

**GUILHERME RIBEIRO**

**PROJETO PRELIMINAR DE COGERAÇÃO APLICADO A UM FORNO  
DE PRODUÇÃO DE VIDRO PLANO**

Guaratinguetá

2015

GUILHERME RIBEIRO

PROJETO PRELIMINAR DE COGERAÇÃO APLICADO A UM FORNO DE  
PRODUÇÃO DE VIDRO PLANO

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.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri

Guaratinguetá

2015

Ribeiro, Guilherme  
R484p Projeto preliminar de cogeração aplicado a um forno de produção de vidro plano / Guilherme Ribeiro – Guaratinguetá : [s.n], 2014.  
54 f. : il.  
Bibliografia : f. 52-54  
Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2014.  
Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri

1. Energia elétrica e calor – Cogeração 2. Vidro – Indústria I. Título

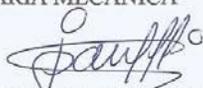
CDU 536.72

PROJETO PRELIMINAR DE COGERAÇÃO APLICADO A UM  
FORNO DE PRODUÇÃO DE VIDRO PLANO

**GUILHERME RIBEIRO**

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

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

PP   
Prof. Dr. MARCELO SAMPAIO MARTINS  
Coordenador

**BANCA EXAMINADORA:**

  
Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI  
Orientador/UNESP-FEG

  
Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI  
UNESP-FEG

  
Prof. Dr. CELSO EDUARDO TUNA  
UNESP-FEG

Fevereiro de 2015

## **DADOS CURRICULARES**

### **GUILHERME RIBEIRO**

FILIAÇÃO

Daniel Luiz Ribeiro

Maria Julia da Silva Ribeiro

2009/2015

Curso de Graduação em Engenharia Mecânica, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

Dedico este trabalho aos meus pais e avós, Daniel, Maria Julia, Lauro e Dalva, pelo imensurável esforço realizado em prol do meu desenvolvimento educacional e como ser humano.

## AGRADECIMENTOS

A toda minha família pela fé em meu potencial e também pelo suporte dado ao longo de minha caminhada,

ao meu irmão Gabriel, pela parceria perfeita ao longo de minha vida,

aos meus primos Lucas, Otto, Pedro, Rafael e Vinicius e tios Lauro e José Antônio pelos bons momentos,

à minha namorada Amanda, pelo companheirismo em todos os momentos,

ao meu tio, o engenheiro mecânico Álvaro Eduardo de Moraes, pela influência e incentivo para a carreira escolhida,

aos meus amigos Caio, Mattei e Bruno, pelo apoio nas dificuldades e pela grande amizade,

aos meus colegas de faculdade, Luís Gustavo Amorim, Luis Felipe Santos, Édson Nogueira Junior por fazerem parte desta etapa tão importante na minha vida,

aos professores Dr. José Antônio Perrella Balestieri e Dr. José Alexandre Matelli, pelo conhecimento passado e pelas lições de vida,

ao departamento técnico da AGC: senhores Carlos Santos, Evangelista Nicolau, Flavio Oliveira, Frederico Sinzato e Massimo Della Porta, pelos ensinamentos que contribuíram imensamente para minha formação acadêmica,

a todos que contribuíram para a realização deste trabalho e para minha formação, de forma direta ou indireta,

a Deus pela saúde, alegria e luz nos momentos obscuros.

“Learn from yesterday, live for today, hope for tomorrow. The important thing is not to stop questioning.”

Albert Einstein

RIBEIRO, G. **Projeto preliminar de cogeração aplicado a um forno de produção de vidro plano**. Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo a realização de um projeto preliminar de cogeração, aplicado na saída de um forno de produção de vidro plano, visando o aproveitamento energético dos subprodutos deste em outras aplicações relevantes na planta. Foram analisados os principais pontos onde poderia ser instalado o ciclo como também analisadas as diversas tecnologias disponíveis para a recuperação de energia. Posteriormente, foi escolhido o ponto e tecnologia a ser projetada, estimando os valores de potência elétrica gerada e rendimento do ciclo. Finalmente foram estimados indicadores econômicos para verificar a viabilidade econômica do projeto.

**PALAVRAS-CHAVE:** Cogeração, Indústria de Vidro, Ciclo Orgânico de Rankine

RIBEIRO, G. **Preliminary cogeneration project applied in a float glass furnace.**  
Undergraduate Work Mechanical Engineering – Faculdade de Engenharia do Campus de  
Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2015.

#### ABSTRACT

The objective of this paper is to realize the preliminary cogeneration project, to be applied on the output of a float glass furnace, aiming the energetic use of the furnace's by-products in other relevant applications on the site. It was analyzed the main points where the cycle could be installed and also the available technologies to energy recovery. After, it was chosen the installation point and the technology to be projected, evaluated the electric power generated and the cycle efficiency. Finally it was evaluated economical indicators in order to verify the project's economical feasibility.

**KEYWORDS:** Cogeneration, Glass Industry, Organic Rankine Cycle

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1 - Ciclo Rankine</b> .....	18
<b>Figura 2 – Ciclo Brayton</b> .....	18
<b>Figura 3 – Ciclo combinado</b> .....	19
<b>Figura 4 - Ciclo Diesel</b> .....	19
<b>Figura 5 – Ciclo Otto</b> .....	20
<b>Figura 6 – Configuração topping para cogeração</b> .....	21
<b>Figura 7 – Configuração bottoming para cogeração</b> .....	21
<b>Figura 8 – Esquema de um forno float de produção de vidro plano</b> .....	22
<b>Figura 9 – O forno float</b> .....	23
<b>Figura 10 – Esquema dos fluxos de gases de combustão e ar de combustão para o forno float</b> .....	24
<b>Figura 11 - APC</b> .....	25
<b>Figura 12 – Esquema de funcionamento do APC</b> .....	26
<b>Figura 13 - Caminho dos gases de combustão com os valores de temperatura e vazão</b> ...	28
<b>Figura 14 - SRC</b> .....	30
<b>Figura 15 - ORC</b> .....	31
<b>Figura 16 – Comportamento no diagrama Txs dos fluidos: (a)úmido, (b)isentrópico e (c)seco</b> .....	34
<b>Figura 17 – Diagrama Txs do fluido R123</b> .....	37
<b>Figura 18 – Ciclo ORC com os estados termodinâmicos dos pontos</b> .....	42
<b>Figura 19 – Propriedades termodinâmicas dos pontos do ORC (<math>T_{g_{in}} = 310\text{ }^{\circ}\text{C}</math>)</b> .....	44
<b>Figura 20 – Propriedades termodinâmicas dos pontos do ORC (<math>T_{g_{in}} = 400\text{ }^{\circ}\text{C}</math>)</b> .....	44
<b>Figura 21 - Ciclo termodinâmico no diagrama Txs</b> .....	45
<b>Figura 22 - Custo do investimento de um ORC x Potência elétrica gerada</b> .....	47
<b>Figura 23 - Payback composto em função do preço da energia elétrica</b> .....	50

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 – Parâmetros energéticos dos possíveis pontos de instalação do ciclo de cogeração .....</b>	<b>29</b>
<b>Tabela 2 - Propriedades de vários fluidos orgânicos para o ORC (spinal point method)</b>	<b>35</b>
<b>Tabela 3 – Propriedades termodinâmicas dos gases de combustão na saída do forno .....</b>	<b>38</b>
<b>Tabela 4 – Propriedades termodinâmicas do ORC – Fluido de trabalho: R123 .....</b>	<b>40</b>
<b>Tabela 5 – Valores adotados de eficiência dos equipamentos utilizados no ORC .....</b>	<b>40</b>
<b>Tabela 6 – Resultados do projeto de cogeração (<math>T_{g_{in}} = 310 \text{ }^{\circ}\text{C}</math>) .....</b>	<b>44</b>
<b>Tabela 7 – Resultados do projeto de cogeração (<math>T_{g_{in}} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}</math>) .....</b>	<b>45</b>
<b>Tabela 8 – Resultados econômicos do projeto de cogeração .....</b>	<b>48</b>

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	OBJETIVOS DO TRABALHO	15
1.2	SINOPSE DO TRABALHO	15
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>16</b>
2.1	COGERAÇÃO	16
2.1.1	Definição e um breve histórico	16
2.1.2	Ciclos disponíveis para a cogeração	17
2.1.3	Configurações para a cogeração	20
2.2	FORNO DE PRODUÇÃO DE VIDRO PLANO	22
2.2.1	Princípio de funcionamento do forno	23
2.2.2	Fatos interessantes no processo <i>float</i> de produção de vidro	24
2.3	AIR POLLUTION CONTROL – APC	25
2.3.1	Princípio de funcionamento do APC	26
<b>3</b>	<b>CASO ESTUDADO</b>	<b>27</b>
3.1	CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO	27
3.2	POSSÍVEIS PONTOS DE INSTALAÇÃO DO CICLO DE COGERAÇÃO	29
3.3	CICLOS PROPOSTOS	30
<b>4</b>	<b>PROJETO PRELIMINAR</b>	<b>32</b>
4.1	ESCOLHA DO PONTO A SER INSTALADO O CICLO DE COGERAÇÃO	32
4.2	ESCOLHA DO CICLO DE COGERAÇÃO	33
4.2.1	Seleção do fluido de trabalho	33
4.3	CONDIÇÕES DE PROJETO	37
4.3.1	Propriedades termodinâmicas dos gases de combustão	38
4.3.2	Propriedades termodinâmicas do ciclo ORC	39
4.3.3	Parâmetros de eficiência dos equipamentos envolvidos	40
4.3.4	Configuração adotada do ciclo ORC	41
4.4	EXECUÇÃO DO PROJETO DE COGERAÇÃO	42
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>43</b>

5.1	RESULTADOS TERMODINÂMICOS .....	43
5.1.1	<b>Discussões – resultados termodinâmicos</b> .....	46
5.2	ANÁLISE ECONÔMICA DO CICLO.....	47
5.2.1	<b>Valor do investimento – ORC</b> .....	47
5.2.2	<b>Disponibilidade do ORC</b> .....	48
5.2.3	<b>Demais parâmetros econômicos</b> .....	48
5.2.4	<b>Cálculo do <i>Payback</i></b> .....	48
5.2.5	<b>Discussões - resultados econômicos</b> .....	49
6	CONCLUSÃO .....	51
6.1	SUGESTÕES PARA ATIVIDADES FUTURAS .....	51
	REFERÊNCIAS.....	52

## 1 INTRODUÇÃO

A partir da década de 1970, quando o mundo enfrentou duas grandes crises do petróleo, foi entendido que os recursos energéticos são finitos. Verificou-se que não era o bastante eliminar os desperdícios flagrantes de energia, mas também e principalmente era necessária a renovação do estilo de desenvolvimento, que implicasse em um perfil mais baixo de demanda energética (BALESTIERI, 2002).

Segundo Tchanche, Pétrissans e Papadakis (2014) o suprimento mundial de energia primária é cerca de 500 EJ, e um terço disto é rejeitado para a atmosfera devido a limitações na conversão (eficiência térmica) de equipamentos e processos. Ainda, devido ao constante aumento do valor da energia elétrica como também da necessidade de uso racional de combustíveis, a análise da viabilidade da instalação de um sistema de cogeração em uma planta industrial deve ser sempre conduzida, tendo em vista potenciais modificações das instalações ou das condições gerais do projeto (oferta e preço de combustíveis e de energia elétrica, estratégias de expansão da empresa, dentre outros).

Também a produção da energia elétrica, ainda que parcial, proporciona uma maior confiabilidade da planta (energia da concessionária elétrica fica de backup), maior eficiência energética e elétrica (minimização das perdas causadas por transporte e distribuição), além da possibilidade da disponibilidade de água/ar quente para processos fabris, com possível redução dos custos das utilidades da empresa (vapor, água quente, ar comprimido, dentre outros), tornando a planta cada vez mais competitiva no mercado.

Especificamente na indústria de produção de vidro, onde existe um alto consumo de combustíveis para suprir a necessidade deste processo de alta temperatura, a eficiência térmica fica entre 25-45 %, enquanto que um terço da potência térmica total de entrada sai pela chaminé do forno na forma de gases, em uma faixa de temperatura de 350-500 °C (HNAT; COLES, 1885).

## 1.1 Objetivos do trabalho

O objetivo geral deste trabalho é elaborar o projeto preliminar de um sistema de cogeração a ser aplicado na saída dos gases de combustão de um forno float de produção de vidro plano, localizado no Brasil, visando o aproveitamento energético de subprodutos em outras aplicações relevantes na planta, bem como a capacidade de autoprodução de energia elétrica, ainda que parcial. Também, estimar os indicadores econômicos do projeto como o *Payback*, a fim de verificar a viabilidade econômica do mesmo.

## 1.2 Sinopse do Trabalho

No Capítulo 1 são apresentadas as motivações em se executar este trabalho, bem como os objetivos traçados para tanto.

O Capítulo 2 é abordado: o conceito de cogeração (breve histórico e características), o princípio de funcionamento de um forno float de produção de vidro plano, elencando seus principais componentes e parâmetros mecânicos e térmicos, e finalmente é feita uma breve explanação sobre a função e o funcionamento de um APC (Air Pollution Control), equipamento amplamente utilizado em fornos industriais no tratamento ambiental dos gases de saída.

No Capítulo 3 é introduzido o caso estudado, apresentando suas características quanto à localização, fluxos térmicos e processos envolvidos.

O projeto preliminar (análise e escolha do ponto de instalação e tecnologia de cogeração a ser adotada) é abordado no Capítulo 4.

O Capítulo 5 trata dos resultados técnicos (energia elétrica gerada, por exemplo) e econômicos, e faz uma análise de viabilidade do projeto.

A conclusão do trabalho como também sugestões para trabalhos futuros neste campo são apresentados no Capítulo 6.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Cogeração

#### 2.1.1 Definição e um breve histórico

A definição básica de cogeração é a geração combinada de energias térmica e eletromecânica a partir de uma mesma fonte primária. Sua origem está intimamente ligada ao desenvolvimento de sistemas para conforto térmico de ambientes (BALESTIERI, 2002).

A primeira prática da cogeração está associada os chamados *smokejacks*, um sistema de elevação a partir de gases quentes (uma espécie de turbina acionada pelo ar quente que sobe pela chaminé). A introdução deste sistema se dá por volta do século 14 na Europa. Também, é citado por diversas referências o uso dos *smokejacks* na Alemanha e Itália no século 16 e do inglês John Evelyn em 1685, onde afirmava ter um desses há mais de cem anos em sua casa. Em 1758, Benjamin Franklin sugeriu o uso desses sistemas para produzir energia no verão a partir da ventilação natural das chaminés (BALESTIERI, 2002).

Alguns fatos interessantes ao longo da história mais recente são apresentados a seguir:

- 1870: Início do desenvolvimento moderno da cogeração, a partir do uso de máquinas a vapor de eixo alternativo acopladas a geradores elétricos, em áreas urbanas com alta densidade populacional. A cogeração é associada com o aquecimento de ambientes;
- 1909: Apenas 150 sistemas de aquecimento de ambientes, e em sua maioria operados com eficiência baixa;
- Décadas 1920 – 1930: Desenvolvimento de sistemas de calefação de ambientes na Europa, principalmente em países do Norte e países do “bloco comunista”;
- Década 1970: A crise do petróleo e a grande resistência por parte dos grupos ambientais às formas de geração nuclear impulsionam o desenvolvimento e aplicação dos sistemas de cogeração;
- Décadas 1980 – 1990: Na Europa e Estados Unidos, a cogeração responde por um grande número de aplicações, em diversos setores, em sistemas de pequeno e grande

porte. A cogeração se consolida através de várias regulamentações governamentais (BALESTIERI, 2002).

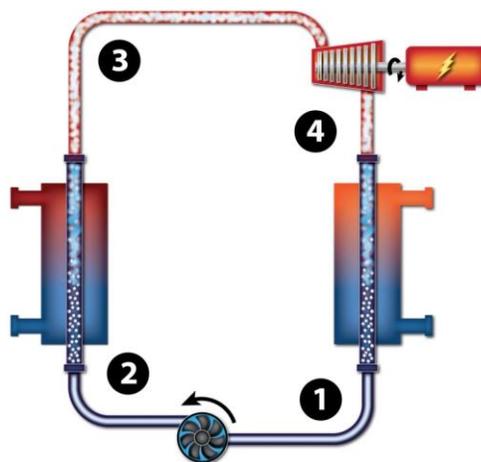
Comparando a cogeração com o modo convencional (e separado) de se obter as energias térmica e eletromecânica, a diminuição do consumo de combustíveis de acionamento e o aumento do rendimento global do ciclo termodinâmico são fatores que impulsionam esta prática no atual panorama de desenvolvimento industrial.

### **2.1.2 Ciclos disponíveis para a cogeração**

De acordo com Balestieri (2002) e Orlando (1991), os principais ciclos utilizados para configurações de centrais de cogeração são:

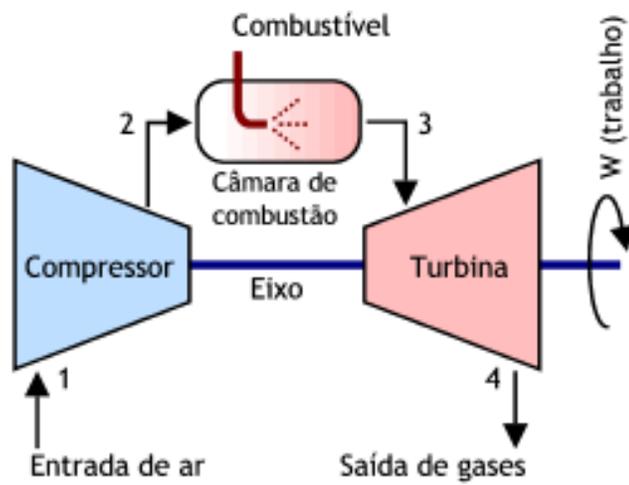
- Ciclo Rankine – Figura 1;
- Ciclo Brayton ou a gás – Figura 2;
- Ciclo Combinado (mais utilizado: acoplamento de ciclo a gás com caldeiras de recuperação) – Figura 3;
- Ciclo Diesel – Figura 4;
- Ciclo Otto – Figura 5.

Figura 1 - Ciclo Rankine



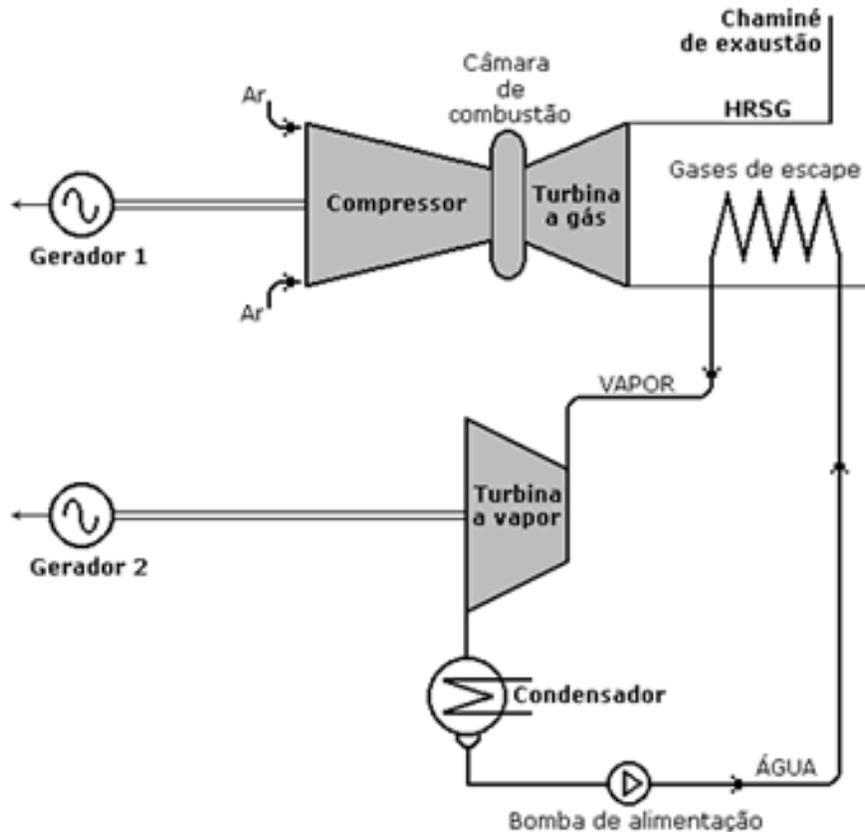
(Fonte: G-TET – site)

Figura 2 – Ciclo Brayton



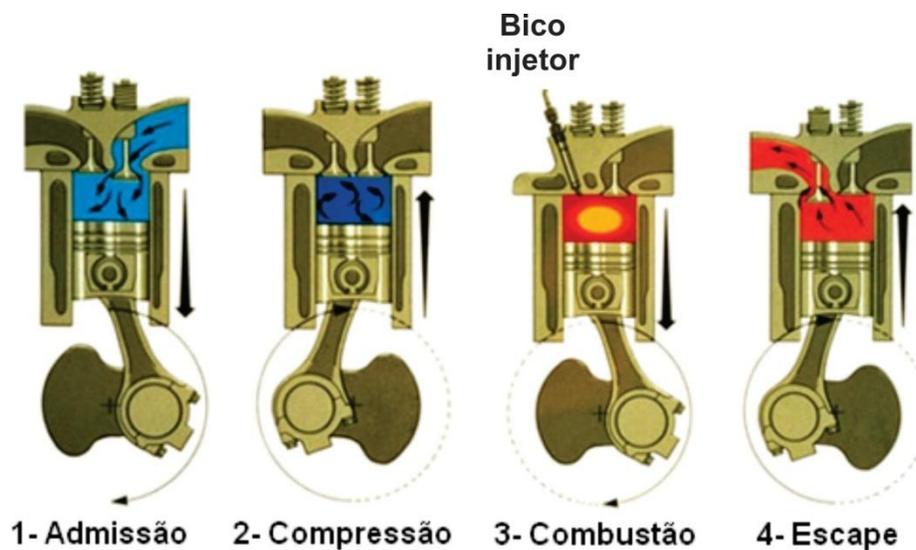
(Fonte: MSPC – site)

Figura 3 – Ciclo combinado



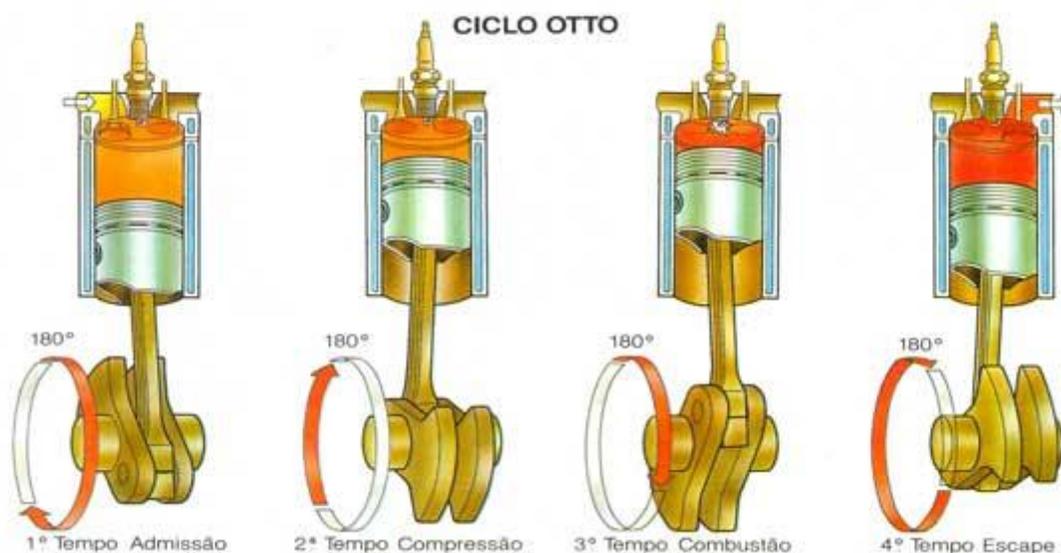
(Fonte: PANTANAL ENERGIA – site)

Figura 4 - Ciclo Diesel



(Fonte: MÁQUINAS E MOTORES UTILIZADOS NA PESCA – site)

Figura 5 – Ciclo Otto



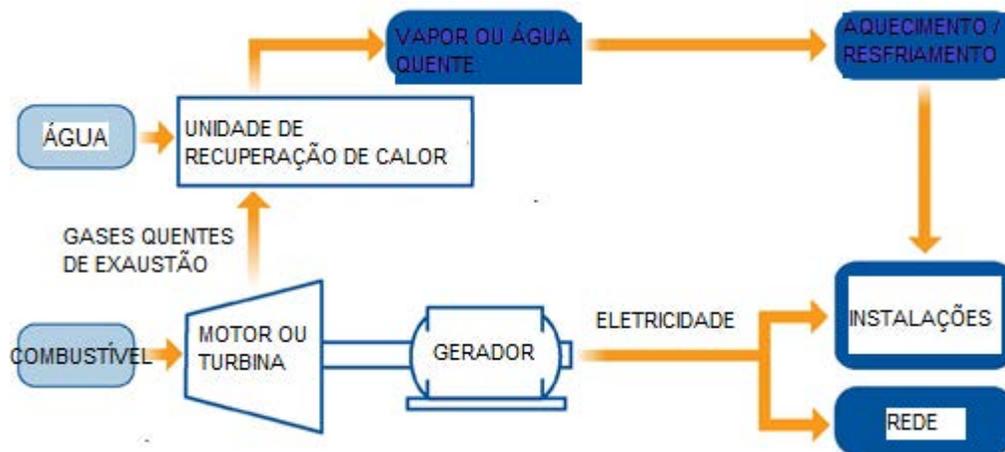
(Fonte: LOKOLAMAS OFF-ROAD – site)

### 2.1.3 Configurações para a cogeração

Existem duas configurações que são adotadas na utilização da cogeração, que se diferenciam com relação à sequência de geração de energia eletromecânica e térmica (BARJA, 2006). São elas:

- Configuração *Topping*: A energia do combustível de acionamento é primeira utilizada para geração de energia eletromecânica, e a parcela não aproveitada (calor residual) é utilizada para geração de energia térmica. A Figura 6 a seguir apresenta um esquema desta configuração.

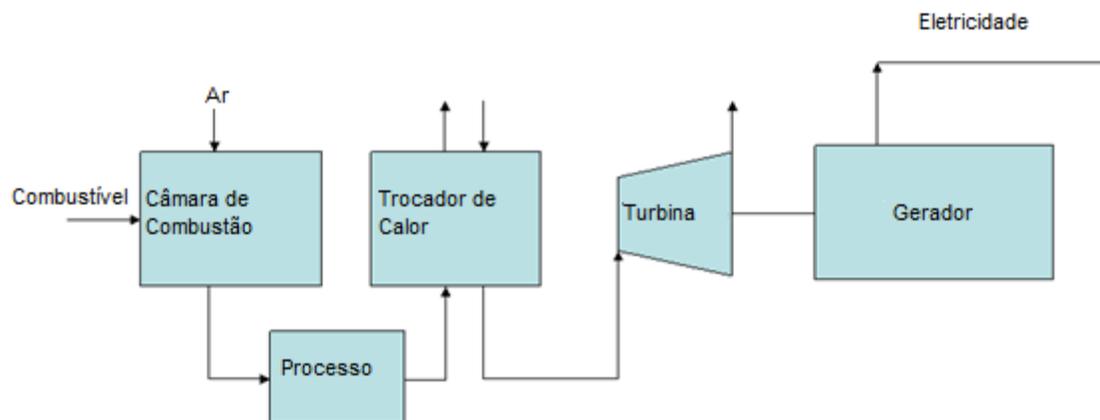
Figura 6 – Configuração topping para cogeração



(Fonte: BGD – site - Adaptado)

- Configuração *Bottoming*: A energia do combustível é utilizada para a geração de energia térmica e o calor residual deste processo é recuperado para a geração de energia eletromecânica (Vide Figura 7).

Figura 7 – Configuração bottoming para cogeração

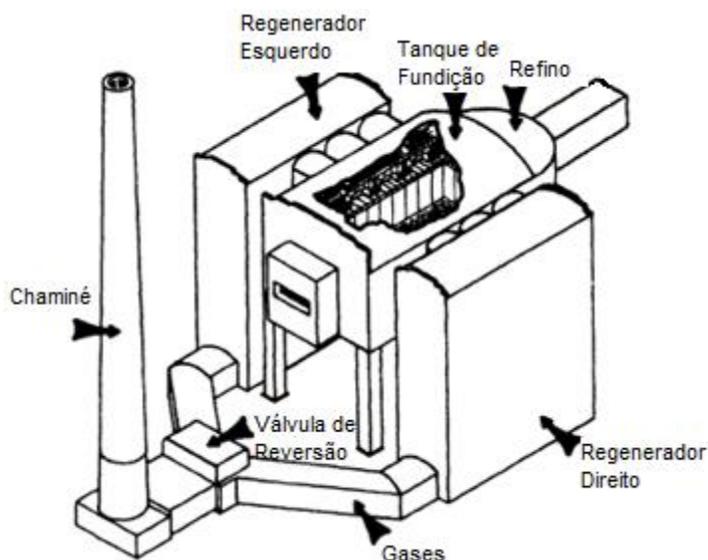


(Fonte: GOTOKNOW – site - Adaptado)

## 2.2 Forno de produção de vidro plano

A Figura 8 apresenta um esquema de um forno de produção de vidro plano, o forno *float*. O forno consiste em uma câmara de fundição (*Melt Tank* ou *Furnace Melting*), dois regeneradores (trocadores de calor) nos dois lados da câmara de fundição, uma válvula de reversão conectada aos regeneradores, dutos de gases quentes conectando a válvula de reversão à chaminé, e um soprador (ventilador) de ar que entrega ar para a válvula de reversão (HNAT; COLES, 1985).

Figura 8 – Esquema de um forno *float* de produção de vidro plano



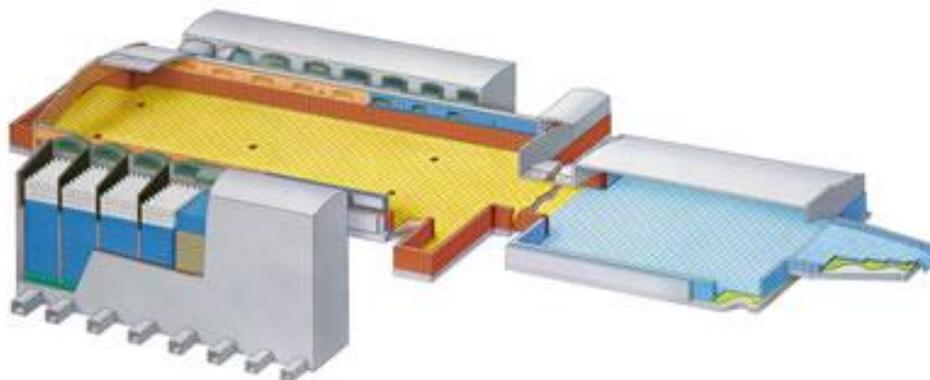
(Fonte: HNAT; COLES, 1985 - Adaptado)

A Figura 9 apresenta outro esquema do forno *float*. O nome *float* se da ao fato de que o vidro fundido é vazado para o estanho líquido, formando assim uma “folha” de vidro plana e com um alto controle de espessura. Um forno *float* tem geralmente 10 m de largura, 50 m de comprimento e armazena em média 1000 toneladas de vidro fundido. Existem mais de 260 plantas em operação com a produção de vidro plano através desta tecnologia. Dentre as principais características pode ser destacadas:

- Processo contínuo (24 horas/dia – 7 dias/semana);
- Poucas etapas no processo de produção;

- Complexo (alto nível de exigência de parâmetros de processo);
- Processo que utiliza uma alta taxa de energia;
- Vida útil média de 18 anos.

**Figura 9 – O forno *float***

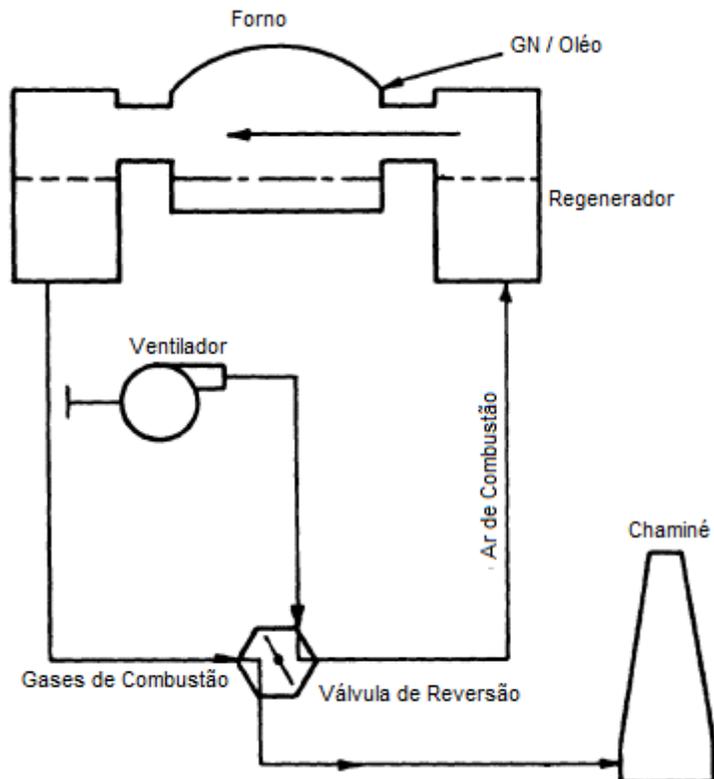


(Fonte: SEFPRO – site)

### 2.2.1 Princípio de funcionamento do forno

A Figura 10 apresenta um esquema do fluxo de gases de combustão e do ar para o processo no forno. A queima ocorre no forno em ciclos alternados de 20 – 30 minutos, em um de seus lados. O ar de combustão é transportado pelo ventilador para a válvula de reversão, aonde vai para um dos regeneradores e é pré-aquecido. O ar pré-aquecido entra no forno através dos pórticos, que conectam os regeneradores ao forno. O gás natural é injetado perto dos pórticos para que sejam desenvolvidas chamas longas, se estendendo em toda a largura do forno. Os gases de combustão (produtos da combustão – *Flue Gas*) saem do forno pelo lado oposto, passando pelo regenerador deste lado. Uma parcela de energia térmica dos gases é absorvida pelo regenerador para que seja possível o pré-aquecimento do ar de combustão no próximo ciclo do forno. Ao fim do ciclo, a válvula de reversão comuta sua posição, e um novo ciclo é iniciado, porém as direções do ar de combustão e dos gases são invertidas.

Figura 10 – Esquema dos fluxos de gases de combustão e ar de combustão para o forno *float*



(Fonte: HNAT; COLES, 1985 - Adaptado)

### 2.2.2 Fatos interessantes no processo *float* de produção de vidro

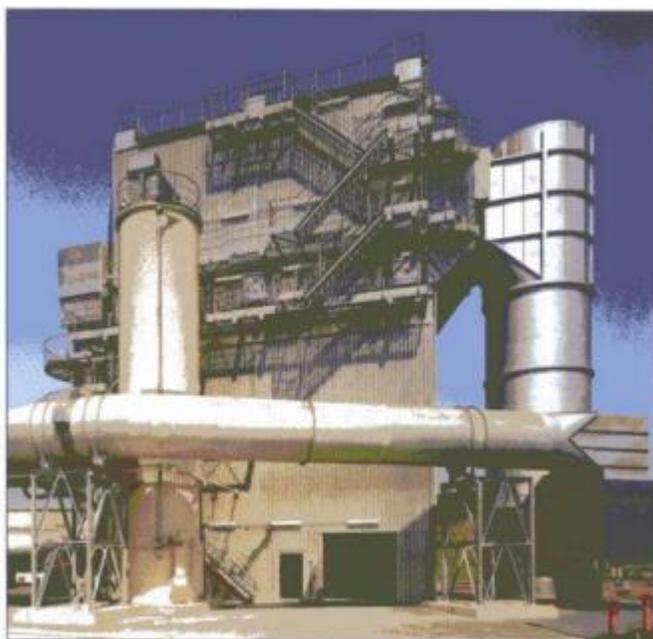
Alguns fatos interessantes podem ser apontados com relação a este processo de produção de vidro plano, são eles:

- Um forno com a produção de 500 toneladas/dia contém 1600 toneladas de vidro a todo tempo;
- Em um dia um forno usa gás natural o suficiente para aquecer 14400 casas, energia elétrica para alimentar 6700 casas e água para suprir 667 casas;
- Se não cortada, a folha de vidro teria o comprimento de 20 km em um dia de produção.

### 2.3 Air Pollution Control – APC

O *Air Pollution Control* ou APC (Figura 11) é um processo de tratamento de gases industriais, comumente aplicado na saída de fornos de combustão, com o intuito de diminuir as concentrações de poluentes enviados a atmosfera, a fim de contribuir para o meio ambiente e também enquadrar as emissões de gases da indústria em questão nas normas ambientais vigentes no país.

Figura 11 - APC



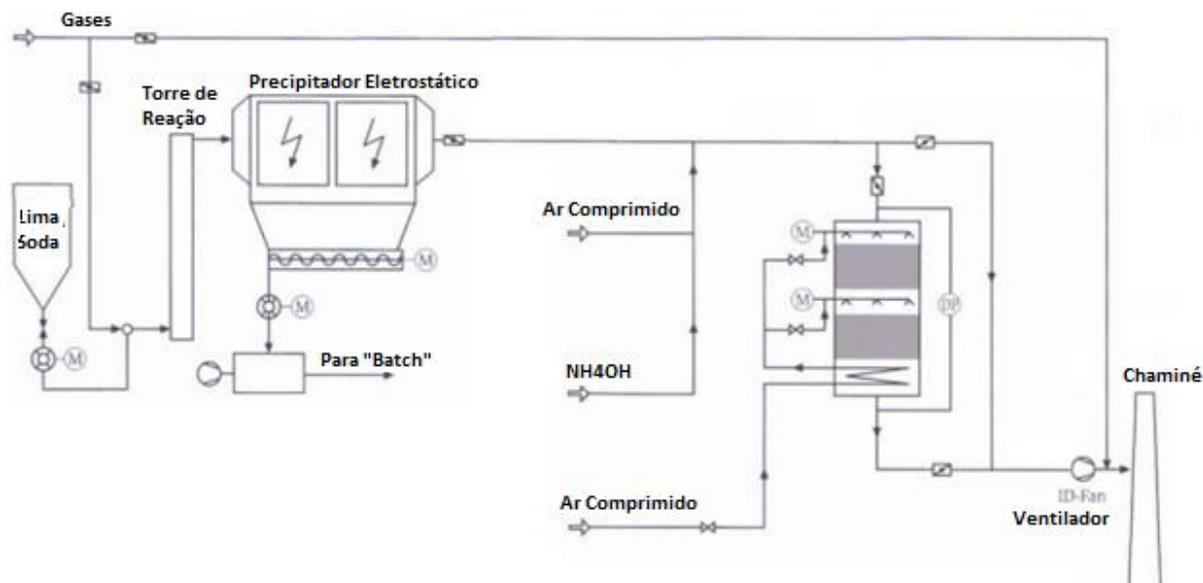
(Fonte: GEA – site)

### 2.3.1 Princípio de funcionamento do APC

A Figura 12 esquematiza o caminho dos gases de saída no APC. O processo de tratamento de gases pode ser dividido em três etapas principais:

- Reator DeSO<sub>x</sub> - Através da injeção de soda ou lima (reagentes) é diluído pó corrosivo e pegajoso do forno e também é absorvido os componentes ácidos dos gases (SO<sub>x</sub>);
- Precipitador Eletrostático (ESP) – Os produtos de reação do DeSO<sub>x</sub> e o pó do forno são eletricamente carregados e, em seguida, separados dos gases;
- Sistema DeNO<sub>x</sub> (SCR) – A inserção de hidróxido de amônia como agente de redução, e é reduzida a concentração de NO<sub>x</sub> dos gases na saída da chaminé.

Figura 12 – Esquema de funcionamento do APC



(Fonte: GEA – site – Adaptado)

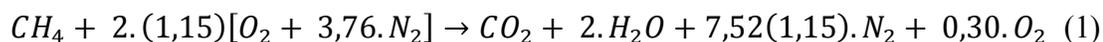
Após as três etapas, os gases são levados à chaminé com pelo ventilador de tiragem reduzida (*ID Fan*).

### 3 CASO ESTUDADO

A seguir é apresentado o projeto preliminar de cogeração, identificando as características do processo, os fluxos e parâmetros térmicos envolvidos, os pontos em potencial para a instalação do ciclo e as tecnologias viáveis para a recuperação de energia.

#### 3.1 Características do processo

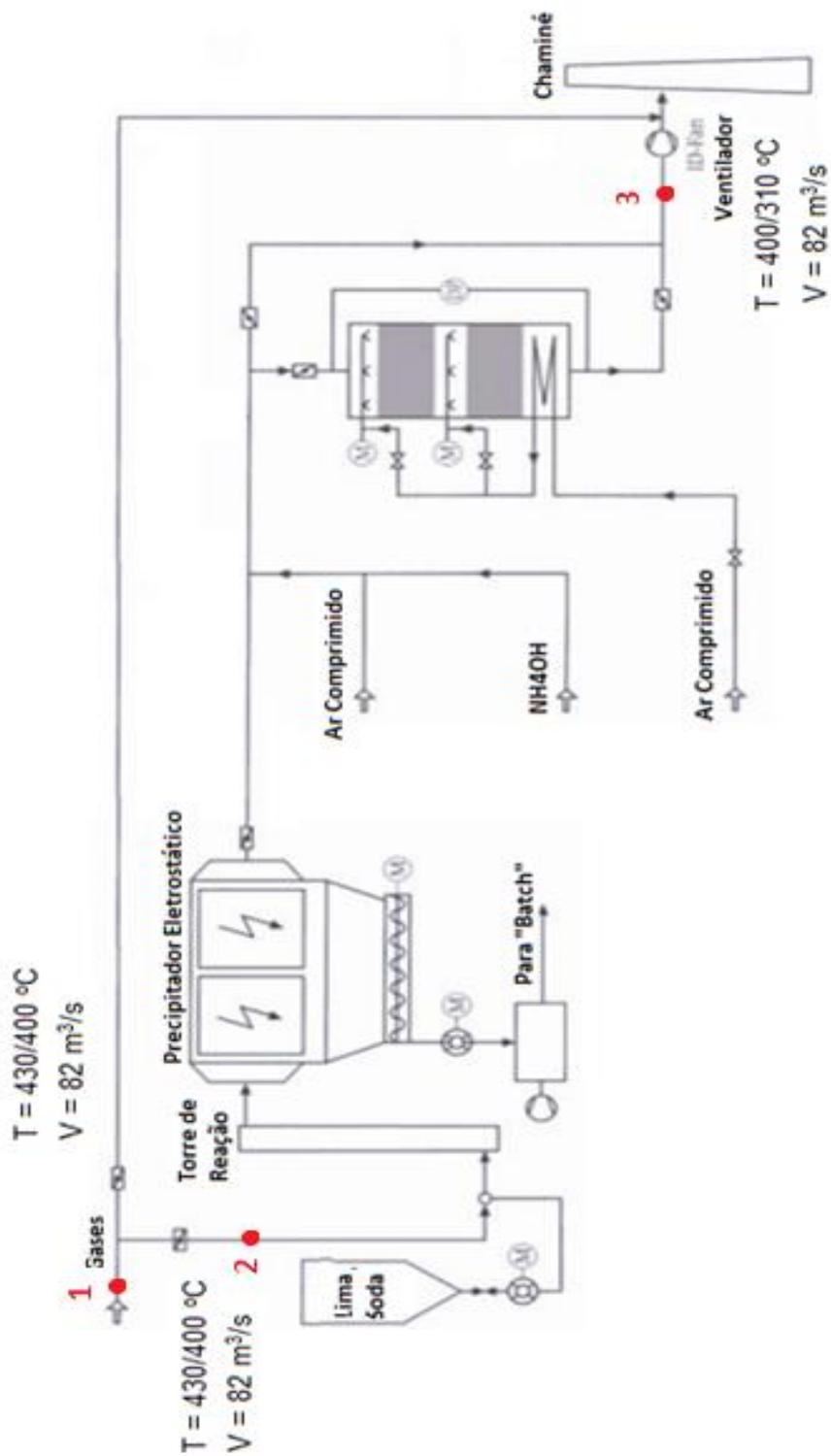
No caso em questão, o forno de produção do vidro plano utiliza gás natural para a fusão da matéria prima. Sendo assim, para este estudo é analisado que os gases de saída do forno são compostos pelo produto da combustão de 100% do gás natural. Desta forma, os produtos da combustão se apresentam da seguinte forma, considerando combustão completa e excesso de 15% de ar:



Assim, todas as propriedades termodinâmicas necessárias para este estudo com relação aos gases de combustão são calculadas com bases na composição química apresentada na Equação (1).

A partir da Figura 13 pode ser verificada a saída do forno, como também o APC por onde os gases de combustão passam antes de alcançar a chaminé, com os valores de temperatura e vazão dos pontos principais.

Figura 13 - Caminho dos gases de combustão com os valores de temperatura e vazão



(Fonte: GEA – site – Adaptado)

Alguns aspectos importantes com relação à operação e manutenção do APC devem ser citados:

- A vazão dos gases de combustão é de 82 m<sup>3</sup>/s e é mantida constante pelo ventilador de tiragem controlado por inversor de frequência;
- Em uma situação de manutenção corretiva emergencial, o APC pode ser desativado, e os gases podem ir direto do forno para a chaminé (APC em *bypass*);
- Devido ao fato de ser um processo que excede as exigências ambientais vigentes no Brasil, o APC pode operar com o SCR em *bypass*, caso seja necessária uma manutenção ou em alguma situação oportuna programada.

### 3.2 Possíveis pontos de instalação do ciclo de cogeração

Podem ser identificados três pontos possíveis para a instalação do ciclo de cogeração (apontados na Figura 13): saída do forno antes do APC (Ponto 1), entrada do APC (Ponto 2) e na saída do APC antes do ventilador (Ponto 3). Suas identificações e os parâmetros energéticos de cada ponto são apresentados na Tabela 1. Os valores de temperatura, pressão e vazão foram medidos com o auxílio de instrumentos instalados *in loco* no processo e condições de projeto dos equipamentos.

**Tabela 1 – Parâmetros energéticos dos possíveis pontos de instalação do ciclo de cogeração**

Identificação	Ponto	Temperatura [°C]	Pressão Absoluta [kPa]	Fluxo [m <sup>3</sup> /s]
1	Saída do Forno	430 – 400	-	82
2	Entrada do APC	430 – 400	99,04	82
3	Saída do APC	400 – 310	99,04	82

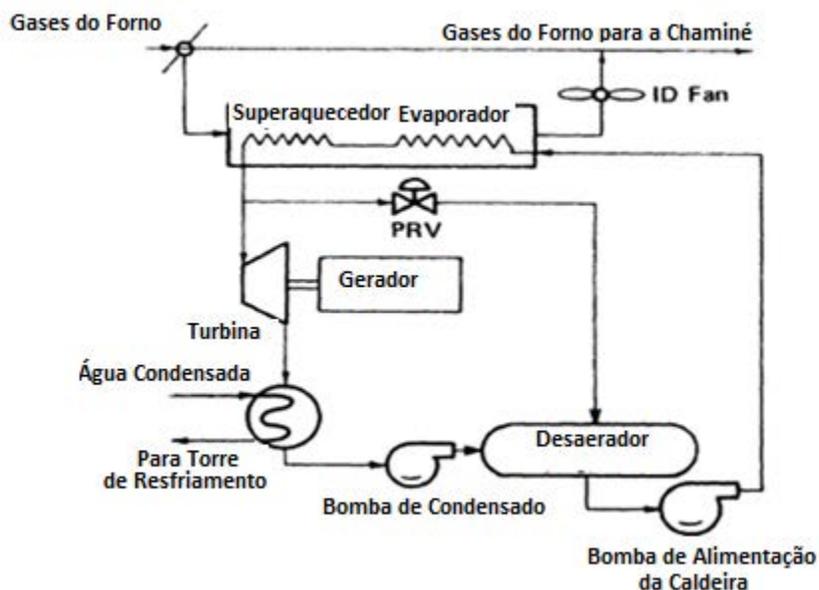
(Fonte: Autor)

### 3.3 Ciclos propostos

São propostos dois tipos de ciclos:

- Ciclo a vapor de Rankine (*Steam Rankine Cycle – SRC*) – Figura 14: Utiliza a água como fluido de trabalho. A água bombeada é superaquecida na caldeira de recuperação e é expandida na turbina, onde é gerada a energia eletromecânica. Após este processo, a água é resfriada no condensador até atingir a condição inicial do ciclo (entrada da bomba).

Figura 14 - SRC



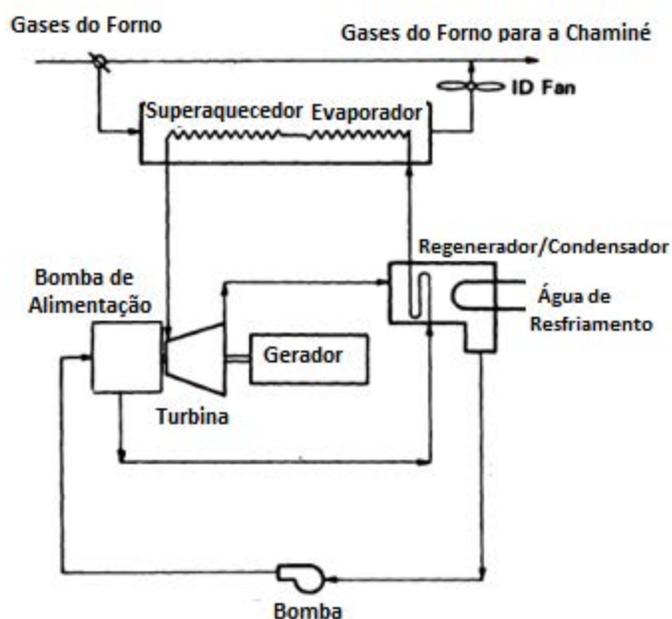
(Fonte: HNAT; COLES, 1985 - Adaptado)

Dentre as principais vantagens na utilização do SRC, podem ser citadas (QUOILIN et al., 2013):

- Fluido de trabalho de baixo custo;
- Fluido de trabalho de nenhum impacto ambiental;
- Fluido de trabalho não tóxico e não inflamável;
- Baixo consumo da bomba;
- Fluido de trabalho com alta estabilidade química.

- Ciclo orgânico de Rankine (*Organic Rankine Cycle – ORC*) – Figura 15: Utiliza um fluido orgânico como fluido de trabalho. O fluido bombeado atinge a condição de saturado seco ou superaquecido na caldeira de recuperação, se expande na turbina gerando energia e é condensado até a condição inicial do ciclo (entrada da bomba).

Figura 15 - ORC



(Fonte: HNAT; COLES, 1985 – Adaptado)

As vantagens na utilização de um ciclo de cogeração ORC são (QUOILIN et al., 2013):

- Não é necessário o superaquecimento, dependendo do fluido utilizado;
- Temperatura de entrada da turbina baixa em relação ao SRC;
- Pressão baixa de evaporação;
- Não há a necessidade de tratamento de água;
- Temperatura baixa da fonte de recuperação de calor em relação ao SRC;
- Caldeira de um passe;
- Menor custo da turbina (concepção mais simples).

## 4 PROJETO PRELIMINAR

O projeto se inicia com a análise e definição do ponto a ser instalado o ciclo, da tecnologia (ciclo) a ser instalada, definindo suas características e por fim da identificação dos parâmetros do processo e também das propriedades termodinâmicas e valores necessários para a execução dos cálculos termodinâmicos e econômicos. É importante ressaltar que todos os valores de propriedades termodinâmicas, cálculos do ciclo e dos indicadores econômicos foram realizado no *software Engineering Equation Solver (EES)*, para que seja alcançada uma maior precisão e otimizado o tempo de execução.

### 4.1 Escolha do ponto a ser instalado o ciclo de cogeração

A analisar a Tabela 1, verifica-se que os pontos 1 e 2 apresentam uma maior vantagem no quesito de aproveitamento energético com relação ao ponto 3. Todavia, a análise *in loco* do processo foi de suma importância, e algumas limitações nestes pontos foram identificadas:

- Ponto 1 – Saída do forno: a instalação do ciclo é muito complicada, pois para a instalação de um trocador de calor, seria necessária a furação da parede de metal mais o refratário, que compõem o duto de saída do forno que contém um fluxo contínuo de gases de combustão 24 horas por dia. Além disso, não há nenhuma possibilidade de parada total do ciclo para manutenção, pois neste ponto não há maneira de desviar o fluxo de gases.
- Ponto 2 – Entrada do APC: para que o APC funcione sem danos aos equipamentos é necessário que a temperatura em sua entrada seja de 310 °C. Dessa maneira, o aproveitamento energético deste ponto (como também do ponto 1) é muito pequeno.

Portanto, o ponto 3 foi escolhido para a instalação do ciclo.

## 4.2 Escolha do ciclo de cogeração

Após a análise das vantagens de cada ciclo proposto apresentado no item 3.3, verificou-se que apesar da maior eficiência de ciclo apresentada pelo SRC, a necessidade de maior pressão e temperatura na entrada da turbina além do tratamento de água teria um forte impacto econômico na escolha do ciclo. Além das vantagens já apresentadas pelo ORC anteriormente, o fluido orgânico tem uma grande vantagem mecânica sobre a água: as moléculas da água são menores que as do fluido orgânico. Como consequência elas se movem mais rápido e são perigosas para as partes metálicas em contato com o fluido (erosão metálica) e levam a maiores tensões mecânicas. Também, segundo Stijepovic et al. (2011), fluidos com maior peso molecular resultam numa turbina mais eficiente.

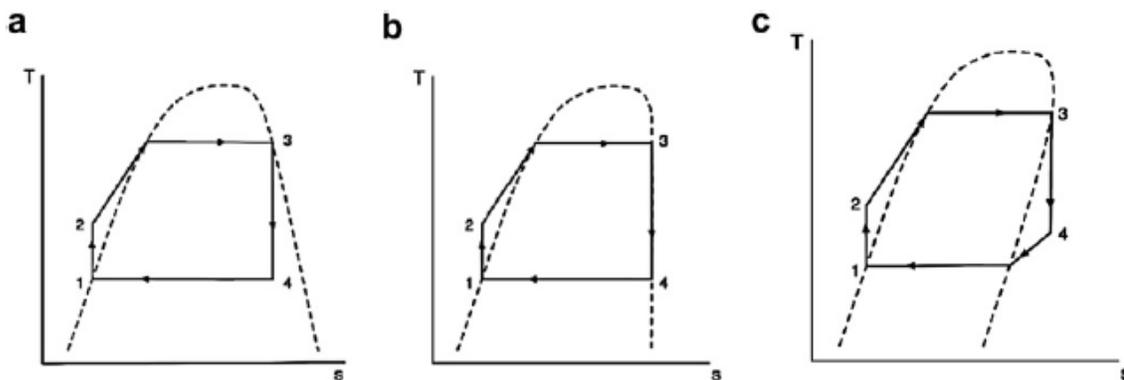
Ainda, segundo Hnat e Coles (1985) e Campana et al. (2013), para a recuperação de fontes de calor na faixa de 200 – 400 °C, o ORC possui a melhor performance, além de permitir uma maior flexibilidade com relação a carga de trabalho. Então, foi escolhido o ORC para este projeto.

### 4.2.1 Seleção do fluido de trabalho

Para dar prosseguimento ao projeto (cálculos termodinâmicos), é necessária a escolha do fluido orgânico de trabalho do ORC. De acordo com Xu e Yu (2014) e Qiu (2012), algumas características dos fluidos orgânicos devem ser levadas em conta na escolha do fluido de trabalho. Elas são brevemente descritas a seguir:

- O fluido selecionado não pode estar proibido para uso por regulamentações nacionais;
- O fluido deverá ter uma alta diferença de entalpia na turbina (maior energia gerada/maior rendimento do ciclo);
- O fluido deve ser de fácil manuseio a temperatura ambiente;
- Fluidos isentrópicos e secos (“*dry*”) são preferíveis para o ORC que os fluidos denominados úmidos (“*wet*”) por não necessitarem de superaquecimento. A Figura 16 apresenta a diferença entre os três tipos de fluidos citados.

Figura 16 – Comportamento no diagrama Txs dos fluidos: (a) úmido, (b) isentrópico e (c) seco



(Fonte: QIU, 2012)

- Valores de calor latente altos acarretam em equipamentos menores para a bomba, evaporador e condensador;
- Propriedades termofísicas como: estabilidade química, condutividade térmica alta, baixa viscosidade e pressões baixas de trabalho do ORC são preferíveis no fluido de trabalho;
- A respeito da segurança, é necessário que fluido tenha uma baixa toxicidade (ou nenhuma), baixa taxa de corrosão e também baixa (ou nenhuma) inflamabilidade;
- Preço baixo e alta disponibilidade.

Oito dos fluidos orgânicos mais utilizados na última década foram escolhidos para a comparação e escolha. Utilizando os critérios elencados por Qiu (2012) (*the bucket effect* e *spinal point method*), estes fluidos foram analisados e o resultado, bem como as propriedades e características de cada fluido são apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2 - Propriedades de vários fluidos orgânicos para o ORC (*spinal point method*)**

Fluidos	R134a HFC-134a	Isobutano R600a HC-600a	R245fa HFC-245fa	R123 HCFC-123	PF5050 PFC-5050	HFE7000 C <sub>3</sub> F <sub>7</sub> OCH <sub>3</sub>	n-pentano R601 HC-601	HFE7100 C <sub>4</sub> F <sub>9</sub> OCH <sub>3</sub>
Formula	CH <sub>2</sub> FCF <sub>3</sub>	CH(CH <sub>3</sub> ) <sub>3</sub>	CF <sub>3</sub> CH <sub>2</sub> CHF <sub>2</sub>	CHCl <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	(CF <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (CF <sub>2</sub> ) <sub>3</sub>	C <sub>3</sub> F <sub>7</sub> OCH <sub>3</sub>	C <sub>5</sub> H <sub>12</sub>	C <sub>4</sub> F <sub>9</sub> OCH <sub>3</sub>
Peso Molecular	102	58	134	153	288	200	72	250
Tipo, $\xi(=ds/dT)$	-0,39 isentrópico	1,03 seco	0,19 isentrópico	0,12 isentrópico	>0 seco	>0 seco	1,28 seco	1,83 seco
T Ebulição, °C	-26,3 (1)	-11,7 (2)	15,3 (4)	27,8 (5)	30 (5)	34 (5)	36 (4)	61 (4)
T Crítica, °C	101,5 (2)	134,7 (3)	157,5 (5)	183,7 (4)	150 (5)	165 (5)	196,5 (4)	195,3 (4)
P Crítica, MPa	4,06 (2)	3,64 (3)	3,64 (3)	3,66 (3)	2,13 (5)	2,48 (5)	3,36 (4)	2,23 (5)
Calor Latente, kJ/kg	155,4 (3)	303,4 (5)	177,1 (3)	168,4 (3)	88 (2)	142 (3)	349 (5)	112 (2)
ODP <sup>a</sup>	0 (5)	0 (5)	0 (5)	0,02 – 0,06 (4)	0 (5)	0 (5)	0 (5)	0 (5)
GWP <sup>b</sup>	1300 (2)	3 (4)	1030 (2)	120 (4)	Alto (1)	370 (3)	20 (4)	390 (3)
Inflamável, TAI, °C <sup>c</sup>	NI 770 (5)	Altamente 460 (1)	NI 412 (5)	NI 730 (5)	NI n/a (4)	Sim 415 (4)	Altamente 260 (1)	Sim 405 (4)
Toxicidade <sup>d</sup>	A (5)	B (1)	B (3)	B (3)	Baixa (5)	Baixa (5)	A (3)	Baixa (5)
Estabilidade Térmica	Estável (5)	Estável (5)	Aceitável (4)	Estável (5)	Estável (5)	Estável (5)	Estável (5)	Estável (5)
Total de Pontos	30	29	34	36	37	40	35	37
Ranking de Preferência	7	8	6	4	2	1	5	2

<sup>a</sup> ODP – Potencial de deteriorização da camada de ozônio, ODP para R11 = 1,0.

<sup>b</sup> GWP – Potencial de aquecimento global, GWP para CO<sub>2</sub> = 1,0.

<sup>c</sup> Preferencialmente não-inflamável (NI), levemente inflamável (LI) pode ser aceitável, TAI – Temperatura de auto-ignição.

<sup>d</sup> ASHARE standard 34: A – toxicidade mais baixa; B – toxicidade mais alta.

**(Fonte: QIU, 2012 – Adaptado)**

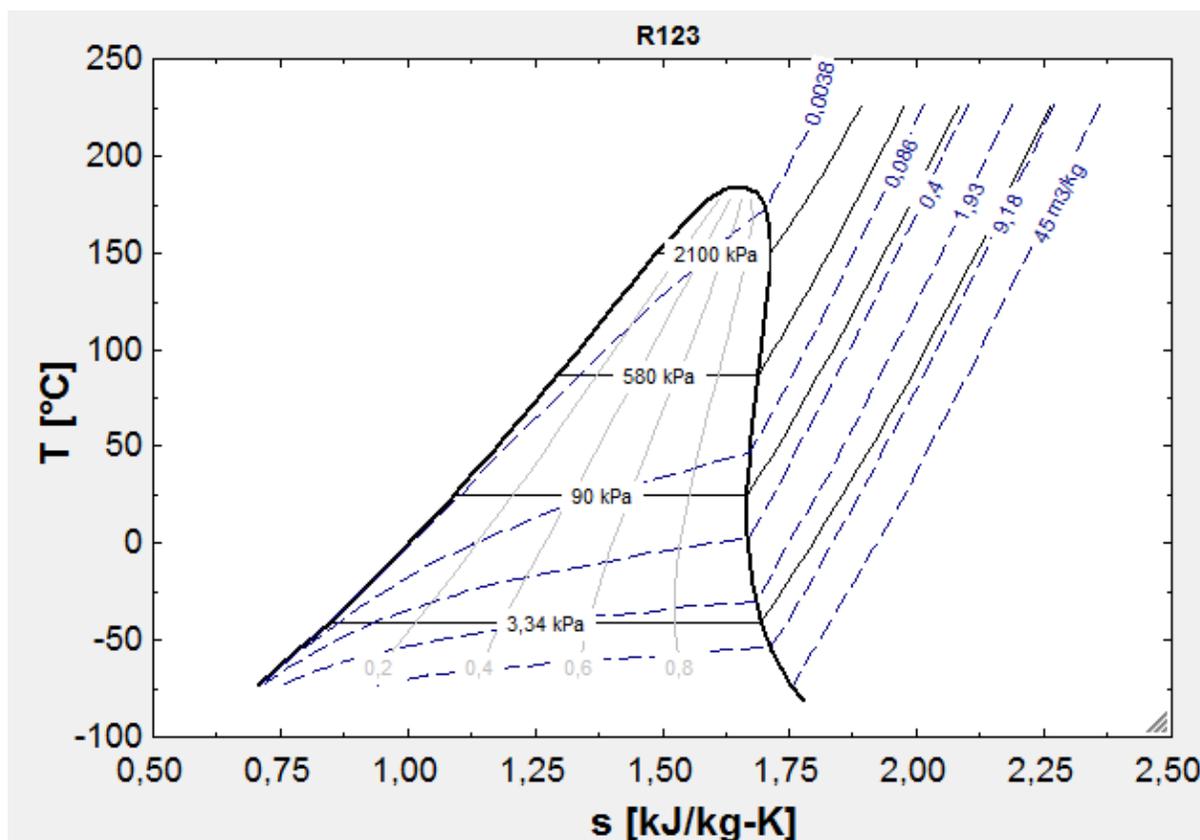
Analisando a Tabela 2, de acordo com o *spinal point method*, verifica-se que o fluido HFE7000 tem o maior número de pontos no conjunto. Porém, devido ao fato de cada projeto de cogeração ser distinto de outro, obviamente este fluido não será o mais indicado em todos os casos. É preciso que o projetista escolha qual(is) propriedades e características mais relevantes para sua situação, e a partir daí escolha o fluido que mais se enquadra.

Neste caso, os pontos mais relevantes e que foram determinantes na escolha do fluido são apresentados a seguir, em ordem decrescente de importância:

- Tipo do fluido – uma vez que todos os fluidos analisados eram ou isentrópicos ou seco, apenas fica esclarecida a alta importância deste ponto na escolha do fluido;
- Flamabilidade e temperatura de autoignição – Com o intuito de assegurar um sistema de alto nível de segurança para os operadores e também os colaboradores que trabalham próximos ao ciclo, é necessário que o risco de explosão/incêndio seja mínimo, se possível nulo;
- Valores baixos dos indicadores ambientais ODP e GWP – A tendência para o futuro é que os indicadores ambientais sejam fatores determinantes na implementação de sistema e processos, e não mais sirva de auxílio opcional para a sua escolha. Logo, os indicadores citados devem atingir os valores mínimos possíveis.

Com estes pontos esclarecidos e o auxílio da Tabela 2, foi escolhido o fluido R123 como fluido de trabalho do ORC. O diagrama Txs do R123 é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Diagrama Txs do fluido R123



(Fonte: EES – Software)

### 4.3 Condições de projeto

Para que seja possível a execução do projeto, é preciso que sejam definidos alguns pontos: propriedades do fluxo dos gases de combustão, configuração do ciclo, pressão de trabalho (entrada da turbina) do ciclo, temperatura de entrada da turbina, temperatura de entrada da bomba, eficiência dos equipamentos envolvidos e demais parâmetros relevantes.

### 4.3.1 Propriedades termodinâmicas dos gases de combustão

Com o auxílio do EES, os valores de temperatura, pressão e vazão da Tabela 1 e também a composição química assinalada na Equação (1), as propriedades termodinâmicas dos gases de combustão na saída do forno de vidro são calculadas a partir das equações (2) e (3):

- Peso específico –  $\rho_g$ :

$$\rho_g = (\rho_{CO_2} + 2 \cdot \rho_{H_2O} + 8,648 \cdot \rho_{N_2} + 0,3 \cdot \rho_{O_2}) / 11,948 \quad (2)$$

- Calor específico à pressão constante –  $cp_g$ :

$$cp_g = (cp_{CO_2} + 2 \cdot cp_{H_2O} + 8,648 \cdot cp_{N_2} + 0,3 \cdot cp_{O_2}) / 11,948 \quad (3)$$

**Tabela 3 – Propriedades termodinâmicas dos gases de combustão na saída do forno**

Temperatura [°C]	Pressão [kPa]	$cp_g$ [kJ/kg.K]	$\rho_g$ [kg/m <sup>3</sup> ]	V [m <sup>3</sup> /s]	$\dot{m}$ [kg/s]
310	99,04	1,228	0,5674	82	46,53
400	99,04	1,256	0,4915	82	40,30

(Fonte: Autor)

Devido à diferença nas duas condições termodinâmicas limites que os gases podem assumir, o projeto será executado para a condição de menor temperatura e analisado seu comportamento na condição de maior temperatura. Também, será condicionado que a temperatura de saída dos gases no ciclo (temperatura de chaminé) será de 150 °C, para assegurar que o chaminé trabalhe sem a presença de condensados dos gases, o que pode acarretar danos.

### 4.3.2 Propriedades termodinâmicas do ciclo ORC

Para a definição das propriedades do ciclo ORC, foram analisados o ciclo subcrítico (pressão de trabalho abaixo da pressão crítica do fluido) e o ciclo transcrito ( $P_{\text{trab}} > P_{\text{crit}} > P_{\text{cond}}$ ).

De acordo com Tchanche, Pétrissans e Papadakis (2014), o ciclo transcrito apresenta um maior rendimento, porém o custo relativo ao ciclo subcrítico é relativamente maior: é preciso trabalhar com materiais especiais para suportar a maior temperatura e pressão, também devido as maiores pressões o custo com sistemas de segurança é aumentado. Deste modo, foi escolhido o projeto como sendo inicialmente como ciclo subcrítico.

Na escolha da pressão de trabalho do ORC (entrada da turbina), analisando os efeitos que podem aumentar o rendimento do ciclo citados por Borgnakke (2009), é preciso que a pressão de trabalho seja a maior possível.

Verificando que a pressão crítica do R123 é de 3,66 MPa (QIU, 2012), uma pressão de 2,5 MPa é convencionada para o ciclo, atendendo assim o critério de ser um ciclo subcrítico sem grandes perdas no rendimento.

Também, tratando de um fluido orgânico isoentrópico, o R123 não necessita de superaquecimento. Na pressão de trabalho escolhida, a temperatura de saturação é de aproximadamente 160 °C. A fim de evitar que qualquer variação nas condições dos gases façam com que a entrada da turbina tenha título menor que 1, é assumido que a temperatura de saída do evaporador seja de 170 °C, ou seja, com 10 °C de segurança do ponto de saturação de título igual a 1. Com relação às condições de condensação, analisando as condições de temperatura ambiente no Brasil, a temperatura de 40 °C foi convencionada na entrada da bomba, com a pressão de condensação do R123 nesta temperatura.

A Tabela 4 ilustra as propriedades do ORC – R123 definidas para início de projeto.

Tabela 4 – Propriedades termodinâmicas do ORC – Fluido de trabalho: R123

Ponto	Temperatura [°C]	Pressão [kPa]	Estado
(1) Entrada do Evaporador	40	2500	Líquido Comprimido
(2) Entrada da Turbina	170	2500	Vapor Superaquecido
(3) Entrada do Condensador	A calcular	154,7	A calcular
(4) Entrada da Bomba	40	154,7	Líquido saturado

(Fonte: Autor)

### 4.3.3 Parâmetros de eficiência dos equipamentos envolvidos

A execução do projeto fica condicionada a definição dos parâmetros de eficiência dos equipamentos envolvidos, como exemplo: eficiência do gerador, eficiência isoentrópica da turbina. Os valores utilizados neste projeto foram valores encontrados na literatura de engenharia, mais especificamente de acordo com Borgnakke (2009) e Balestieri (2009). Os valores assumidos para o projeto são apresentados na Tabela 5:

Tabela 5 – Valores adotados de eficiência dos equipamentos utilizados no ORC

Equipamento	Eficiência [%]
Turbina	80
Gerador Elétrico	95

(Fonte: Autor)

Com relação aos valores adotados, é importante declarar que a eficiência do gerador elétrico já engloba as perdas mecânicas de fricção que ocorrem na caixa de redução que acopla a turbina ao gerador.

Também, para este projeto preliminar, foram desprezadas as perdas de cargas nos trocadores de calor e na tubulação, como também o acréscimo de temperatura da bomba no fluido, devido ao atrito.

#### 4.3.4 Configuração adotada do ciclo ORC

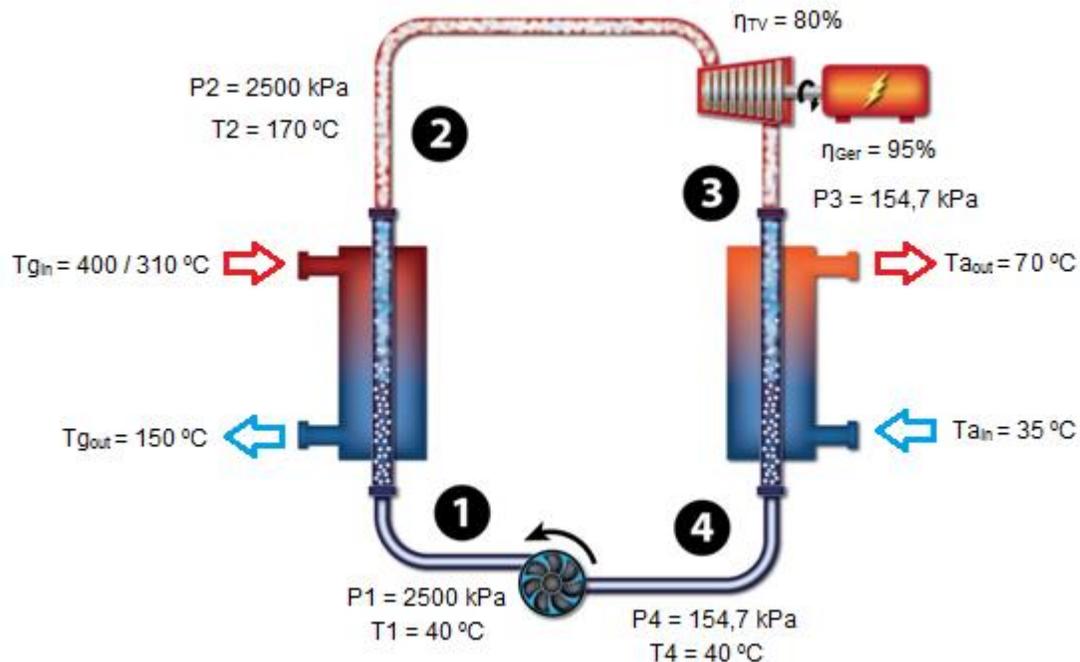
Analisando a configuração em que o sistema será instalado, vê-se que este se enquadra como a configuração *bottoming*, pois a energia do combustível primeiro vai suprir um processo térmico (fundição do vidro) e o calor residual aciona o ciclo para a geração de energia eletromecânica.

É importante que a energia eletromecânica gerada assuma o valor mais alto quanto possível, mas também é conveniente que parte da energia recuperada seja transformada na forma de água quente para processos fabris, como o caso de vestiários e refeitórios, pois na condição atual o aquecimento da água é feito por resistores elétricos.

Dessa forma o ciclo ORC deste projeto tem a configuração de acordo com a Figura 18. No caso, a água utilizada no condensador poderá ser utilizada para processos fabris, e a entrada do condensador conta com um conjunto de reservatório e bomba onde a temperatura foi assumida em 35 °C (ambiente), pressão de entrada do condensador de 200 kPa, prevendo qualquer perda de carga nas tubulações de água e temperatura de saída para os processos fabris de 70 °C. Caso a água não seja utilizada nos processos fabris, poderá ser resfriada através de chiller resfriados a ar ou torre de resfriamento. O projeto destes equipamentos não será abordado neste trabalho.

A Figura 18 também apresenta os estados termodinâmicos de cada ponto do ciclo.

Figura 18 – Ciclo ORC com os estados termodinâmicos dos pontos



(Fonte: G-TET – site – Adaptado)

#### 4.4 Execução do projeto de cogeração

Através do *software* EES, as equações de conservação de massa e de conservação de energia aplicada aos equipamentos do ciclo (BORGNAKKE, 2009) é possível realizar os cálculos termodinâmicos do ciclo. Os resultados encontrados são apresentados no próximo capítulo.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são executados no EES, para as duas condições de temperatura de entrada dos gases de combustão de saída do forno. Também, para os dois casos é estimado o valor do investimento para o ORC e calculado o *Payback* simples e *Payback* composto.

### 5.1 Resultados termodinâmicos

A Figura 19 apresenta os valores das propriedades termodinâmicas de cada ponto do ciclo para a condição de temperatura de entrada dos gases de combustão no ciclo de 310 °C. A Tabela 6 mostra os demais valores relativos ao projeto (rendimento do ciclo, vazão mássica do fluido, vazão de água no condensador, entre outros). A Figura 20 e Tabela 7 apresentam os mesmos resultados, porém para a condição de temperatura dos gases na entrada do ORC de 400 °C (como mencionado anteriormente, a vazão mássica do fluido será mantida como o valor encontrado na primeira condição para o projeto da segunda condição de temperatura dos gases). Finalmente, a Figura 21 ilustra o ciclo termodinâmico do projeto no diagrama Txs do fluido R123.

Figura 19 – Propriedades termodinâmicas dos pontos do ORC ( $T_{g_{in}} = 310 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Sort	1 $h_i$ [kJ/kg]	2 $P_i$ [kPa]	3 $s_i$ [kJ/kg-K]	4 $T_i$ [C]	5 $x_i$
[1]	242,6	2500	1,139	40	
[2]	481,9	2500	1,742	170	
[3]	441,2	154,7	1,771	84,8	
[4]	241,9	154,7	1,142	40	0

(Fonte: Autor – EES)

Tabela 6 – Resultados do projeto de cogeração ( $T_{g_{in}} = 310 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Vazão mássica de R123 - $\dot{m}_{R123}$ [kg/s]	38,20
Rendimento do ciclo - $\eta_t$ [%]	16,71
Potência consumida na bomba - $\dot{W}_b$ [kW]	26,54
Potência eletromecânica gerada - $\dot{W}_{TV}$ [kW]	1555
Potência elétrica gerada - $\dot{W}_{Tve}$ [kW]	1477
Vazão mássica de água no condensador - $\dot{m}_a$ [kg/s]	52,01

(Fonte: Autor)

Figura 20 – Propriedades termodinâmicas dos pontos do ORC ( $T_{g_{in}} = 400 \text{ }^{\circ}\text{C}$ )

Sort	1 $h_i$ [kJ/kg]	2 $P_i$ [kPa]	3 $s_i$ [kJ/kg-K]	4 $T_i$ [C]	5 $x_i$
[1]	242,6	2500	1,139	40	
[2]	569,4	2500	1,922	248,7	
[3]	514,9	154,7	1,953	173,6	
[4]	241,9	154,7	1,142	40	0

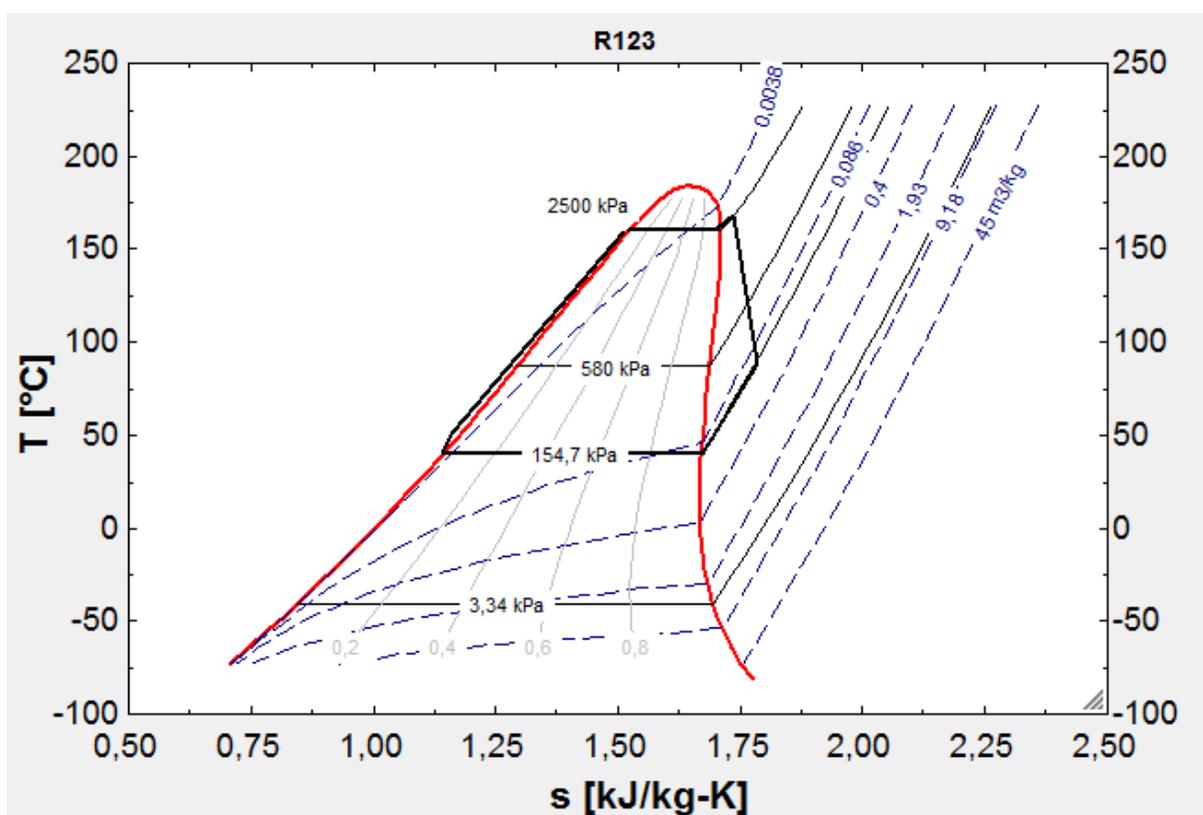
(Fonte: Autor – EES)

Tabela 7 – Resultados do projeto de cogeração ( $T_{g_{in}} = 400 \text{ }^\circ\text{C}$ )

Vazão mássica de R123 - $\dot{m}_{R123}$ [kg/s]	38,72
Rendimento do ciclo - $\eta_t$ [%]	16,46
Potência consumida na bomba - $\dot{W}_b$ [kW]	26,9
Potência eletromecânica gerada - $\dot{W}_{TV}$ [kW]	2110
Potência elétrica gerada - $\dot{W}_{Tve}$ [kW]	2004
Vazão mássica de água no condensador - $\dot{m}_a$ [kg/s]	72,22

(Fonte: Autor)

Figura 21 - Ciclo termodinâmico no diagrama Txs



(Fonte: Autor – EES)

### 5.1.1 Discussões – resultados termodinâmicos

Verifica-se que o rendimento do ciclo nos dois casos ficou dentro dos valores esperados, segundo a faixa apontada por Quoilin et al. (2013). Para que o rendimento assumira valores maiores, um estudo comparativo com o ciclo na condição de transcrito pode ser conduzido.

A potência elétrica gerada assume um valor interessante, pois mesmo não sendo suficiente para suprir a demanda elétrica de uma fábrica, pode ser responsável pelo acionamento de um sistema de bombeamento para o resfriamento do forno de vidro, por exemplo, que se caracteriza por ser um processo de caráter crítico na produção (a falha no sistema de resfriamento pode danificar vários equipamentos que estão dentro do forno, além de poder danificar o próprio forno). Com a energia da concessionária como *backup*, haverá um aumento significativo na confiabilidade deste sistema.

Importante notar que devido ao fato de não ter sido considerado a eficiência isoentrópica na bomba (no caso, eficiência de 100%), a diferença de entropia da entrada e saída da bomba assume um valor errôneo. Na realidade, é necessário que seja considerado o aumento da temperatura do fluido devido ao atrito na bomba, bem como sua eficiência isoentrópica. Pelo fato de ser um valor relativamente pequeno com relação a potência da turbina, num primeiro momento para um projeto preliminar este ponto foi desprezado.

O valor de vazão mássica de água do condensador, nos dois casos, apresenta um valor relativamente alto com relação ao consumo médio de restaurante e residências apontado pelo site Site Engenharia. Neste caso, a porção necessária para processos fabris é facilmente suprida e o restante da água poderá ser resfriada até a condição de a partir da instalação de uma torre de resfriamento ou de um *chiller*.

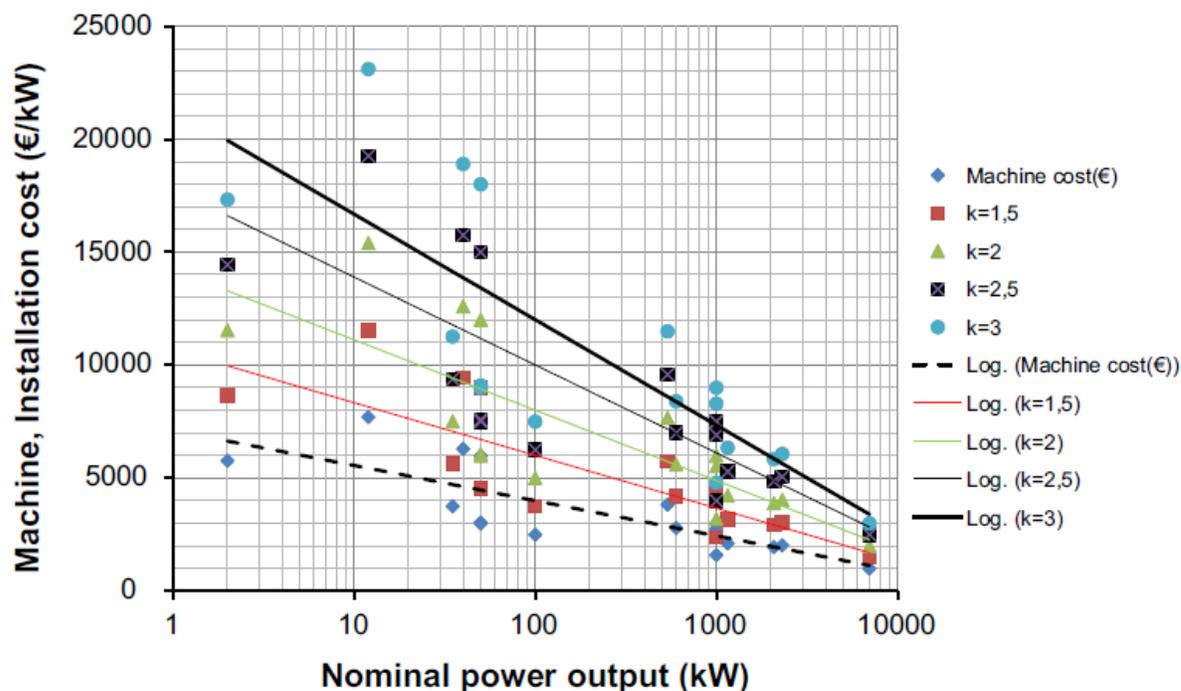
## 5.2 Análise econômica do ciclo

Para que seja possível o cálculo dos *Payback's* de cada condição, primeiramente é necessário que seja estimado o valor do investimento para este ORC, além de definir os valores de taxa de juros, preço da energia elétrica no Brasil e também a disponibilidade do ORC.

### 5.2.1 Valor do investimento – ORC

Segundo Tchanche, Pétrissans e Papadakis (2014), o valor do investimento total de um ORC pode ser estimado pela Figura 22 apresentada a seguir:

Figura 22 - Custo do investimento de um ORC x Potência elétrica gerada



(Fonte: TCHANCHE; PÉTRISSANS; PAPADAKIS, 2014)

Ainda, segundo Tchanche, Pétrissans e Papadakis (2014), o valor de k assumirá um valor mais alto ( $k=3$ ) quando o projeto se referir a uma cogeração com a necessidade de combustível e um valor menor ( $k=1,5$ ) quando o projeto se referir a recuperação de calor

residual (*Waste Heat Recovery*). Deste modo, para um valor médio de 1750 kW de energia elétrica gerada,  $k=1,5$  (*Waste Heat Recovery*), a estimativa do valor total do investimento para o ORC será de EUR 5.775.000,00.

### 5.2.2 Disponibilidade do ORC

Neste caso, a disponibilidade do ORC é estimada em 95 %, ou seja, ao longo do ano serão disponibilizadas 438 horas (aproximadamente 20 dias) para que seja feita manutenção preventiva e também prevendo qualquer parada emergencial. Assim, ao longo do ano o ciclo estará em funcionamento durante 8322 horas.

### 5.2.3 Demais parâmetros econômicos

A taxa de juros será ajustada como o valor dos juros Selic de 2014, que teve o valor de 11% ao ano. (ANEFAC – site).

Com base nos dados encontrados no site da Elektro, um valor médio de 0,20 R\$/kWh foi assumido.

De acordo com o site do Banco Central, o euro no dia 03/02/2015 equivalia a R\$ 3,06.

### 5.2.4 Cálculo do *Payback*

Novamente, com o auxílio do EES e os conceitos econômicos apresentados por Balestieri (2002), os valores de *Payback* simples e *Payback* composto foram calculados, e eles são apresentados na Tabela 8.

**Tabela 8 – Resultados econômicos do projeto de cogeração**

Temperatura dos gases de saída do forno [°C]	<i>Payback</i> simples [anos]	<i>Payback</i> composto [anos]
310	7,2	15,0
400	5,3	8,4

(Fonte: Autor)

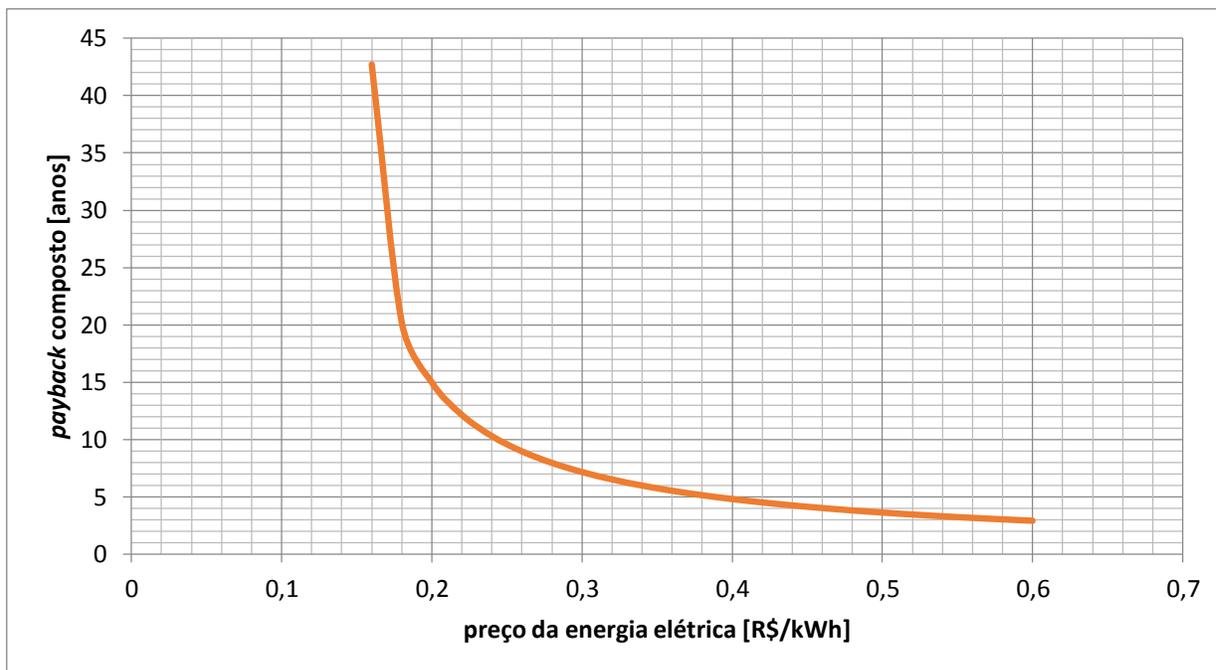
### 5.2.5 Discussões - resultados econômicos

Ao analisar os valores encontrados da Tabela 8, o *Payback* assume valores relativamente maiores que os valores tipicamente trabalhados no cenário industrial brasileiro (*Payback* para pequenos e médios investimentos = 3 – 5 anos). Entretanto, se tratando de um projeto de cogeração, não só o retorno financeiro deve ser analisado, mas também devem ser levados em conta:

- Aumento na confiabilidade de sistemas abastecidos pela energia elétrica gerada, contribuindo fortemente para os setores de produção (menor possibilidade de parada de produção e conseqüentemente perdas) e manutenção (aumento de redundâncias no sistema de acionamento, permitindo um maior tempo de resposta em uma manutenção corretiva emergencial);
- Possibilidade da qualificação da empresa como cogeneradora pela ANEEL, podendo assim gozar de políticas de incentivo ao uso racional dos recursos energéticos;
- Alívio do sistema elétrico integrado nacional;
- Exposição para a mídia, como empresa com o perfil consciente no uso sustentável dos recursos naturais energéticos.

Ainda, diante do cenário nacional atual de racionamento de água e conseqüente aumento da energia elétrica, o valor de *Payback* deste projeto (e também de qualquer projeto de cogeração) deverá ser diminuído e a viabilidade econômica assumirá uma posição mais favorável. A Figura 23 ilustra o efeito no valor de *Payback* composto (no caso da temperatura dos gases de 310 °C, ou seja, o caso mais crítico financeiramente) da variação do preço da energia elétrica (R\$/kWh).

Figura 23 - Payback composto em função do preço da energia elétrica



(Fonte: Autor)

Assim, é esperado indústrias e governos se atentem e recorram cada vez mais para a prática da cogeração.

## 6 CONCLUSÃO

O estudo conduzido neste trabalho mostrou a aplicação do conceito de cogeração, suas vantagens e o porquê de sempre que possível realizar uma pesquisa aprofundada neste assunto. É visto que ao passar dos anos, com a diminuição da reserva de recursos naturais, o pensamento de uso racional de energia deve ser introduzido em todos os níveis de sociedade, e que indústrias e governos devem incentivar práticas como a cogeração que racionaliza o uso de combustíveis e contribuem para o aumento do rendimento de processos.

Especificamente no caso estudado, podem ser verificados os potenciais de recuperação de energia que uma empresa vidreira pode ter. A característica principal deste processo é o intensivo uso de energia, logo naturalmente as oportunidades para a cogeração serão sempre altas. Futuramente, indústrias com o consumo energético intensivo podem não só olhar para a cogeração como uma alternativa, mas implementarem este sistema como intrínseco a seu processo, otimizando assim o perfil de demanda energética do local onde a empresa se instala e também aumentando indicadores internos da empresa (confiabilidade, custos de produção, entre outros).

O projeto realizado, ainda que preliminar, pôde dar um posicionamento e estimativas com relação ao que pode ser esperado no quesito de energia elétrica gerada, rendimento do ciclo como também na escolha do ciclo a ser projetado, configurações e características a serem otimizadas. Os resultados encontrados no projeto condizem com o esperado na teoria e também em estudos anteriores.

### 6.1 Sugestões para atividades futuras

A fim de atingir valores mais altos de rendimento do ciclo, é interessante que seja analisado o efeito de ciclo trabalhar como transcrito, onde é esperado que seja gerada uma maior potência eletromecânica.

Em conjunto, podem ser analisados os efeitos nos resultados do ciclo da mudança do fluido orgânico de trabalho por outro também fortemente utilizado.

**REFERÊNCIAS**

ANEFAC. **Pesquisa de juros.** Disponível em: <<http://www.anefac.com.br/PesquisaJuros.aspx>>. Acesso em: 25 jan. 2015.

BALESTIERI, J. A. P. **Cogeração: geração combinada de eletricidade e calor / José Antônio Perrella Balestieri.** Florianópolis: Ed. Da UFSC, 2002. 279 p.

BALESTIERI, J. A. P. **Máquinas térmicas / Material de apoio à disciplina.** UNESP – Campus Guaratinguetá, Departamento de Energia: [s.n.] 2009.

BANCO central do Brasil. **Conversão de moedas.** Disponível em: <<http://www4.bcb.gov.br/pec/conversao/conversao.asp>>. Acesso em: 03 fev. 2015.

BARJA, G. J. A. **A cogeração e sua inserção ao sistema elétrico.** 2006. 157 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica – Ciências Mecânicas) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2006.

BGD. **EPA launches industrial combined heat and power initiative.** Disponível em: <<http://www.bgdlegal.com/news/2012/11/02/air-quality-letter/epa-launches-industrial-combined-heat-and-power-initiative/>>. Acesso em: 22 jan. 2015.

BORGNACKE, C. **Fundamentos da termodinâmica / Claus Borgnakke, Richard E. Sonntag; tradução da 7ª edição americana.** São Paulo: Edgard Blucher, 2009. 659 p.

CAMPANA, F. et al. ORC waste heat recovery in European energy intensive industries: Energy and GHG savings. **Energy Conversion and Management**, Bologna, v.76, p. 244-252, July 2013.

ELEKTRO. **Tarifas, taxas e tributos.** Disponível em: <<http://www.elektro.com.br/sua-casa/tarifas-taxas-e-tributos>>. Acesso em: 25 jan. 2015.

GEA. **GEA Bischoff Literature.** Disponível em: <[http://www.niroinc.com/emission\\_control/gea\\_bischoff\\_literature.asp](http://www.niroinc.com/emission_control/gea_bischoff_literature.asp)>. Acesso em: 22 jan. 2015.

GOTOKNOW. **Co-generation plant.** Disponível em: <<https://www.gotoknow.org/posts/183558>>. Acesso em: 22 jan. 2015.

GREEN thermal energy technologies. **Organic Rankine cycle.** Disponível em: <[http://www.g-tet.com/content\\_sub.php?id=1](http://www.g-tet.com/content_sub.php?id=1)>. Acesso em: 20 jan. 2015.

HNAT, J. G.; COLES, W. F. A feasibility assessment of cogeneration from regenerative glass furnace. **IEEE transactions on industry applications**, v. 1A-21, n. 4, p. 1064-1069, Aug. 1985.

LOKOLAMAS off-road. **Manuais de mecânica: ciclos de funcionamento de motores.** Disponível em: <<http://lokolamasoffroad.blogspot.com.br/2011/02/manuais-de-mecanica-ciclos-de.html>>. Acesso em: 20 fev. 2015.

MÁQUINAS e motores utilizados na pesca. **Motor do ciclo Diesel.** Disponível em: <<http://maquinasmotoresnapescavso.blogspot.com.br/p/motor-do-ciclo-diesel.html>>. Acesso em: 20 fev. 2015.

MSPC. **Ciclo de Brayton – Introdução.** Disponível em: <<http://www.mspc.eng.br/termo/termod0530.shtml>>. Acesso em: 21 fev. 2015.

ORLANDO, J. A. **Cogeneration planner's handbook / by Joseph A. Orlando.** Tulsa: Prentice-Hall, 1991. 314 p.

PANTANAL energia. **Operação.** Disponível em: <<http://www.pantanalenergia.com.br/operation.asp>>. Acesso em: 21 fev. 2015.

QIU, G. Selection of working fluids for micro-CHP systems with ORC. **Renewable Energy**, Scarborough, v.48, p. 565-570, July 2012.

QUOILIN, S. et al. Techno-economic survey of Organic Rankine Cycle (ORC) systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Liège, v. 22, p. 168-186, Mar. 2013.

SEFPRO. **Float**. Disponível em: <<http://www.sefpro.com/float.aspx>>. Acesso em: 22 jan. 2015.

SITE engenharia. **Tabela – consumo diário de água**. Disponível em: <<http://www.sitengenharia.com.br/tabelaagua.htm>>. Acesso em: 30 jan. 2015.

STIJEPOVIC, M. et al. On the role of working fluid properties in Organic Rankine Cycle performance. **Applied Thermal Engineering**, Doha, v.36, p. 406-413, Nov. 2011.

TCHANCHE, B.; PÉTRISSANS, M.; PAPADAKIS, G. Heat resources and organic Rankine cycle machines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Amiens, v. 39, p. 1185-1199, Aug. 2014.

XU, J.; YU, C. Critical temperature criterion for selection of working fluids for subcritical pressure Organic Rankine cycles. **Energy**, Beijing, v.74, p. 719-733, July 2014.