.457

Tabela 5 – Custo com a cogeração – solução pronta (autor)

Feito isso, pode-se ver que a cogeração atende apenas a uma pequena parte da demanda de vapor, então, o restante (92,65 ton/h) deve continuar sendo obtido a partir da queima direta. A tabela 6 mostra o cálculo do custo anual com esta queima suplementar.

Demanda de vapor a 8 bar	92,650 Ton/h
Demanda anual de vapor a 8 bar	777.600 Ton
Geração de vapor com queima direta	723.304 Ton
Geração de vapor pela cogeração	54.296 Ton
Consumo mensal de gás natural	5.581.050 m ³
Consumo anual de gás natural	66.972.600 m ³
Custo do gás natural industrial sem impostos	1,387 R\$/m ³
Custo anual Gás natural para queima direta	R\$ 92.890.996

Tabela 6 – Custo do G.N. para queima direta – solução pronta (autor)

Ainda não se pode calcular o valor total. Considerando-se a disponibilidade de 95% dos equipamentos de cogeração, não é atendida a demanda total de energia elétrica, portanto, ainda deve-se comprar uma pequena porção de energia elétrica da rede. A tabela 7 mostra o custo anual com energia elétrica comprada da rede. Pode-se ver que o custo por MWh é maior, já que a demanda contratada continua a mesma e o consumo é drasticamente reduzido.

Contratação de Mercado	LIVRE
Demanda	12.000 kW
Consumo Energia elétrica anual	4.666 MWh
Custo efetivo da energia elétrica sem impostos	R\$ 630,00 /MWh
Custo anual com energia elétrica	R\$ 2.939.328

Tabela 7 – Custo da E.E. comprada da rede – solução pronta (autor)

Agora sim, somando-se os custos encontrados nas tabelas 5, 6 e 7, pode-se encontrar o gasto total para atender a demanda de energia elétrica e vapor utilizando a solução de cogeração proposta. Este custo é de R\$ 129.251.781,00 por ano.

Portanto, a economia será de R\$ 256.059,00 por ano. Esta economia é muito pequena, representando apenas 0,2%.

Considerando os 10 conjuntos de cogeração, o investimento inicial está explicado na tabela 8.

Equipamentos	R\$ 56.000.000
Instalação	-
Caldeira de recuperação	-
Investimento inicial total	R\$ 56.000.000

Tabela 8 – Investimento inicial – solução pronta (Acervo pessoal)

Como apresentado na seção 3.1, a caldeira de recuperação já faz parte do conjunto de cogeração, por isso a tabela mostra investimento inicial de zero para este equipamento. A instalação deste equipamento é bastante simples e o custo acaba sendo desprezível se comparado ao valor dos equipamentos.

Portanto, agora que se sabe o montante necessário para investimento inicial e a economia anual, pode-se encontrar um *payback* simples de 219 anos. Em outras palavras, o projeto é completamente inviável.

3.3.3 Qualificação da cogeração

Já vimos que o projeto é inviável. Apenas para conclusão dos cálculos desta seção, será verificado se a instalação pode ser enquadrada como cogeração

qualificada. Caso positivo, a tarifa do gás natural utilizada está correta. Caso negativo, seria necessário refazer os cálculos com a nova tarifa. Para fins de estudo, primeiramente serão realizados os cálculos considerando utilização da água quente que o equipamento tem capacidade de gerar e, em seguida, considerando apenas a geração de vapor.

A. Considerando utilização da água quente:

Considerando as equações 2.2 e 2.3 a tabela 1, tem-se os seguintes dados:

- Ee: 12.000 kW
- Ef: 27.842,23 kW (Ee/rendimento elétrico)
- Et: 8.603,25 kW (Ef/rendimento térmico)
- X = 2,13
- Fc % = 44%

Portanto:

Condição 1:

$$\frac{Et}{Ef} = 30,9\% > 15\%$$

Condição 2:

$$\left(\frac{Et}{Ef}\right) \div X + \frac{Ee}{Ef} = 57,6\% > 44\%$$

Como ambas as condições foram atendidas, a planta pode ser enquadrada como cogeração qualificada.

B. Sem considerar a utilização da água quente:

Neste caso, todos os dados continuam os mesmos, com exceção de Et, que será menor. Conhecendo-se o salto entálpico em kW/kg da água a 60°C para vapor saturado a 8 bar, com base na tabela abaixo, pode-se

calcular a energia que é utilizada pela planta de cogeração para gerar os 7.350 kg/h de vapor.

Água 60°C	Vapor Saturado Seco			Salto Entálpico		
kJ/kg	Bar	°C	kJ/kg	kJ/kg	kcal/kg	kW/kg
251,13	1,0	99,63	2.675,50	2.424,37	579,45	0,674
251,13	2,0	120,23	2.706,70	2.455,57	586,91	0,682
251,13	3,0	133,55	2.725,30	2.474,17	591,35	0,688
251,13	4,0	143,63	2.738,60	2.487,47	594,53	0,691
251,13	5,0	151,86	2.748,70	2.497,57	596,94	0,694
251,13	6,0	158,85	2.756,80	2.505,67	598,88	0,696
251,13	7,0	164,97	2.763,50	2.512,37	600,48	0,698
251,13	8,0	170,43	2.769,10	2.517,97	601,82	0,700
251,13	9,0	175,38	2.773,90	2.522,77	602,97	0,701
251,13	10,0	179,91	2.778,10	2.526,97	603,97	0,702
251,13	11,0	184,09	2.781,70	2.530,57	604,83	0,703
251,13	12,0	187,99	2.784,80	2.533,67	605,57	0,704
251,13	13,0	191,64	2.787,60	2.536,47	606,24	0,705
251,13	14,0	195,07	2.790,00	2.538,87	606,82	0,706
251,13	15,0	198,32	2.792,20	2.541,07	607,34	0,706
251,13	17,5	205,76	2.796,40	2.545,27	608,34	0,707
251,13	20,0	212,42	2.799,50	2.548,37	609,09	0,708

Tabela 9 – Salto entálpico (Andreos, 2018)

Com base nesta tabela, tem-se um salto entálpico de 0,7 kW/kg, ou seja, são utilizados 5145 kW na geração do vapor.

Portanto:

Condição 1:

$$\frac{Et}{Ef} = 18,5 \% > 15\%$$

Condição 2:

$$\left(\frac{Et}{Ef}\right) \div X + \frac{Ee}{Ef} = 51,8 \% > 44 \%$$

Pode-se ver que os valores ficaram bem menores do que na condição do item A, porém, ambas as condições continuam sendo

satisfeitas e a planta continua sendo enquadrada como cogeração qualificada.

Mesmo sendo uma cogeração qualificada, conforme visto anteriormente, a solução aqui estudada não apresentou bons resultados para este projeto e a conclusão encontrada é que a mesma é economicamente inviável.

Para melhor explicar as razões que levam esta solução a ser inviável para esta indústria, na seção 3.4 serão realizados estes mesmos cálculos considerando um projeto customizado para este cliente.

3.4 Cálculos com solução customizada

Como neste caso a demanda térmica é muito maior do que a demanda elétrica, seria conveniente fazer o dimensionamento da cogeração partindo do ciclo *bottoming*, porém, para fins de comparação com a solução pronta, continua-se utilizando o ciclo *topping*, e equipamentos similares aos estudados na seção anterior (motor de combustão interna), porém levando em conta a necessidade principal da indústria, que é a demanda por vapor.

Partindo deste princípio, escolhe-se um grupo gerador que tenha 1200 kW de potência elétrica, porém um rendimento menor, para que mais calor possa ser reaproveitado na geração de vapor. Além disso, na seção 3.3, nem todo o calor era reaproveitado, já que a solução pronta prevê a demanda de água quente, que não existe neste cliente. Portanto, todo o calor que pode ser reaproveitado será utilizado na geração de vapor.

Tomando-se como exemplo a utilização de dez grupos geradores, como os da seção anterior, porém agora com 37% de eficiência elétrica, pode-se fazer o cálculo da quantidade de vapor que este equipamento pode gerar, conforme tabela que segue:

Potência elétrica total	12.000 kW
Rendimento	37,0%
Energia do GN na Entrada	32.432 kW
% da energia térmica aproveitável do bloco do MCI	20,0%
% da energia térmica aproveitável da exaustão	23,0%
Energia térmica útil	13.946 kW
Salto entálpico a 8 bar	0,65 kW/kg
Rendimento da caldeira de recuperação	80%
Energia térmica aproveitada da caldeira	11.157 kW
Geração de vapor	17,164 Ton/h

Tabela 10 – Capacidade de geração de vapor – solução customizada (autor)

Nesta tabela, foram utilizados os valores de 20 e 23% respectivamente para a energia térmica aproveitável do bloco do motor de combustão interna e para a energia térmica aproveitável dos gases de escape, pois são valores praticados atualmente no mercado.

O próximo passo é o cálculo do consumo específico de combustível. Analogamente ao cálculo realizado na seção 3.3, tendo o valor da energia do gás natural na entrada do grupo gerador e o valor do PCI do gás, encontra-se o consumo específico de 271,66 m³/MWh.

3.4.1 Custo da operação com solução customizada

Neste ponto, pode-se partir para os cálculos dos gastos anuais com a cogeração, com o gás natural para queima direta e com a energia elétrica comprada da rede.

A tabela 11 mostra o cálculo do custo anual com gás natural e manutenção gerado pela planta de cogeração. Pode-se ver que a capacidade de geração de vapor já é bem maior se comparada à capacidade da solução pronta.

Capacidade total	12.000 kW
Disponibilidade	95%
Geração de vapor a 8 bar	17,164 Ton/h
Geração de vapor anual	150.359 Ton
Consumo específico	271,66 m ³ /MWh
Geração de energia elétrica anual	88.646 MWh
Consumo anual de Gás Natural	24.081.894 m ³
Custo do gás natural (cogeração) sem impostos	R\$ 1,295 /m ³
Custo anual com Gás Natural	R\$ 31.186.053
Custo com manutenção	R\$ 75 /MWh
Custo anual com manutenção	R\$ 6.648.480
Custo total com a Cogeração	R\$ 37.834.533

Tabela 11 – Custo operacional da cogeração – solução customizada (autor)

A tabela 12 mostra quanto de vapor ainda será necessário gerar a partir da queima direta. Como esta solução tem capacidade de gerar 17,164 ton/h de vapor, a capacidade anual é de 150.359 toneladas, sendo ainda necessário gerar 627.241 ton/ano por queima direta. O custo anual com esta operação é calculado na tabela 12.

Demanda de vapor a 8 bar	100 Ton/h
Demanda anual de vapor a 8 bar	777.600 Ton
Geração de vapor com queima direta	627.241 Ton
Geração de vapor pela cogeração	150.359 Ton
Consumo mensal de gás natural	4.839.824 m ³
Consumo anual de gás natural	58.077.893 m ³
Custo do gás natural industrial sem impostos	1,390 R\$/m ³
Custo anual Gás natural para queima direta	R\$ 80.716.656

Tabela 12 - Custo do G.N. para queima direta – solução customizada (autor)

A tabela 13 mostra o custo anual esperado com energia elétrica comprada da rede:

Contratação de Mercado	LIVRE
Demanda	12.000 kW
Consumo Energia elétrica anual	4.666 MWh
Custo efetivo da energia elétrica sem impostos	R\$ 630,00 /MWh
Custo anual com energia elétrica	R\$ 2.939.328

Tabela 13 – Custo da E.E. comprada da rede – solução customizada (autor)

Finalmente, pode-se calcular o custo total para atender à demanda de energia elétrica e vapor utilizando a solução de cogeração com um projeto específico para esta aplicação. Este custo é de R\$ 121.490.517,00 por ano. Se comparado ao custo inicial de R\$ 129.507.840,00, encontra-se uma economia de R\$ 8.017.323,00, que representa uma redução de 6,19% no gasto anual.

Neste caso, o investimento inicial é descrito na tabela que segue:

Equipamentos	R\$ 23.000.000
Instalação	R\$ 18.000.000
Caldeira de recuperação	R\$ 3.432.848
Investimento inicial total	R\$ 44.432.848

Tabela 14 - Investimento inicial – solução customizada (Andreos, 2018)

Portanto, encontra-se um *payback* simples de 5,5 anos.

3.4.2 Qualificação da cogeração – solução customizada

Analogamente ao que foi descrito na subseção 4.2.3, utilizando-se a tabela 10 e a tabela 1, tem-se os seguintes dados:

- Ee: 12.000 kW
- Ef: 32.432 kW
- Et: 11.157 kW
- X = 2,13
- Fc % = 44%

Portanto:

Condição 1:

$$\frac{Et}{Ef} = 34,4\% > 15\%$$

Condição 2:

$$\left(\frac{Et}{Ef}\right) \div X + \frac{Ee}{Ef} = 53,2 \% > 44 \%$$

Então, a cogeração é qualificada.

Ao observar estes resultados, pode-se perceber que a grande diferença entre a solução pronta e a solução customizada, é que, sabendo que o cliente tem maior demanda por energia térmica, é escolhida uma configuração que utiliza a energia da fonte de forma mais igual para geração de energia térmica e elétrica. Para este cliente em específico, pouco importa o fato do MCI da solução pronta ser bem mais eficiente e tecnológico do que o outro, já que do ponto de vista dele, quanto menos eficiente o motor, mais calor ele pode recuperar para geração do vapor, que é sua maior demanda.

4 CONCLUSÕES

No capítulo 3, foram encontrados resultados muito diferentes ao realizar a comparação da utilização de uma solução pronta com a solução customizada. Ambas as soluções são bastante parecidas. Ambas têm como base o motor de combustão interna a gás natural, porém, a solução pronta não leva em conta quais são as necessidades do cliente. Sendo a grande diferença o fato de a principal vantagem da solução pronta, que é o MCI de alto rendimento elétrico e alta tecnologia, acabar por atrapalhar os resultados para este cliente em específico, já que encarece o projeto e dá preferência à geração de energia elétrica, que não é a principal demanda desta indústria.

Neste capítulo, além de explicar os motivos que levam a estes resultados, serão discutidas também as soluções alternativas para a obtenção de uma melhor viabilidade econômica, já que mesmo com um resultado expressivamente melhor do que no primeiro caso, mesmo a solução customizada acabou por apresentar um *payback* simples de 5,5 anos. O *payback* simples é apenas a primeira análise realizada para a definição da viabilidade econômica e não leva em consideração diversos fatores, portanto, na prática, o resultado que seria encontrado com o *payback* descontado ou VPL seria maior do que este. Na atualidade brasileira, um *payback* simples interessante para um projeto de cogeração estaria entre 3 e 5 anos.

4.1 Motivos que levaram ao resultado encontrado

Além de ser uma solução mais cara pelo fato de ser 100% importada, sem um único componente produzido ou montado no mercado nacional, elevando os custos de importação, diversos fatores levam esta solução a ser inviável, como a falta de flexibilidade por atender requisitos muito específicos.

4.1.1 Tipo de demanda

O principal motivo que faz com que a solução pronta seja inviável é exatamente a falta de flexibilidade quanto ao tipo de demanda do projeto. Esta solução não permite, por exemplo, aumentar a produção de vapor, já que não existe demanda por

água quente. Além disso, como dito anteriormente, esta aplicação não exige um motor tão eficiente e tecnológico.

4.1.2 Tipo de dimensionamento

Conforme mostrado no capítulo 2, existem dois tipos de dimensionamento de projetos de cogeração, o *topping cycle* e o *bottoming cycle*. Para este cliente em específico, seria bem mais interessante utilizar o segundo, já que a demanda térmica é muito maior do que a elétrica. Neste caso, o gás natural continuaria sendo utilizado para a geração de vapor, porém em excesso. Este excesso poderia ser utilizado em uma turbina a vapor para geração dos 12.000 MW de energia elétrica.

Seguramente, nesta situação, encontraríamos um *payback* muito mais atraente e faria muito mais sentido o investimento. As figuras 3 e 4 do capítulo 2 mostram, de forma esquematizada, estes dois tipos de dimensionamento.

4.1.3 Solução ideal utilizando MCI para este cliente

Como esta indústria apresenta uma demanda média de energia elétrica bastante estável, não há grandes necessidades de modulação. Portanto, não necessariamente deve-se optar por múltiplas unidades de grupos geradores. Pode-se, por exemplo, utilizar um MCI a gás natural de grande porte e baixa rotação.

Como exemplo, pode-se citar o equipamento da figura abaixo, o Wäertsilä 20V31SG, de 11.391 kW.



Wärtsilä 31SG

Gas engine generating set

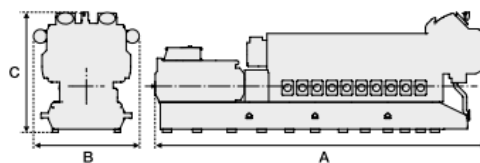


Technical data

Cylinder configurations	20 V
Cylinder bore	310 mm
Piston stroke	430 mm
Engine speed	750 rpm (50 Hz)/720 rpm (60 Hz)
Brake mean effective pressure	30 bar
Mean piston speed	10.8 m/s (50 Hz) /10.3 m/s (60 Hz)

Rated electrical power (kW)

Generating set type	50 Hz	60 Hz
20V31SG	11783 kW	11391 kW



Dimensions (mm) and weights (tonnes)¹

Generating set type	Length (A)	Width (B)	Height (C)	Dry weight +/- 5%
20V31SG	14600	3900	5055	181

Figura 19 - Wärtsilä 20V31SG (Wärtsilä, 2019)

Este motor a gás natural de 20 cilindros dispostos em V possui 181 toneladas, portanto, a instalação e transporte são bem mais complexos, porém, sua rotação de trabalho é de 720 rpm em 60Hz, o que possibilita uma baixa velocidade média de pistão, podendo-se esperar uma boa vida útil e operação mais segura. Além disso, o consumo específico deste tipo de motor costuma ser melhor do que o de motores menores. Portanto, é muito provável que o custo operacional e, conseqüentemente, a viabilidade econômica desta opção sejam melhores do que no caso de múltiplos motores.

4.1.4 Cliente ideal para a solução pronta

Esta solução poderia funcionar muito bem em um cliente com alta demanda de energia elétrica e demandas não tão alta por vapor e água quente. Numa situação como esta, provavelmente o *payback* encontrado seria muito bom. Em outras palavras, é um cliente muito específico e este fato pode explicar a baixa aceitação e poucas oportunidades encontradas para este equipamento no mercado. Vale destacar

também que este é um mercado bastante concorrido e procurar um cliente que necessite exatamente o que a solução pronta oferece pode ser muito mais complicado do que adequar o projeto ao cliente.

Outra indústria que poderia utilizar este equipamento de forma eficiente seria aquela que tem apenas a demanda por energia elétrica, já que o motor a gás deste grupo gerador possui boa eficiência elétrica. Esta, utilizaria apenas o container com a unidade de geração de energia e, neste caso, não se trataria de um projeto de cogeração.

4.2 Alternativas

As alternativas que apresentariam os melhores resultados em uma aplicação como esta são as seguintes:

4.2.1 Bottoming cycle

Como dito anteriormente, devido à alta demanda de carga térmica, poderia ser utilizado o *bottoming cycle* para o dimensionamento. Além da geração convencional com uma turbina a vapor, uma opção que vem sendo discutida ultimamente no mercado é o Ciclo Rankine Orgânico (*ORC – Organic Rankine Cycle*). A figura abaixo, retirada do website da Turboden, fabricante deste produto, mostra como funciona este ciclo.

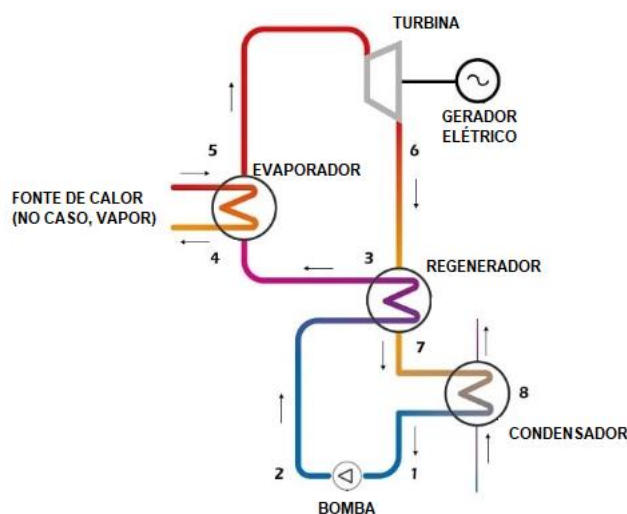


Figura 20 – Ciclo Rankine Orgânico (Turboden, 2019)

O princípio do Ciclo Rankine Orgânico é baseado em um turbogerador trabalhando como uma turbina a vapor convencional para transformar energia térmica em mecânica e, finalmente, em energia elétrica através de um gerador elétrico. Em vez de gerar vapor a partir da água, o sistema ORC vaporiza um fluido orgânico, caracterizado por uma massa molecular superior à da água, o que leva a uma rotação mais lenta da turbina, pressões mais baixas e ausência de erosão das partes metálicas e das lâminas (Turboden, 2019).

Primeiramente, o fluido orgânico é vaporizado no evaporador, a partir da fonte de calor, que neste caso é o próprio vapor do processo. O vapor do fluido orgânico é o que faz a turbina girar e possibilita a geração de energia elétrica. Ao sair da turbina, este fluido passa pelo regenerador, condensador e é bombeado novamente para ser pré-aquecido no regenerador e vaporizado no evaporador, dando início a um novo ciclo (Turboden, 2019).

4.2.2 Topping cycle

Para o estudo de caso realizado, a melhor solução considerando o topping cycle seria a utilização de uma turbina a gás. As maiores desvantagens da turbina a gás se comparada com os motores de combustão interna são:

- Não permite grande modulação de carga;

- Não apresenta boas respostas em partidas e paradas constantes;
- Nas manutenções, leva desvantagem se comparada com a utilização de múltiplos grupos motogeradores, já que estes podem ser parados um por vez enquanto os outros continuam trabalhando.

Como visto no capítulo 4, esta fábrica não necessita de grande capacidade de modulação e nem de partidas e paradas constantes. Portanto, pode-se utilizar a turbina sem problema.

Como exemplo, poderia ser utilizado o grupo gerador da figura abaixo, retirada do catálogo do fabricante (Solar Turbines, 2019). este grupo gerador tem potência elétrica de 11.350 kW. Quando comparada aos motores de combustão interna, a turbina a gás apresenta um menor custo operacional. Além disso, ela apresenta um alto fluxo de gás de escape, o que possibilita gerar uma maior quantidade de vapor na cogeração.



Figura 21 – Turbina a gás da Solar Turbines (Solar Turbines, 2019)

Segundo Çengel e Boles (2013), existem vantagens técnicas ao se utilizar o topping cycle em vez do bottoming cycle, uma vez que as turbinas a gás, em comparação com as turbinas a vapor, apresentam maior potência, alta confiabilidade, vida mais longa e operação mais conveniente.

4.2.3 Considerações finais

Após a realização deste estudo, conforme objetivo inicial deste trabalho, chegou-se à conclusão de que a solução pronta poderia ser melhor aproveitada se apresentasse a flexibilidade de modificar o container com equipamentos de cogeração dependendo da demanda do cliente, oferecendo uma solução com parte pronta e parte customizada.

A ideia de ter uma solução com fácil transporte e instalação é muito boa, porém, sem esta flexibilidade, a gama de clientes onde o produto se encaixaria e apresentaria viabilidade econômica seria muito pequena. Na indústria estudada neste trabalho, por exemplo, não faz sentido algum a utilização deste equipamento. Outro ponto negativo que contribui para um *payback* muito longo é o preço, por ser um equipamento 100% importado. Agregando produtos ou mão-de-obra nacionais, o valor do investimento inicial poderia ser muito menor, porém, mesmo considerando o imposto zero, o *payback* continuaria muito distante, mostrando que, realmente, as principais razões são técnicas.

A principal lição que pode ser retirada dos resultados encontrados neste trabalho é a de que, num mundo altamente globalizado e competitivo, como é a realidade da geração e cogeração de energia com grupos motogeradores, adequar-se às necessidades do cliente, escolhendo a configuração ideal e os produtos adequados, desde o motor de combustão interna com as características corretas até a seleção do equipamento de cogeração, é o que leva o projeto ao sucesso e aumenta a probabilidade de que o mesmo seja técnica e economicamente viável. Escolher um conjunto totalmente inflexível e procurar por um cliente que necessite exatamente desta solução é alterar a ordem natural do processo e torna o sucesso muito mais improvável.

BIBLIOGRAFIA

BALESTIERI, José A. Perella. **Cogeração: Geração Combinada de Eletricidade e Calor**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2002.

MOREIRA, José R. Simões. et al. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. 1 ed. São Paulo: LTC, 2017

ANDREOS, R. **Estudo de viabilidade técnico-econômica de pequenas centrais de cogeração a gás natural no setor terciário do Estado de São Paulo**. 2013. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

MARTENS, A. (1998). **The Energetic Feasibility of CHP Compared to the Separate Production of Heat and Power**. Applied Thermal Engineering. 18. 935-946.

MACHADO, Iara P. Guimarães. **Cogeração: Aspectos ambientais, entraves e perspectivas para sua inserção na matriz energética brasileira**. 2015. 73p. Dissertação (Especialização) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

ENERGIA TÉRMICA. COMGÁS. Disponível em: <<https://www.comgas.com.br/para-industria/energia-termica/>>. Acesso em: 7 de abril de 2019.

GERAÇÃO ELÉTRICA. ABREGÁS. Disponível em: <<https://www.abegas.org.br/geracao-eletrica>>. Acesso em 8 de abril de 2019.

CATÁLOGO DO FABRICANTE. Mitsubishi. Disponível em: <<http://msamotores.com.br/wp-content/uploads/2016/06/MEGANINJA.pdf>>. Acesso em: 08 de abril de 2019.

PECE - ERG003. Apostila de cogeração. Ronaldo Andreos, São Paulo 2018.

CATÁLOGO DO FABRICANTE. WÄRTISILÄ. Disponível em: <<https://www.wartsila.com/docs/default-source/power-plants-documents/downloads/product-leaflets/w31sq-leaflet.pdf>>. Acesso em: 14 de maio de 2019.

THE ORGANIC RANKINE CYCLE TECHNOLOGY. TURBODEN. Disponível em: <<https://www.turboden.com/turboden-orc-technology/1062/the-orc-technology>>. Acesso em: 15 de maio de 2019.

CATÁLOGO DO FABRICANTE. SOLAR TURBINES. Disponível em: <<http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/CM20150703-52095-42932>>. Acesso em: 15 de maio de 2019.

ÇENGEL, Y.; BOLES, M. **Termodinâmica**. 7ed. AMGH Editora Ltda. 2013.

MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES SUL AMERICANA. Total Energy Solution. Apresentação disponibilizada no fórum técnico Mitsubishi-Hitachi Power Systems, 2016.

Resolução Normativa nº 390 de 15 de dezembro de 2009. ANEEL. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2009390.pdf>>. Acesso em 02 de junho de 2019.