

**SOCIEDADE EDUCACIONAL LEONARDO DA VINCI  
FACULDADE METROPOLITANA DE RIO DO SUL  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**RAMON DI LUCA KANITZ**

**COOGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR  
DE CALDEIRAS DE BIOMASSA**

**Rio do Sul - SC**

**2020**

**COOGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR  
DE CALDEIRAS DE BIOMASSA**

Artigo apresentado como requisito para  
obtenção do título de Bacharel em engenharia  
Elétrica, pelo Curso de Engenharia elétrica da  
Sociedade Educacional Leonardo da Vinci –  
UNIASSELVI/FAMESUL

Orientador(a): Prof: Marcelo da Silva

Rio do Sul SC

2020

## SUMARIO DE FIGURAS

1. DIAGRAMA DE UMA CADEIRA .....	9
2. VISTA EM CORTE DE UMA CALDEIRA DO TIPO FLAMOTUBULAR .....	10
3. PALHETAS DE UMA TURBINA DE VAPOR .....	15
4. PALHETAS DETALHADAS.....	15
5. DADOS TERMODINÂMICOS DO PROCESSO DO CLIENTE .....	18
6. DADOS DE GERAÇÃO DE ENERGIA .....	20
7. REGULAGEM DE TENSÃO DO GERADOR .....	20
8. TENSÃO DE EXCITAÇÃO DO GERADOR .....	21
9. RENDIMENTO / FATOR DE POTÊNCIA DO GERADOR .....	21
10. REATÂNCIAS DO GERADOR.....	21
11. PROTEÇÕES DO RELÉ SEL .....	23
12. SEQUÊNCIA DE FASES GERADOR.....	24
13. DEFASAGEM ENTRE FASES .....	25
14. CURVA FREQUÊNCIA X POTENCIA.....	25
15. CURVA CARGAS INDUTIVAS / CAPACITIVAS.....	26
16. MEMORIAL DE CALCULO .....	26
17. DADOS REAIS DE GERAÇÃO.....	26
18. DADOS DAS CARGAS DA CALDEIRA .....	27

## SUMARIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>5</b>
<b>2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....</b>	<b>6</b>
2.1.CRITÉRIOS TÉCNICOS .....	6
2.1.1. TIPOS DE CALDEIRAS .....	6
2.1.2. CONJUNTO TURBO GERADOR .....	7
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>7</b>
3.1.CARACTERISTICA DA CALDEIRA AQUATUBULAR.....	8
3.2.ELEMENTOS DE UMA CALDEIRA .....	10
3.3.FUNCIONAMENTO DE UMA CALDEIRA .....	12
3.4.TURBINA A VAPOR .....	14
3.4.1. COMO FUNCIONA UMA TURBINA A VAPOR .....	14
3.4.2. COMO OCORRE A EXPANSÃO DO VAPOR NAS TURBINAS A VAPOR?.....	15
3.4.3. COMO ESSAS PEÇAS EXTRAEM A ENERGIA DO VAPOR? .....	16
3.4.4. TURBINA A VAPOR DE CONDENSAÇÃO.....	16
3.4.5. TURBINA A VAPOR DE CONTRAPRESSÃO.....	16
3.4.6. DETALHAMENTO DA TURBINA UTILIZADA .....	16
3.4.1. ESTUDO TERMODINAMICO DO PROCESSO DO CLIENTE.....	17
3.4.2. CARACTERISTICA DE GERAÇÃO .....	19
3.5.CARACTERISTICA DO GERADOR .....	19
3.5.1. PROTEÇÃO DO GERADOR.....	21
3.5.2. SINCRONIZAÇÃO COM A REDE .....	23
<b>4. RESULTADOS FINAIS .....</b>	<b>26</b>
4.1.POTENCIA GERADA – MEMORIAL DE CALCULO (PROJETO).....	26
4.1.POTENCIA GERADA – REAL DADA PELA TURBINA (REALIZADO) .....	26
4.2.CARGAS AUXILIARES .....	27
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>6. ANEXOS .....</b>	<b>28</b>

## RESUMO

*O presente documento é um estudo de caso real, o mesmo apresenta uma modelagem de potência e controle para uma cogeração de energia elétrica, com uma máquina primária do tipo caldeira Aquatubular. Inicialmente faz-se uma breve definição de caldeira, sua utilização e funcionamento, também abrange sobre o tema de geração, sendo detalhado os equipamentos bem como critérios de especificação e dimensionamento. A planta em questão se localiza em Caçador / SC, o cliente já possui geração através de hidroelétrica, e necessita de uma caldeira para geração de vapor para seu processo e também para a cogeração de energia. A potência instalada do conjunto turbogerador é de 3,75 MVA*

**Palavras-chave:** Coogeração de Energia, Turbogenerador, Caldeira Aquatubular.

## 1. INTRODUÇÃO

O vapor é muito utilizado nos processos de produção das indústrias atuais em todo o mundo, desde esterilização de garrafas, indústrias de bebidas, na indústria metalúrgica, nos banhos químicos e secagem de materiais, além de ser o elemento fundamental para o funcionamento das termelétricas. O principal equipamento utilizado na geração de vapor é a caldeira, em geral movidas à combustão e do tipo Flamotubular ou Aquatubular. Como o propósito da Caldeira é gerar Vapor a uma temperatura elevada, e conseqüentemente, também acaba gerando grandes pressões internas, é uma aplicação que contém muitos riscos de acidentes, na grande maioria são fatais.

A automação e o controle do sistema de combustão, conforme abordado na norma NFPA 85, são fundamentais para se garantir a máxima segurança durante a operação de uma caldeira. Assim, tendo em vista os riscos de se operar uma caldeira, tanto em modo automático como manualmente e a importância das normas de segurança para minimizar estes riscos, os operadores deveram ter treinamento e cursos específicos como NR13.

Entre as variáveis de funcionamento da caldeira, as malhas de controle das grandezas se destacam, pois, o bom funcionamento de uma caldeira dependem desses controles. Dentro desses controles, o que se destaca é o controle PID, (Proporcional, Integrativo, Derivativo), onde o erro é diminuído e o valor esperado de Set Point é mantido de forma linear.

Além de consumo de vapor para o processo, o mesmo também pode ser utilizado para mover o rotor de uma turbina e conseqüentemente, acionar um gerador que produzira potência elétrica. Podendo ser turbinas dedicadas totalmente para geração de energia, ou para cogeração, com prioridade ao processo que consome vapor.

Este trabalho tem como objetivo geral detalhar de forma geral de como é o processo de projeto de uma planta de coogeração de energia elétrica, as variáveis de processo e os principais componentes envolvidos.

Os principais objetivos neste presente documento é detalhar o conjunto turbogerador, sendo a máquina primária que movimenta o eixo do gerador, seu funcionamento, tipos de turbinas, detalhamento da turbina dimensionada e especificação.

Além da Turbina, o sistema dispõe de um gerador trifásico montado no eixo da turbina, é detalhado o gerador especificado, sua proteção e sincronização com a rede. Apesar de vantajosa, a ligação em paralelo de Gerador na barra infinita não pode ser executada arbitrariamente. Algumas condições, chamadas condições de paralelismo, referentes à operação e às especificações dos geradores, devem ser observadas, sob pena de problemas na tensão gerada, e danos aos geradores, condutores, barramentos e equipamentos alimentados.

Em termoelétricas a fonte primária é o vapor, onde para a geração do vapor em alta pressão, é necessário um conjunto de equipamentos que consomem energia elétrica. Chama-se esses equipamentos de serviços auxiliares. Então pode-se dizer que uma parte da geração da energia elétrica é destinada a máquina primária, diferente de uma usina hidroelétrica que toda a geração é destinada para as cargas, onde uma pequena parcela fica como serviços auxiliares, muito inferior comparado com uma termoelétrica.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

Para se obter o controle de uma caldeira do tipo Aquatubular, será abordado os tópicos abaixo:

- É feita uma revisão dos conceitos e características de uma caldeira, são revisados os principais componentes da caldeira, as principais variáveis a serem controladas.;
- Ao que se refere a geração de energia, será detalhado os dados nominais de geração, especificação do conjunto turbogerador, controle e proteção do gerador, sincronização com a rede.

### **2.1. CRITÉRIOS TÉCNICOS**

#### **2.1.1. TIPOS DE CALDEIRAS**

As caldeiras são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor, em pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia térmica para este fim. Este documento abrange as caldeiras que utilizam energia térmica proveniente da queima de combustíveis. Basicamente, estas caldeiras dividem-se em dois tipos: a flamotubular e a aquatubular . A diferença básica entre esses dois tipos de caldeiras é que na caldeira aquatubular

a água circula por dentro dos tubos e os gases da combustão circulam por fora. Nas flamotubulares, é o inverso, os gases da combustão circulam por dentro dos tubos e água fica por fora.

As caldeiras Flamotubular são as mais utilizadas em instalações de Pequeno porte, isso por possuírem um custo de instalação mais viável. Porém possuem vazão e pressão máximas inferior comparadas com a Aquatubular , variando de 1 t/h até 40 t/h, pressão até 25 bar(g) e temperatura até 350°C. Sua principal aplicação é geração de Vapor saturado ou superaquecido para processos industriais em geral

As caldeiras Aquatubular são as mais utilizadas em instalações de grande porte, pois como as flamotubulares abrangem no máximo uma vazão de 40t/h, uma caldeira Aquatubular pode produzir 4x vezes mais vapor. Sua principal aplicação é geração de Vapor saturado ou superaquecido para processos industriais em geral e Vapor superaquecido para geração de energia elétrica e cogeração.

### **2.1.2. CONJUNTO TURBO GERADOR**

Os turbogeradores foram desenvolvidos para aplicações em Centrais Termelétricas e possuem ampla faixa de potências, podendo ser aplicados a turbinas a vapor e a gás. Para regulação da tensão de saída do gerador, é excitação o rotor com uma corrente contínua. A função dela é manter a tensão de saída do gerador sempre constante, independente das oscilações de carga e rotação, e sempre dentro dos patamares corretos do gerador.

As turbinas a vapor estão disponíveis de 0.1 a 150 MW e é aplicada em geração de energia elétrica ou acionamento mecânico. De construção modular, garante maior flexibilidade de instalação em cada tipo de processo industrial, sempre considerando a praticidade, segurança, eficiência e, principalmente, a economia. Para tal aplicação, deve-se fazer o uso de avançados e tecnológicos programas gráficos e de cálculos aerodinâmicos, além dos estudos para aplicações de materiais especiais.

## **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

A caldeira em estudo tem capacidade de geração de 50Ton / H de vapor a 43 Bar de Pressão. A mesma está situada em Caçador / SC. A empresa ICAVI fabricante da caldeira, seguem todas as normativas para se evitar acidentes durante a operação de caldeiras. Para isso, é seguido todas as normas específicas de segurança, como por exemplo NR-13, NBR12313, NFPA 85 e API 556. Dentre estas normas destaca-se a NFPA 85, que trata especificamente do funcionamento de caldeiras, abordando temas centrais relacionados à segurança.

### **3.1. CARACTERÍSTICA DA CALDEIRA AQUATUBULAR**

Também são conhecidas como caldeiras de tubos de água e são caracterizadas pelo fato dos gases de combustão circularem por fora dos tubos. As caldeiras aquatubulares são o que há de mais moderno para geração de vapor. Nela, a água circula em tubos e absorve o calor proveniente dos gases de combustão que circulam externamente aos tubos através do caminho formado pela alvenaria e chicanas internas.

Esse tipo de caldeira tem maior potencial de produção de vapor, atinge pressões elevadas e altas temperaturas ao comparar a outros tipos de caldeiras. A vaporização da água acontece internamente aos tubos que constituem a parede mais interna. Por meio do calor gerado na fornalha, a água vaporiza e sobe ao tambor superior armazenador de vapor, dando lugar a água fria que posteriormente gerará mais vapor.

Esse ciclo acontece sucessivamente, onde apenas a diferença do peso específico gera a circulação natural. Essa denomina-se caldeira de circulação natural. Quando há aumento na capacidade da caldeira, e seu relativo aumento de tamanho, e quantidade de tubos, por consequência, criará maior perdas de cargas no circuito hidráulico, tornando a circulação natural inviável, e assim, o uso de bombas se faz necessário.

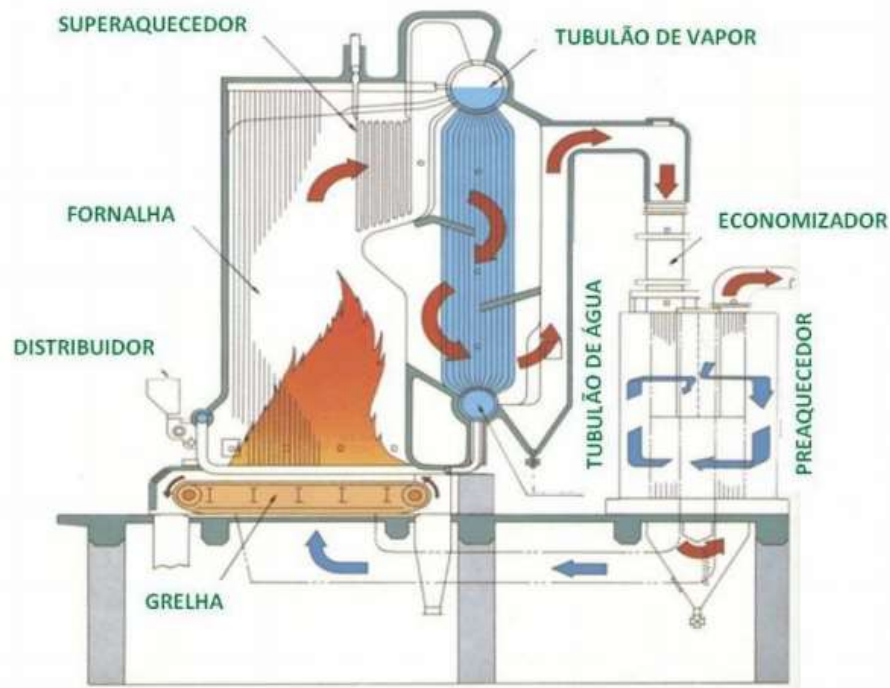
Uma caldeira Aquatubular é composta basicamente por dois sistemas: o sistema vapor-água e o sistema responsável pela combustão-Gases. O primeiro consiste no sistema onde a água recebe calor através de uma barreira de metal sólido até ser convertida em vapor. O segundo é onde ocorre a mistura entre o ar e o combustível e, posteriormente, a reação de combustão, na qual é produzida a energia térmica que é transferida para o sistema vapor-água.

Na parte superior, contempla o tanque de pressurização, logo abaixo, está a fornalha interna, na região interior da caldeira. O principal uso dessas fornalhas se dá no rendimento da queima de combustíveis como serragem e óleo combustível, que têm baixo poder calorífico.

Nesta variação, os gases de combustão passam pelos tubos em direção à parte superior. Assim, vai aquecendo e transformando em vapor a água que permanece do lado externo, ao redor da caldeira.

Sua utilização é mais frequente em espaços reduzidos, onde não há necessidade de muito vapor para haver um bom serviço. Há dois tipos de vapores que podem ser produzidos: os superaquecidos e saturados.





*Figura 1 - Diagrama de uma caldeira*

**Fonte:** [https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/193475/TCC\\_20182\\_RonaldoBaggio.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/193475/TCC_20182_RonaldoBaggio.pdf?sequence=1&isAllowed=y)

### **Aplicações:**

- Para geração de 1 a 200 t/h com pressão até 110 bar (g);
- Plantas de co-geração;
- Geração de Vapor saturado ou superaquecido para processos industriais em geral
- Geração de Vapor superaquecido para geração de energia elétrica e cogeração.

### **Vantagens:**

- Capacidade em produzir maiores volumes de vapor, necessários em processos mais exigentes;
- Capacidade em trabalhar com altas pressões;
- Possibilidade em suportar e gerar altas temperaturas;
- Possibilidade em ser alimentada por uma variedade bem grande de combustíveis, inclusive as formas de biomassa que apresentam baixo poder calorífico e dificuldades de queima;
- Simplificação na limpeza dos tubos, com a possibilidade em ser realizada de forma automática;
- Durabilidade. O tempo de vida de uma caldeira aquatubular pode facilmente chegar até 30 anos. Porém, para isso é fundamental que haja boa manutenção, manuseio e limpezas programadas.

### **3.2. ELEMENTOS DE UMA CALDEIRA**



*Figura 2 - Vista em Corte de Uma caldeira do Tipo Flamotubular  
Fonte – Caldeira ICAVI, Desenho em corte*

#### **TUBULÃO OU TAMBOR DE PRESSÃO**

É um reservatório no qual a água, em estado líquido e gasoso, é armazenada. A alimentação da água é feita nele, assim como a saída dos gases. Geralmente, é feito de chapas de aço carbono, cuja vedação se dá através de solda. A capacidade de vapor é diretamente proporcional às suas dimensões. O tubulão abriga a garrafa de nível, a descarga de fundo para que os sólidos sejam retirados, os tubos de troca térmica, a saída de vapor e as válvulas de segurança.

É no tubulão que acontece a evaporação da água, sendo que vapor é direcionado ao uso no processo.

#### **FORNALHA**

Também pode ser chamada de tubo fornalha no caso das caldeiras flamotubulares. É uma parte importante, pois é responsável pela queima de combustível. O oxigênio do ar é fundamental para que esse processo ocorra. Ele pode ser pré-aquecido no pré-aquecedor de ar ou estar em seu estado natural, mas, de qualquer forma, é sugado para o interior da fornalha.

Dessa maneira, o elemento entra em contato com o combustível, dando início ao processo de combustão, que pode ser realizado de diversas maneiras, de acordo com a forma da substância adotada. Ela pode ser líquida, gasosa ou sólida, como biomassa.

As caldeiras flamotubulares podem ser equipadas também com fornalhas aquatubulares. Assim, com essa integração, é possível ter uma melhor combustão da biomassa, se disposta na parte inferior, e uma geração de vapor mais segura, na parte superior.

### **GRELHADO**

A Caldeira conta com sistema de grelhas tipo móvel acionado através de cilindros hidráulicos, movidos através de óleo bombeados da Unidade Hidráulica, O motor da bomba é acionado através de conversor de frequência com que garante a perfeita distribuição do combustível por toda a fornalha e nos diversos regimes de operação. Na grelha acontece a queima do combustível, ventiladores insuflam o ar na fornalha, passando por baixo dos orifícios da grelha, propiciando refrigeração via ar seco dos elementos de grelha, desta forma consegue obter altos níveis de rendimento com baixos níveis de emissão.

### **SILO DOSADOR**

O silo dosador é composto de um mexedor para distribuir melhor o material de combustão dentro do silo. Para transferência do material, é através de Gavetas, cilindros hidráulicos movidos através de óleo bombeados da Unidade Hidráulica, O motor da bomba é acionado através de conversor de frequência com que garante que descarga seja perfeita e que a distribuição de combustível seja uniforme em todos os regimes de operação da caldeira em cima do grelhado.

### **PRÉ AQUECEDOR DE AR**

O pré-aquecedor de ar é o responsável por elevar a temperatura do ar, antes que este entre na fornalha, através da troca de com os gases quentes resultantes da queima, construído por feixe de tubos espaçados entre si, mandrilados em suas extremidades. A instalação desse equipamento melhorara a eficiência da caldeira.

### **VENTILADOR PRIMÁRIO**

O ventilador primário é o responsável pela Injeção do ar sob a grelha distribuído por toda extensão do grelhado. Sendo o ventilador tipo centrífugo é construído em chapas de aço carbono, e balanceado dinamicamente. O Ventilador primário é maior que o secundário, e também o que difere é que o ar primário faz uma troca térmico com os gases de saída dentro do Pré-Aquecedor e entra com a temperatura mais elevada dentro da fornalha, já o secundário injeta ar frio.

## **VENTILADOR SECUNDÁRIO**

O sistema de ar secundário injeta ar no ponto divisório da fornalha entre a área de gaseificação e queima dos sólidos com a área de combustão dos voláteis. Por ser injetado com uma pressão elevada garante a mistura completa do ar de combustão com os voláteis, efetuando assim a queima completa dos mesmos. Sendo o ventilador tipo centrífugo é construído em chapas de aço carbono, e balanceado dinamicamente. Além de auxiliar na queima, o ar secundário também influencia na saída de gases na chaminé, ou seja, é feita uma malha de controle com base na emissão de CO<sub>2</sub> no chaminé, e o resultado da malha controla a velocidade do ar secundário.

## **EXAUSTOR DE TIRAGEM**

O exaustor é o responsável para fazer a tiragem dos gases de combustão e circulação dos gases do interior da caldeira. Previsto para vencer as perdas de carga entre a fornalha e a chaminé, bem como as áreas de troca, o sistema de coleta de particulados e os dutos. O ventilador tipo centrífugo é construído em chapas de aço carbono, e balanceado dinamicamente. O motor do Exaustor em quase todas as caldeiras sempre é o maior, devido a sua alta potência, o exaustor é instalado a Julsante dos Filtros que retiram as partículas do ar, o mesmo tem a capacidade de sugar os gases até dentro da fornalha. A fornalha sempre deve trabalhar com pressão interna negativa, para isso, a malha de controle é feita em cima da velocidade do Motor do Exaustor.

## **FILTROS DE GASES**

Os gases originados da queima são atraídos pela sucção do exaustor e direcionados para a chaminé, como os gases possuem partículas, não pode ser expelida na chaminé antes da remoção das mesmas. Para isso existe os filtros, do Tipo ciclone que forma as partículas a caírem para baixo e os gases continuarem o seu percurso.

### **3.3. FUNCIONAMENTO DE UMA CALDEIRA**

#### **CONTROLE DA COMBUSTÃO**

Para existir combustão, é necessário pelo menos três elementos, material combustível, oxigênio e a chama. A alimentação de combustível solido por exemplo cavaco, é feita através do silo dosado, que libera diretamente em cima do grelhado que é conectado na fornalha. Após isso é ligado um dos ventiladores para que haja oxigênio dentro da fornalha, em seguida a queima inicial é feita manualmente, jogando diesel em cima do cavaco e, após isso, é acendida.

O objetivo da combustão é manter constante a pressão do vapor gerado pela caldeira independente da demanda solicitada. Isso é feito variando simultaneamente a quantidade de combustível e o ar que entram na caldeira (mantendo a relação ar/combustível dentro de uma faixa adequada). A combustão gera os gases que iram percorrer todos os elementos da caldeira até sair pela chaminé, iram passar principalmente dentro do tambor de vapor e realizar a troca térmica com a água que está por fora dos tubos aquecendo-as e gerando vapor.

O controle da combustão é feito variando a velocidade dos motores das Unidades Hidráulicas do silo dosador e Grelhado, ventilador primário e ventilador secundário. Existe um parâmetro chamado relação, que é um percentual de 10 à 100% de cada motor citado, quanto que ele vai influenciar na combustão, para regular melhor a queima, não queimando tanto material, e não emitindo gases fora do valor permitido pelos órgãos vigentes.

### **CONTROLE DA TIRAGEM**

Como citado, a pressão interna da fornalha precisa sempre estar negativa, pois se a mesma estiver com pressão positiva, existe riscos de explosões e incêndios em elementos, como por exemplo nas extrações de cinzas ou silos dosadores. Para manter a pressão negativa dentro da fornalha, é feito uma malha de controle que varia a velocidade do exaustor, que é dimensionado para retirar todos os gases desde a fornalha.

### **CONTROLE DE NÍVEL DE ÁGUA**

Um dos pontos críticos na operação de caldeiras é o nível de água dentro do tambor de vapor, pois a água armazenada é transformada em vapor e vai para o processo, diminuindo o nível de água na caldeira. Se tiver muita água dentro do tambor de vapor, acontece o chamado arraste de água, onde o vapor que sai para o processo acaba arrastando água em formato líquido junto. Por outro lado, se o nível da caldeira baixar, ao ponto que os tubos de passa os gases dentro se descobrirem, os tubos acabam aquecendo muito, pois não existe mais troca térmica com a água. Neste momento a caldeira precisa ser desligada e ficar em espera até que os tubos esfriem novamente. Em caso de falta de água e em seguida, a caldeira receber água frio, acaba deformando os tubos devido ao choque térmico, causando sérios danos ao equipamento, que é imediatamente parado para manutenção.

O controle de nível varia a velocidade das bombas de água da caldeira, normalmente são duas, porém em regime de trabalho é somente uma, sendo a segunda em Stand By.

## **EMISSÃO DE GASES**

Como a combustão emite gases que poluem a atmosfera, não se pode emitir qualquer valor de CO<sub>2</sub>, para isso a malha de controle da emissão de gases varia a velocidade do motor do ventilador secundário que injeta ao frio em cima a área de queima na fornalha.

### **3.4. TURBINA A VAPOR**

Uma turbina a vapor é um dispositivo mecânico que transforma a energia do vapor pressurizado em trabalho mecânico. As turbinas a vapor são utilizadas em processos industriais onde existe a disponibilidade de vapor para utilização em cogeração de energia.

#### **3.4.1. COMO FUNCIONA UMA TURBINA A VAPOR**

A transformação de energia total na turbina a vapor, ou seja, a transformação da energia do vapor em energia elétrica ocorre em três etapas:

- 1° - Transformação da energia térmica do vapor em energia cinética;
- 2° - Transformação da energia cinética em energia mecânica;
- 3° - Transformação da energia mecânica em energia elétrica por meio do acionamento de um gerador elétrico;

Para entender o funcionamento de uma turbina a vapor, deve-se inicialmente entender alguns detalhes sobre o seu combustível de funcionamento, o vapor.

O vapor, como todo fluido possui basicamente três formas básicas de energia:

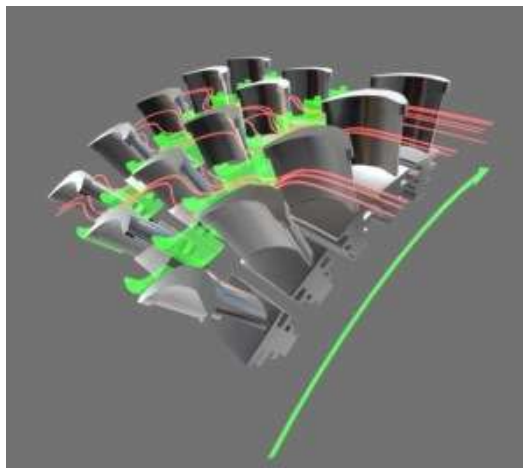
- 1° - Velocidade (cinética)
- 2° - Pressão
- 3° - Temperatura

No interior das turbinas existem muitas peças as quais falaremos ao longo dos assuntos. Mas hoje vamos destacar e tratar uma das mais importantes que são as palhetas.

Toda palheta de uma turbina a vapor contém um perfil aerodinâmico que ocasiona uma diferença de pressão quando o vapor passa por ela.

Então basicamente, o processo é o seguinte:

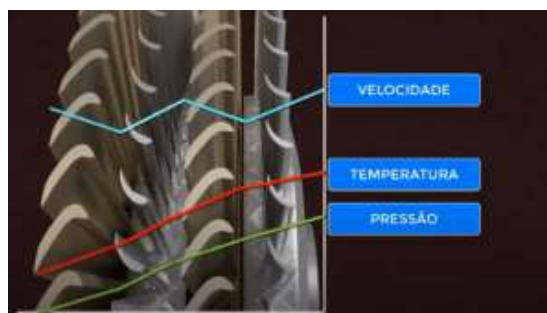
- 1° O vapor entra na turbina a uma determinada temperatura e pressão;
- 2° O vapor é direcionado para uma peça (placa expansora ou diafragma) que direciona todo o fluxo do vapor para as palhetas;
- 3° As palhetas estão fixadas em rodas, que por sua vez estão ligadas a um eixo ou o rotor da turbina;



*Figura 3 – Palhetas de uma turbina a vapor*  
*Fonte – Turbivap, Manual Técnico*

Portanto, durante o funcionamento de uma turbina a vapor, o vapor sempre será direcionado para as palhetas, onde em cima do perfil, ou seja, por dentro da palheta ocorre uma pressão maior e por fora, uma pressão menor do vapor.

Essa diferença de pressão ajudada pela força de ação e reação de Newton, cria uma espécie de força de sustentação, e é essa força a responsável por fazer o rotor girar.



*Figura 4 – Palhetas Detalhadas*  
*Fonte – Turbivap, Manual Técnico*

Durante a operação de uma turbina a vapor, a velocidade, pressão e temperatura do vapor diminuem a medida que o vapor passa pelas rodas da turbina. Mas voltando um pouquinho ainda antes do vapor passar pela palheta da roda da turbina, é necessário expandir esse vapor para elevar sua velocidade tendo em vista que essa mesma velocidade, temperatura e pressão diminuem durante a operação de uma turbina a vapor.

Assim, a força de sustentação do vapor sozinho não é efetivo e não consegue fazer o rotor girar sozinho.

### **3.4.2. COMO OCORRE A EXPANSÃO DO VAPOR NAS TURBINAS A VAPOR?**

A expansão de vapor na turbina ocorre por meio da pressurização do vapor, para conseguir um ganho de velocidade cinética. Dentro das turbinas vapor, as peças que fazem isso são os diafragmas e as placas expansoras.

### **3.4.3. COMO ESSAS PEÇAS EXTRAEM A ENERGIA DO VAPOR?**

Olhando o perfil de uma placa expansora ou diafragma observamos uma redução da área de passagem do vapor, ou seja, uma restrição de fluxo de vapor, isso ocasiona diminuição de pressão, no entanto um aumento de velocidade cinética do vapor. Esse efeito chama-se Venturi.

### **3.4.4. TURBINA A VAPOR DE CONDENSACÃO**

As turbinas a vapor de condensação são aquelas que aproveitam ao máximo a energia potencial do vapor. Logo, o vapor que sai da turbina não pode mais ser aproveitado para a geração de energia devido ao seu conteúdo já em estado líquido. Nessas turbinas o vapor a uma pressão menor que a atmosférica (vácuo) é direcionado ao condensador.

### **3.4.5. TURBINA A VAPOR DE CONTRAPRESSÃO**

Nas turbinas de contrapressão, o vapor de saída da turbina ainda tem energia suficiente para alimentar outros processos industriais antes de voltar como água para uma caldeira. Como a maioria dos processos demandam uma pressão entre 8 a 15 bar de pressão, a um ponto de coleta de vapor na turbina chamada de extração, nela vai a vazão de vapor que vai para o processo de valor mais significativo, e na saída da turbina, é encontrada pressão mais baixas na casa dos 3 a 8 Bar

O vapor de escape destas turbinas se encontra na maior parte das vezes na região superaquecida.

### **3.4.6. DETALHAMENTO DA TURBINA UTILIZADA**

A turbina adquirida para essa aplicação é o modelo TBQ.MEGA400E, fabricado pela Turbimaq, empresa localizada em Piracicaba / SP. O Tipo da turbina é de Múltiplo estágio de contrapressão com 01 extração controlada.

As turbinas de Multi-Estágios da série MEGA, instaladas no Brasil e exterior, produzem aproximadamente 1,1 GW de potência. Essa série foi projetada em conformidade com as normas API611/612, sendo sistema de lubrificação forçada, válvulas de controle e fechamento rápido acionadas por atuadores hidráulicos, selagem de vapor e óleo tipo labirintos, carcaças bipartidas, os mancais radiais são de deslizamento e os axiais de pastilhas oscilantes tipo tilting pad.

Quando a planta industrial do cliente requer vapor para alimentação de processos, essa série de turbinas oferece a opção de instalação de bloco de extração de vapor (modelo MEGA-E), controlada ou não-controlada (sangria), permitindo assim atender a respectiva demanda.



Todo o processo de manufatura das turbinas e seus componentes são executados seguindo rigorosos padrões de qualidade, acompanhados por inspetores qualificados, a fim de garantir o máximo desempenho.

Carcaça em aço fundido bi-partida no sentido horizontal suportada por dois pedestais simetricamente distribuídos sobre a linha de centro da carcaça. Corpo de válvulas em aço fundido flangeado à carcaça inferior da turbina e fixado através de prisioneiros e porcas.

Bloco de válvulas da extração em aço fundido, integrado a carcaça superior da turbina. A posição da saída de vapor da extração será na definida em conjunto com o cliente na ocasião do detalhamento do projeto. O conjunto rotativo da turbina dispõe entre cada roda uma placa de diafragma que proporciona a expansão gradativa do vapor em cada estágio do rotor.

No eixo da turbina está instalado o dispositivo de desarme mecânico por sobre velocidade. O rotor da turbina é balanceado dinamicamente de acordo com a norma ISO 1940, classe de rotor G2,5. Os mancais das turbinas são fabricados em aço-carbono revestidos de metal patente. O mancal axial considerado mancal combinado, integra num único bloco a parte radial (apoio) e o colar de pastilhas oscilantes.

Para os equipamentos de múltiplo estágio é imprescindível que o esforço axial seja suportado por pastilhas oscilantes. As pastilhas axiais são fabricadas em bronze e revestidas de metal patente. Regulador eletrônico de velocidade de fabricação Woodward modelo 505XT com conversores eletro-hidráulicos Woodward modelo CPC-II e atuação sobre a válvula de controle do vapor de admissão/extração por meio de servos atuadores hidráulicos.

A turbina será equipada com os seguintes sistemas de proteção de sobre velocidade: Sobre velocidade mecânica, que atua através de pino montado no eixo da turbina que é acionado através da força centrífuga em função do aumento da rotação da turbina; Sobre velocidade elétrica, que atua através de configuração do regulador de velocidade 505XT.

Sobre velocidade eletrônica, que atua através de sistema dedicado, de fabricação Woodward, modelo Protech SX. A válvula de emergência da turbina é montada no corpo de válvulas de admissão de vapor, fixado ao corpo inferior da turbina.

#### **3.4.1. ESTUDO TERMODINAMICO DO PROCESSO DO CLIENTE**

Abaixo está o estudo termodinâmico do cliente, o dimensionamento do conjunto turbogerador é com base nos consumos de vapor do cliente.

<b>TURBINA CONTRA PRESSÃO</b>		
<b>ENTRADA (PÓS CALDEIRA)</b>		
PRESSÃO	43, bar(a)	
TEMPERATURA	425,0 °C	
ENTALPIA	3.268,4 kJ/kg	
ENTROPIA	6,82 kJ/kg°C	
VAZÃO MÁSSICA	42.588,0 kg/h	42,59 t/h
<b>EXTRAÇÃO INTERMEDIÁRIA DA TURBINA</b>		
PRESSÃO (Bar(a))	14, bar(a)	
ENTALPIA iso	2.964,8 kJ/kg	
ENTALPIA	3.068,0 kJ/kg	
TEMPERATURA	312,3 °C	
ENTROPIA	7,0 kJ/kg	
TÍTULO	100,0%	
VAZÃO MÁSSICA	31.511,0 kg/h	31,51 t/h
POTÊNCIA DA TURBINA	1753,5 kW	1,75 MW
Consumo específico da turbina	17,97 kg/h	
<b>SAÍDA DA TURBINA</b>		
PRESSÃO (Bar(a))	5, bar(a)	
ENTALPIA iso	2.828,3 kJ/kg	
ENTALPIA	2.909,8 kJ/kg	
TEMPERATURA	225,4 °C	
ENTROPIA	7,2 kJ/kg	
TÍTULO	100,0%	
VAZÃO MÁSSICA	11.077,0 kg/h	11,08 t/h
POTÊNCIA DA TURBINA	1103,2 kW	1,1 MW
<b>GERADOR</b>		
Efs (reductor)	0,96	
Efs (gerador)	0,97	
Potência do gerador	2654,7 kW	2,65 MW

*Figura 5 – Dados Termodinâmicos do Processo do Cliente*

*Fonte – ICAVI, Engenharia de Especificações*

### 3.4.2. CARACTERISTICA DE GERACÃO

PONTO DE OPERAÇÃO	1	2	3	4	5	6	
Potência nos bornes do gerador	2.850	3.270	1.750	1.290	700	3.600	kW
Pressão do vapor na entrada da turbina	43	43	43	43	43	43	bar (a)
Temperatura do vapor na entrada da turbina	425	425	425	425	425	425	°C
Vazão de vapor na entrada da turbina	43,65	50,0	35,0	30,0	22,0	50,0	t/h
Pressão do vapor na extração da turbina	14	14	14	14	14	14	bar (a)
Temperatura do vapor na extração da turbina	304	295	322	336	362	295	°C
Vazão de vapor na extração da turbina	31,31	37,66	27,0	22,0	15,0	34,5	t/h
Pressão de vapor de escape	5	5	5	5	5	5	bar (a)
Temperatura do vapor no escape	221	220	252	254	262	203	°C
Vazão de vapor na saída da turbina	12,34	12,34	8,0	8,0	7,0	15,5	t/h
Rotação da turbina	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	rpm
Rotação do gerador	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800	rpm
Tolerância admissível	3	3	-	-	-	-	%

PONTO DE OPERAÇÃO	1	2	3	4	5	6	
Potência nos bornes do gerador	2.625	3.050	1.580	1.150	620	3.350	kW
Pressão do vapor na entrada da turbina	43	43	43	43	43	43	bar (a)
Temperatura do vapor na entrada da turbina	425	425	425	425	425	425	°C
Vazão de vapor na entrada da turbina	43,65	50,0	35,0	30,0	22,0	50,0	t/h
Pressão do vapor na extração da turbina	15	15	15	15	15	15	bar (a)
Temperatura do vapor na extração da turbina	315	306	334	348	370	307	°C
Vazão de vapor na extração da turbina	31,31	37,66	27,0	22,0	15,0	33,6	t/h
Pressão de vapor de escape	6	6	6	6	6	6	bar (a)
Temperatura do vapor no escape	241	240	270	272	275	217	°C
Vazão de vapor na saída da turbina	12,34	12,34	8,0	8,0	7,0	16,4	t/h
Rotação da turbina	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	rpm
Rotação do gerador	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800	rpm
Tolerância admissível	3	3	-	-	-	-	%

*Figura 6 – Dados de geração de Energia*

*Fonte – Turbivap fabricante da Turbina, Proposta Tecnica*

### 3.5. CARACTERISTICA DO GERADOR

O gerador adquirido para essa aplicação é o modelo AMG 0560BM04 LSPA, fabricado pela ABB. É do tipo Sincrono.

O Estator é a parte ativa magnética estática do turbogerador. É constituído por um pacote laminado de chapas de aço silício e em suas ranhuras são alojadas as bobinas que formam o enrolamento do estator. O núcleo do estator é montado diretamente na carcaça.

O rotor consiste das partes ativas giratórias, compostas por um pacote de chapas de aço prensado, o enrolamento de campo e o enrolamento de amortecimento. Os rotores dos turbogeradores WEG possuem forma cilíndrica (polos lisos), em cuja periferia o enrolamento de campo e o enrolamento amortecedor são alojados em ranhuras. Os eixos são fabricados em aço forjado ou laminados e usinados conforme as especificações. A ponta de eixo normalmente é cilíndrica ou flangeada.

**Excitatriz Brushless (sem Escovas)** Os turbogeradores com sistema de excitação brushless possuem uma excitatriz principal girante instalada em um compartimento na parte traseira do turbogerador. O estator da excitatriz principal é alimentado em corrente contínua pelo regulador de tensão e o rotor da excitatriz principal alimenta o enrolamento de campo do turbogerador, através de uma ponte retificadora trifásica girante

A excitatriz auxiliar ou PMG (Permanent Magnet Generator) é um pequeno gerador incorporado aos turbogeradores brushless WEG com a função de alimentar o circuito de potência do regulador de tensão. O rotor da PMG, instalado no eixo do turbogerador, é constituído por um pacote de chapas onde são alojados os ímãs permanentes. O estator da PMG é montado normalmente na carcaça do compartimento externo, onde também é instalado o estator da excitatriz principal

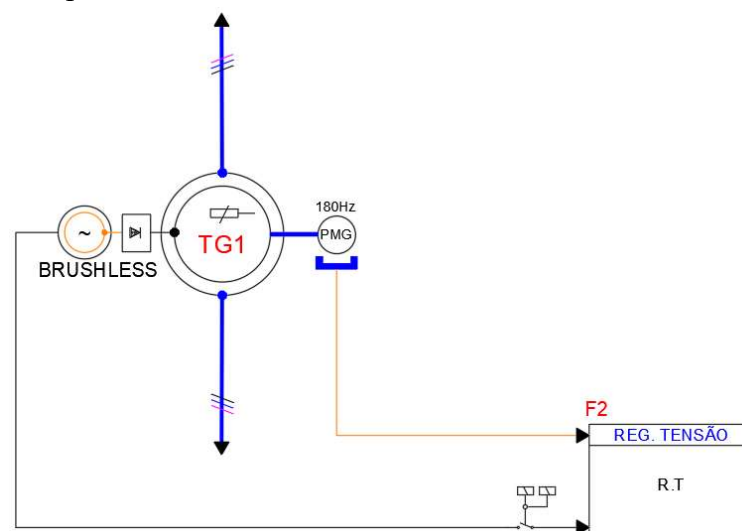


Figura 7 – Regulação de Tensão do Gerador

Fonte – Diagrama Unifilar desenvolvida pela Turbodrives

As características do gerador dimensionado e especificado para essa aplicação:

**Potência nominal** = 3,75 MVA

**Tensão de Saída** = 6,6 kV

**Frequência** = 60 Hz

**Corrente nominal** = 328 A

**Fator de Potência** = 0,8

**Corrente Curto Circuito** = 2,45 kA

**Rotação Nominal** = 1800 RPM

As características do gerador em regime:

### Excitação:

Excitation characteristics

	Exciter voltage	Exciter current
Rated load	38,0 V	3,2 A
No load	12,8 V	1,1 A
Excitation power	13,1 kW	

Figura 8 – Tensão de excitação do Gerador

Fonte – Manual do Gerador ABB

### Rendimento / Fator de Potência:

Efficiency table

Load	PF=0,8	Guaranteed	PF=1,0	Guaranteed
110 %	96,73 %	96,41 %	97,47 %	97,22 %
100 %	96,72 %	96,39 %	97,46 %	97,20 %
75 %	96,50 %	96,15 %	97,28 %	97,00 %
50 %	95,73 %	95,30 %	96,65 %	96,31 %
25 %	92,86 %	92,14 %	94,29 %	93,72 %

Figura 9 – Rendimento / Fator de Potência do Gerador

Fonte – Manual do Gerador ABB

### Reatâncias:

Reactances

Xd (Unsaturated)	2,708 p.u.	Xd' (Saturated)	0,184 p.u.
Xd'' (Saturated)	0,133 p.u.	Xq (Unsaturated)	1,272 p.u.
Xq'' (Unsaturated)	0,18 p.u.	X0 (Unsaturated)	0,069 p.u.
X1 (Unsaturated)	0,094 p.u.	X2 (Saturated)	0,148 p.u.
Xp (Saturated)	0,152 p.u.		

Note! Tolerances for reactances,  $\Delta x$ :

$x_d''$ :  $\Delta x \leq \pm 20\%$        $x_d, x_q, x_d'$ :  $\Delta x \leq \pm 15\%$

Figura 10 – Reatâncias do Gerador

Fonte – Manual do Gerador ABB

### 3.5.1. PROTEÇÃO DO GERADOR

Para proteção do Gerador foi utilizado um relé modelo SEL700G da Empresa SEL. Entre todas as funções de proteção que ele dispõe, abaixo estão as principais.

**Proteção Abrangente do Gerador** - Conecte o SEL-700G a geradores de pequeno, médio ou grande porte para proteção principal e de backup completa. O SEL-700GT fornece uma solução de proteção de interligação compatível com IEEE 1547 para geração distribuída. A adição da conexão da tensão de neutro opcional ao SEL-700G fornece proteção terra estator 100% com base nas medições da tensão de terceiro-harmônico. Você pode conectar a entrada da corrente de neutro para proteger máquinas solidamente aterradas ou aterradas através de resistência.

**Sincronizador Automático** - Substitua os relés externos de controle e sincronização do gerador pela função de sincronização automática integrada. O SEL-700G sincroniza automaticamente a frequência, a tensão e o ângulo de fase e conecta o gerador ao sistema de potência. Um sincronoscópio baseado em PC e relatórios de partida do gerador permitem monitorar o processo de sincronização do gerador.

**Proteção Diferencial de Corrente** - Aplique elementos diferenciais de corrente sensíveis com restrição porcentual e um elemento sem restrição, junto com elementos de verificação de sincronismo e volts-por-hertz, para proteger tanto o gerador quanto o transformador elevador. Elementos diferenciais de corrente opcionais detectam faltas no estator usando uma função do diferencial de corrente sensível e segura. A compensação da conexão dos TCs e do transformador de potência permite que o transformador elevador da unidade seja incluído na zona do diferencial do gerador.

**Monitoramento do Desgaste do Disjuntor** - Registre o desgaste acumulado dos contatos do disjuntor com a função de monitoramento do disjuntor, a qual utiliza as especificações do fabricante para definir os limites de operação do disjuntor. O monitor interno rastreia o número total de operações de fechamento/abertura e integra a corrente interrompida por fase. Você pode definir um alarme para alertar os operadores quando as grandezas medidas e acumuladas se aproximarem dos limites para manutenção. Estas informações facilitam a manutenção pró-ativa do disjuntor e sua substituição sem subutilização de recursos.

**Facilidade das Comunicações** - Escolha entre comunicações seriais ou Ethernet de fibra óptica ou cobre, portas simples ou dual, e vários protocolos, incluindo IEC 61850 Edition 2, IEC 60870-5-103, o PRP (Parallel Redundancy Protocol) IEC 62439, comunicações Mirrored Bits, Modbus, DNP3 serial e DNP3 LAN/WAN. Múltiplas sessões de Modbus TCP ou Modbus serial estão disponíveis para configuração personalizada da sua aplicação.

**Detecção de Ilhamento** - A proteção da taxa de variação de frequência (81RF) e a função de deslocamento vetorial (78VS) opcionais suportam a detecção de ilhamento.

**Proteção Confiável em Ambientes Agressivos** - O SEL-700G opera em condições extremas, com uma faixa da temperatura de operação de  $-40^{\circ}$  a  $+85^{\circ}\text{C}$  ( $-40^{\circ}$  a  $+185^{\circ}\text{F}$ ), e foi projetado e testado para exceder as normas aplicáveis, incluindo vibração, compatibilidade eletromagnética e condições ambientais adversas. Além disso, o SEL-700G é certificado pela ATEX e Underwriters Laboratories (UL) Classe I, Divisão 2 para uso em ambientes perigosos e potencialmente explosivos.

### Tabela ANSI/Acrônimos e Funções

21C/51VC	Distância de Compensação, Sobrecorrente Temporizado com Controle/Restrição de Tensão
24	Volts/Hertz
25G	Check de Sincronismo
27	Subtensão
27I	Subtensão de Tempo-Inverso
27S	Subtensão de Sincronismo
32	Direcional de Potência
40	Perda de Campo
46	Desequilíbrio de Corrente
49R	Sobrecarga Térmica (Detector de Temperatura por Resistência [RTD])
49T	Modelo Térmico
50N	Sobrecorrente de Neutro
50 (P,G,Q)	Sobrecorrente (Fase, Terra, Seq. Neg.)
51 (P,G,Q)	Sobrecorrente Temporizado (Fase, Terra, Seq. Neg.)
51N	Sobrecorrente de Neutro
59I	Sobretensão de fase inversa
59N	Sobretensão de Neutro
(64G1)	
59S	Sobretensão de Sincronismo
59 (P,G,Q)	Sobretensão (Fase, Terra, Seq. Neg.)
60	Perda de Potencial
64F	Terra no Campo
64G	Terra Estator 100%
67 (P,G,Q)	Sobrecorrente Direcional (Fase, Terra, Seq. Neg.)
67N	Sobrecorrente Direcional de Neutro
78	Perda de Sincronismo
78VS	Deslocamento Vetorial
81 (O,U,R)	Frequência (Sobre, Sub, Taxa)
87	Diferencial de Corrente Trifásico
87N	Diferencial de Corrente de Neutro
REF	Falta à Terra Restrita

### Funções Adicionais

52PB	Botão de Pressão Trip/Close (Abrir/Fechar)
85 RIO	Comunicações SEL MIRRORED BITS®
BF	Falha do Disjuntor
BRM	Monitor de Desgaste do Disjuntor
DFR	Relatórios de Evento
ENV	SEL-2600
HMI	Interface do Operador (IHM)
LDP	Perfil dos Dados de Carga
LGC	Equações de Controle SELogic®
MET	Medição de Alta Precisão
PMU	Sincrofasores
SER	Registrador Sequencial de Eventos (SER)
RTU	Unidade Terminal Remota (UTR)

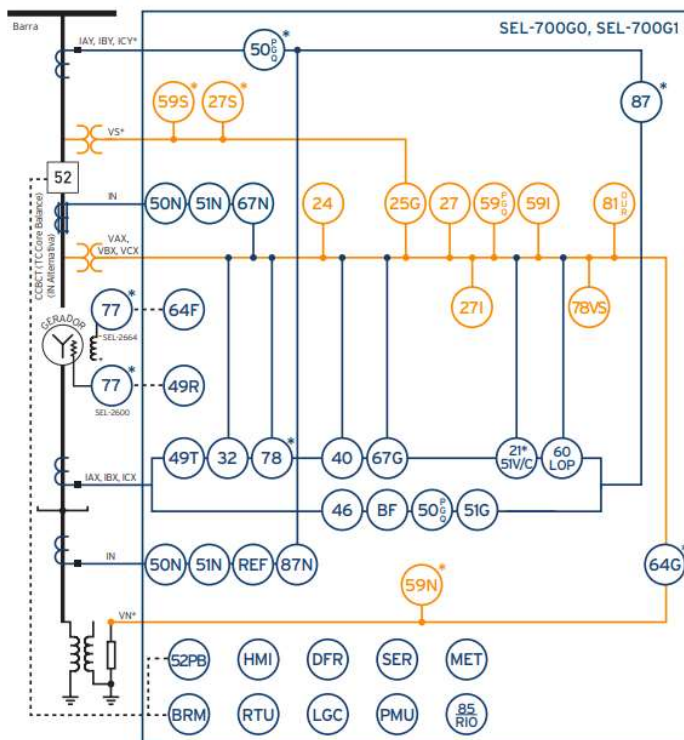


Figura 11 – Proteções do Relé SEL  
Fonte –Manual Rele SEL700G

### 3.5.2. SINCRONIZAÇÃO COM A REDE

Um gerador pode trabalhar de forma isolada, alimentando diretamente as cargas sem interligação com a rede da concessionária. A desvantagem deste tipo de operação, que se caso o gerador falhar, a carga não tem outra fonte de alimentação, perdendo todas as cargas. Outra questão também, a potência total gerada vai depender do consumo das cargas, não sendo possível definir um valor para geração.

Ao sincronizar com a rede, aumenta a confiabilidade no sistema, já que se houver a perda do gerador desta unidade, outros geradores continuam alimentando as cargas, além de

onde –é possível definir valores de geração de potência. Para isso algumas condições devem ser respeitadas

- As tensões eficazes de linha dos dois geradores devem ser iguais
- Os dois geradores devem ter a mesma sequência de fase
- Os ângulos de fase dos dois geradores devem ser iguais
- A frequência do novo gerador, gerador que está entrando em paralelo, deve ser ligeiramente superior a frequência do sistema que está em operação.

## TENSÕES DE LINHA

Para ajuste da tensão do novo gerador, deve-se ajustar a Corrente  $I_f$  até para se igualar com a tensão da rede.

$$E_A = K \cdot \Phi \cdot \omega$$

Sendo  $K$  uma constante e  $\omega$  está atrelado a frequência de trabalho, restou variar o fluxo através da corrente de campo.

## SEQUENCIA DE FASES

A sequência de fase dos dois geradores devem ser a mesma. Garantindo o sincronismo entre as fases.

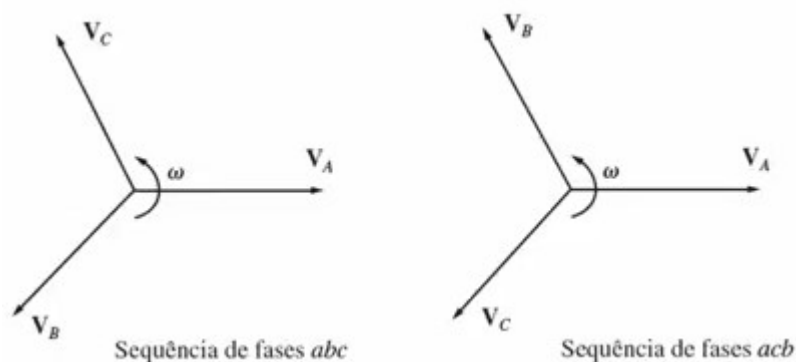


Figura 12 – Sequência de fases Gerador

Fonte – Fundamentos de Maquinas Elétricas, Chapman 5ed.

## ÂNGULO DE FASE

Mesma que a sequência de fase sejam iguais, os ângulos de fase devem estar alinhados, como abaixo, na imagem representa uma defasagem, essa defasagem causa uma diferença de potencia constante.



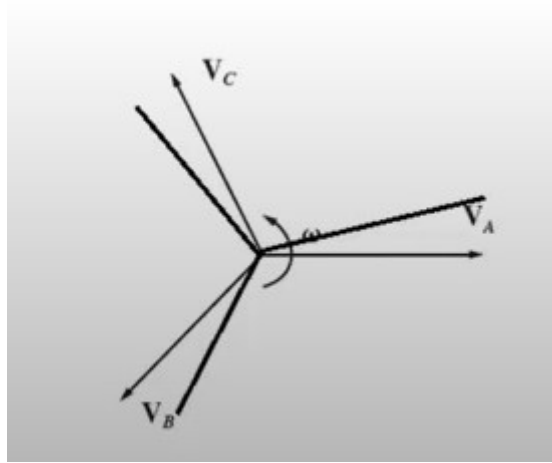


Figura 13 – Defasagem entre fases

Fonte – Fundamentos de Maquinas Elétricas, Chapman 5ed.

## FREQUÊNCIA x POTENCIA

Regulação da máquina primária do gerador que está entrando para uma frequência (velocidade), ligeiramente superior a frequência nominal do barramento. Pois no somente que o gerador entra na rede, a rede demanda uma carga que acaba pesando mais o eixo, diminuindo a velocidade do eixo. Nesse instante o gerador entra na rede como um motor, para que isso não ocorra, a frequência deste gerador deve ser ligeiramente superior a frequência da rede.

A máquina motriz que é conectada ao eixo do gerador, tende a diminuir a velocidade de rotação na medida em que a potência elétrica  $P$  consumida aumenta. Essa relação tende a ser naturalmente não linear. A não ser que algum mecanismo de controle a torne linear.

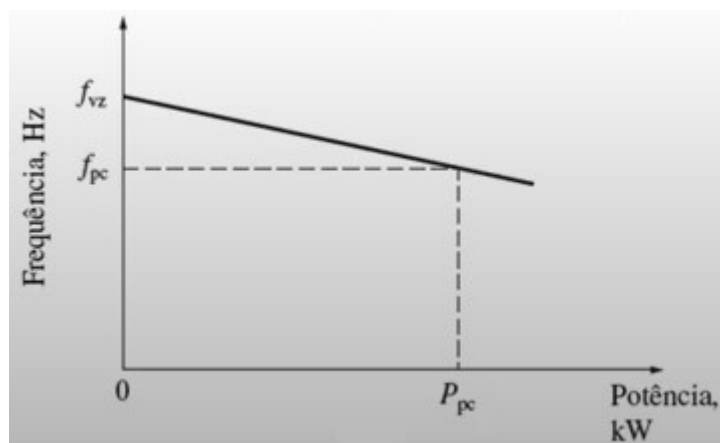


Figura 14 – Curva Frequência x Potencia

Fonte – Fundamentos de Maquinas Elétricas, Chapman 5ed.

$P$  = Saida de potência do gerador

$f_{vz}$  = Frequência a vazio do gerador.

$f_{pc}$  = frequência em plena carga do gerador

Comportamento das cargas indutivas e capacitivas

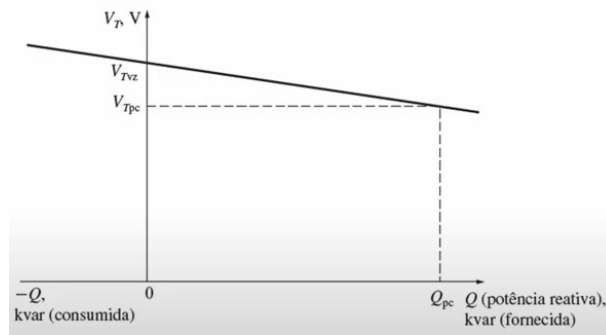


Figura 15 – Curva Cargas Indutivas / Capacitivas  
 Fonte – Fundamentos de Maquinas Elétricas, Chapman 5ed.

Ao analisar essa curva, conforme vai aumentando a carga indutiva, a tensão terminal do gerador vai diminuindo. Uma segunda análise seria ao contrário, conforme vai aumentando a carga capacitiva, a tensão terminal do gerador vai aumentando.

#### 4. RESULTADOS FINAIS

##### 4.1. POTENCIA GERADA – MEMORIAL DE CALCULO (PROJETO)

A Potência de geração depende da vazão de vapor do processo do cliente, pois a turbina utilizada é do tipo de contrapressão.

Considerando os dados para cálculo de geração:

- Vazão de vapor do cliente sendo de 42,59 ton/h de vapor

GERADOR		
Efs (reductor)	0,96	
Efs (gerador)	0,97	
Potência do gerador	2654,7 kW	2,65 MW

Figura 16 – Memorial de calculo  
 Fonte – ICAVI, Engenharia de Especificações

##### 4.1. POTENCIA GERADA – REAL DADA PELA TURBINA (REALIZADO)

PONTO DE OPERAÇÃO	1	2	3	4	5	6	
Potência nos bornes do gerador	2.850	3.270	1.750	1.290	700	3.600	kW
Pressão do vapor na entrada da turbina	43	43	43	43	43	43	bar (a)
Temperatura do vapor na entrada da turbina	425	425	425	425	425	425	°C
Vazão de vapor na entrada da turbina	43,65	50,0	35,0	30,0	22,0	50,0	t/h
Pressão do vapor na extração da turbina	14	14	14	14	14	14	bar (a)
Temperatura do vapor na extração da turbina	304	295	322	336	362	295	°C
Vazão de vapor na extração da turbina	31,31	37,66	27,0	22,0	15,0	34,5	t/h
Pressão de vapor de escape	5	5	5	5	5	5	bar (a)
Temperatura do vapor no escape	221	220	252	254	262	203	°C
Vazão de vapor na saída da turbina	12,34	12,34	8,0	8,0	7,0	15,5	t/h
Rotação da turbina	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	8.000	rpm
Rotação do gerador	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800	1.800	rpm
Tolerância admissível	3	3	-	-	-	-	%

Figura 17 – Dados reais de geração  
 Fonte – Turbimaq Fabricante da Turbina, Proposta tecnica

## 4.2. CARGAS AUXILIARES

Para geração de vapor, a caldeira tem algumas cargas que precisam ser alimentadas:

- Potencia consumida pela caldeira = 1.086,15 KW/h
- Potencia gerada = 2.850.000,00 kW (2,85 MW)
- Potencia Útil Gerada = 2.648.913,85 Kw

DADOS DOS EQUIPAMENTOS		DADOS EM REGIME			
EQUIPAMENTO	POTENCIA	FATOR UTILIZAÇÃO	POT. UTILIZADA	RENDIMENTO	Kw/h
EXAUSTOR	480,00	71%	340,80	96%	353,89
BOMBAS PRINCIPAIS 01	185,00	80%	148,00	96%	154,01
BOMBAS PRINCIPAIS 02	185,00	80%	148,00	96%	154,01
VENTILADOR PRIMARIO	110,00	71%	78,10	95%	82,21
VENTILADOR SECUNDARIO	75,00	51%	38,25	95%	40,26
UNIDADE HIDRAULICA FUNDO MOVEI 01	45,00	90%	40,50	95%	42,59
UNIDADE HIDRAULICA FUNDO MOVEI 02	45,00	90%	40,50	95%	42,59
UNIDADE HIDRAULICA FUNDO MOVEI 03	45,00	90%	40,50	95%	42,59
UNIDADE HIDRAULICA GRELHADO 01	1,47	85%	1,25	87%	1,45
UNIDADE HIDRAULICA GRELHADO 02	1,47	85%	1,25	87%	1,45
UNIDADE HIDRAULICA GRELHADO 03	1,47	85%	1,25	87%	1,45
UNIDADE HIDRAULICA SILO DOSADOR 01	5,51	85%	4,69	91%	5,15
UNIDADE HIDRAULICA SILO DOSADOR 02	5,51	85%	4,69	91%	5,15
REDLER DE CINZA	2,21	85%	1,88	88%	2,14
CORREIA TRANSPORTADORA POS.19	9,19	85%	7,81	92%	8,46
BOMBA TORRE RESFRIAMENTO 01	9,19	85%	7,81	91%	8,57
BOMBA TORRE RESFRIAMENTO 02	9,19	85%	7,81	91%	8,57
TORRE RESFRIAMENTO	2,21	85%	1,88	87%	2,16
BOMBA TQ DESCARGA DE FUNDO 01	2,21	85%	1,88	87%	2,17
BOMBA TQ DESCARGA DE FUNDO 02	2,21	85%	1,88	87%	2,17
CORREIA TRANSPORTADORA POS.20	2,21	85%	1,88	88%	2,14
SOPRADOR DE FULIGEM RETRATIL FORNALHA 01	0,74	85%	0,63	83%	0,75
SOPRADOR DE FULIGEM RETRATIL FORNALHA 02	0,74	85%	0,63	83%	0,75
SOPRADOR DE FULIGEM RETRATIL FORNALHA 03	0,74	85%	0,63	83%	0,75
SOPRADOR DE FULIGEM RETRATIL FORNALHA 04	0,74	85%	0,63	83%	0,75
SOPRADOR FULIGEM FIXO 01	0,24	85%	0,21	73%	0,28
SOPRADOR FULIGEM FIXO 02	0,24	85%	0,21	73%	0,28
SOPRADOR FULIGEM FIXO 03	0,24	85%	0,21	73%	0,28
SOPRADOR FULIGEM FIXO 04	0,24	85%	0,21	73%	0,28
SOPRADOR FULIGEM FIXO 05	0,24	85%	0,21	73%	0,28
SOPRADOR FULIGEM FIXO 06	0,24	85%	0,21	73%	0,28
SOPRADOR FULIGEM FIXO 07	0,24	85%	0,21	73%	0,28
SOPRADOR FULIGEM FIXO 08	0,24	85%	0,21	73%	0,28
VALVULA ROTATIVA GRELHADO 01	1,10	85%	0,94	88%	1,07
VALVULA ROTATIVA GRELHADO 02	1,10	85%	0,94	88%	1,07
VALVULA ROTATIVA GRELHADO 03	1,10	85%	0,94	88%	1,07
VALVULA ROTATIVA PRÉ-AR	1,10	85%	0,94	88%	1,07
VALVULA ROTATIVA ECONOMIZADOR	1,10	85%	0,94	88%	1,07
VALVULA ROTATIVA MULTICLONE	1,10	85%	0,94	88%	1,07
VALVULA ROTATIVA NANOCICLONE	1,10	85%	0,94	88%	1,07
MOTOVIBRADOR MOEGA PRÉ-AR	0,12	85%	0,10	66%	0,15
MOTOVIBRADOR MOEGA ECONOMIZADOR	0,12	85%	0,10	66%	0,15
MOTOVIBRADOR MOEGA MULTICLONE	0,12	85%	0,10	66%	0,15
MOTOVIBRADOR MOEGA NANOCICLONE	0,12	85%	0,10	66%	0,15
AGITADOR SKID PRODUTO QUÍMICO 1	0,24	85%	0,21	63%	0,33
AGITADOR SKID PRODUTO QUÍMICO 2	0,24	85%	0,21	63%	0,33
AGITADOR SKID PRODUTO QUÍMICO 3	0,24	85%	0,21	63%	0,33
VENTILADOR RADIADOR UH. FUNDO MOVE 01	0,74	85%	0,63	83%	0,75
VENTILADOR RADIADOR UH. FUNDO MOVE 02	0,74	85%	0,63	83%	0,75
VENTILADOR RADIADOR UH. FUNDO MOVE 03	0,74	85%	0,63	83%	0,75
DERIVAÇÃO - CCM 02 (TRATAMENTO DE ÁGUA)	132	60%	79,20	96%	82,33
DERIVAÇÃO - PAINEL TURBINA	30	75%	22,50	94%	23,83
DERIVAÇÃO - SERVIÇOS AUXILIARES	30	75%	22,50	9440%	0,24
Total Kw/h					1086,15

Figura 18- Dados das cargas da caldeira  
Fonte – ICAVI, Engenharia de Especificações

## 5. CONCLUSÃO

Turbinas do tipo de contrapressão visam alimentar com vapor os processos dos clientes, não sendo totalmente ideais para geração de energia, desta forma a geração não será eficiente ao longo de todo o processo, pois sua geração vai depender consumo do cliente, caso o consumo for 0 de vapor, não há geração de energia.

Para se obter uma termoelétrica eficiente, a turbina indicada seria a turbina de condensação, onde o vapor que sai da turbina, volta para o estado líquido novamente, então

podemos concluirmos que a quantidade de energia gerada pode ser controlada abrindo a válvula de admissão de vapor.

A Sincronização do novo gerador com a rede é um dos principais procedimentos no quesito geração de energia. Pois no momento em que se habilita a sincronização, todos os todos como tensão eficaz de linha, sequência de fase, ângulo de fase e frequência devem estar alinhados. Na divergência de uma das grandezas, haverá uns problemas, como por exemplo na frequência, se a frequência do novo gerador não estiver ligeiramente maior que a frequência da rede, o gerador novo entra como uma carga ao invés de gerar energia.

## 6. ANEXOS

### **Tubinas a Vapor:**

<https://turbivap.com.br/funcionamento-turbina-a-vapor/#:~:text=Turbina%20a%20vapor%20de%20contrapress%C3%A3o&text=Este%20tipo%20de%20gera%C3%A7%C3%A3o%20conjunta,press%C3%A3o%20maior%20que%20a%20atmosf%C3%A9rica.>

### **Tubinas a Vapor:**

<http://www.turbimaq.com.br/2020/index.php/produtos/turbinas-api/serie-mega-contrapressao>

### **Relé SEL700G**

[https://cms-cdn.selinc.com/assets/Literature/Product%20Literature/Flyers/700G\\_PF00211PT\\_20180925.pdf?v=20191016-151345](https://cms-cdn.selinc.com/assets/Literature/Product%20Literature/Flyers/700G_PF00211PT_20180925.pdf?v=20191016-151345)

### **Gerador (Referencias ABB):**

[https://library.e.abb.com/public/f0cb3f5af8414ca783e2aa3d579cb7fd/Induction%20Manual%203BFP%20000%20080%20R0138%20REV%20H%20PT\(BR\)%20lowres.pdf](https://library.e.abb.com/public/f0cb3f5af8414ca783e2aa3d579cb7fd/Induction%20Manual%203BFP%20000%20080%20R0138%20REV%20H%20PT(BR)%20lowres.pdf)

### **Gerador (Referencias WEG):**

<https://static.weg.net/medias/downloadcenter/h13/hb6/WEG-turbogeradores-st40-12289550-manual-portugues.pdf>

### **Caldeira Aquatubular:**

A fonte dos dados e informações referentes a caldeira são de discussões internamente com engenheiros de aplicações e especificações da ICAVI, fabricante do equipamento.

### **Funcionamento do Conjunto Turbogenerator**

A fonte dos dados e informações referentes ao gerador são de discussões internamente com engenheiros de aplicações da Turbodrives, empresa responsável pela elaboração do diagrama unifilar