



SÍLVIA DE LIMA SALGADO

**UTILIZAÇÃO DE CICLOS COMBINADOS PARA A GERAÇÃO
DE ENERGIA:
IMPACTOS E BENEFÍCIOS AO SISTEMA ELÉTRICO E DE
CONTROLE DA PLANTA**

LAVRAS – MG

2019

SÍLVIA DE LIMA SALGADO

**UTILIZAÇÃO DE CICLOS COMBINADOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA:
IMPACTOS E BENEFÍCIOS AO SISTEMA ELÉTRICO E DE CONTROLE DA PLANTA**

Relatório técnico apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação para a obtenção do título de Bacharel.

Prof. Dsc. Sílvia Costa Ferreira

Orientadora

LAVRAS – MG

2019

SÍLVIA DE LIMA SALGADO

**UTILIZAÇÃO DE CICLOS COMBINADOS PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA:
IMPACTOS E BENEFÍCIOS AO SISTEMA ELÉTRICO E DE CONTROLE DA PLANTA
THE USE OF COMBINED CYCLES FOR POWER GENERATION: IMPACTS AND
BENEFITS TO THE PLANT ELECTRICAL AND CONTROL SYSTEM**

Relatório técnico apresentado à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Graduação em Engenharia de Controle e Automação para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 5 de Novembro de 2019.

Prof. Dsc. Vinicius Miranda Pacheco UFLA
Franck Moraes de Oliveira UFLA

Prof. Dsc. Sílvia Costa Ferreira
Orientadora

**LAVRAS – MG
2019**

Dedico este trabalho à Santíssima Virgem, a Senhora de Lourdes, que tem me carregado em seus braços desde o ventre.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar a Deus e a Nossa Senhora de Lourdes que me concederam a graça de finalizar este curso.

À todos os meus colegas e amigos,
Por todos os momentos que me ajudaram a caminhar.

Aos meus professores,
Por toda a sua dedicação ao longo dos meus anos de formação.

Aos técnicos de laboratório,
Por todas as lutas que enfrentam ao lado de cada aluno.

À minha orientadora Sílvia,
Por toda a sua dedicação em todos esses anos nos quais trabalhamos juntas.

À minha família,
Que permaneceu comigo em cada instante.

*"Deus Pai ajuntou todas as águas e denominou-as mar; reuniu todas as suas graças e chamou-as Maria."
(São Luís Maria Grignon de Montfort)*

RESUMO

Com o aumento da demanda energética mundial, os meios de geração de energia empregados na indústria vem sendo remodelados. Além das pesquisas por novas fontes de geração de energia, alguns estudos buscam aumentar a eficiência e a capacidade produtiva dos ciclos e processos já estabelecidos na geração comercial. Os ciclos combinados de geração utilizam a complementariedade dos ciclos Brayton e Rankine para aumentar a eficiência global do processo de geração. Com a incorporação de equipamentos adicionais, a turbina à vapor e a caldeira de recuperação, pode-se realizar o fechamento do ciclo, aumentando a eficiência total da planta de geração. Este trabalho apresenta um estudo de caso relacionado ao fechamento do ciclo de operação de uma planta instalada na Bolívia. Em adição às cinco turbinas a gás, já em operação, foram instaladas oito turbinas à planta, quatro turbinas à gás e quatro turbinas à vapor. Além de oito caldeiras de recuperação de calor. Com esta expansão a planta passou a gerar 160% MW a mais.

Palavras-chave: Turbina à gás. Turbina à vapor. Caldeira de recuperação. Gerador síncrono. Sistema de controle. Ciclo Brayton. Ciclo Rankine.

ABSTRACT

With the increase in the world's energy demand, the energy generation models used in the industry have been remodeled. In addition to research for new sources of energy generation, some studies seek to increase the efficiency and productive capacity of the cycles and processes already established in commercial generation. Combined cycles use the complementary characteristics of Brayton and Rankine cycles to increase the overall efficiency of the generation process. With the incorporation of additional equipment, the steam turbine and the heat recovery steam generator, the cycle can be closed, increasing the power plant total efficiency. This paper presents a study case based on the closing of a power plant generation cycle of a plant installed in Bolivia. In addition to the five gas turbines, already in operation, eight turbines were installed in the plant, four gas turbines and four steam turbines. In addition to eight heat recovery boilers. With this expansion the plant started to generate 160 % more MW.

Keywords: Gas turbine. Steam turbine. Heat Recovery Steam Generator. Synchronous generator. Control system. Brayton cycle. Rankine cycle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma da Geração, Medição e Distribuição de Energia - Usinas Adjacentes	15
Figura 2.2 – Fluxograma da Geração, Medição e Distribuição de Energia - Usinas Associadas	16
Figura 2.3 – Fluxograma da Geração, Medição e Distribuição de Energia - Usinas Híbridas	17
Figura 2.4 – Fluxograma da Geração, Medição e Distribuição de Energia - Portfólios Comerciais	18
Figura 2.5 – Ciclo de Brayton - Operação em Ciclo Aberto	21
Figura 2.6 – Ciclo de Brayton - Operação em Ciclo Aberto com Regenerador	23
Figura 2.7 – Processos do Ciclo Rankine	25
Figura 2.8 – Esquema Construtivo de uma Caldeira Flamotubular	27
Figura 2.9 – Esquema Construtivo de uma Caldeira Aquatubular	27
Figura 2.10 – Esquema Construtivo de uma Caldeira Elétrica	28
Figura 2.11 – Esquema Construtivo de uma Caldeira de Recuperação Vertical	29
Figura 2.12 – Esquema Construtivo de uma Caldeira de Recuperação Horizontal	30
Figura 2.13 – Esquema Construtivo de uma Caldeira de Recuperação Horizontal	30
Figura 2.14 – Diagrama unifilar simplificado da conexão de um gerador ao barramento interno da planta de geração	32
Figura 2.15 – Modelo 3D de um gerador 2 polos	33
Figura 2.16 – Cubículo do Disjuntor do Gerador - Modelo HIGS	35
Figura 2.17 – Modelo 3D de um gerador Siemens 4 polos	37
Figura 2.18 – Controle de frequência	42
Figura 2.19 – Comunicação entre os diferentes equipamentos de um sistema de controle .	47
Figura 2.20 – Modelo IEEEG1 para o governador da turbina	48
Figura 3.1 – Curva de Capabilidade do Gerador Instalado	53
Figura 3.2 – Gerador instalado	54
Figura 3.3 – Modelo 3D do cubículo do disjuntor do gerador	55
Figura 3.4 – Modelo IEEEG1 simplificado para o governador da turbina	58

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Oferta Interna de Energia Elétrica no Brasil e Mundo (%) - 2018	13
Tabela 2.2 – Parâmetros do modelo IEEE1	48
Tabela 2.3 – Limites dos parâmetros do modelo IEEE1	49
Tabela 3.1 – Condições de operação do vapor	51
Tabela 3.2 – Características do vapor gerado	52
Tabela 3.3 – Dados operacionais do gerador	54
Tabela 3.4 – Parâmetros do modelo do governador	57

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	REFERÊNCIAL TEÓRICO	13
2.1	Apresentação dos Ciclos Combinados e das Usinas Híbridas	13
2.1.1	Usinas Adjacentes	14
2.1.2	Usinas Associadas	15
2.1.3	Usinas Híbridas	16
2.1.4	Portfólios Comerciais	18
2.1.5	Ciclos combinados: turbina a gás e turbinas a vapor	18
2.2	Princípios Termodinâmicos e o Funcionamento das Máquinas Térmicas	20
2.2.1	Primeira Lei da Termodinâmica	20
2.2.2	Segunda Lei da Termodinâmica	20
2.3	Funcionamento da Turbina a Gás	21
2.3.1	Ciclo de Brayton	21
2.3.2	Ciclo Regenerativo	22
2.4	Funcionamento da Turbina a Vapor	24
2.4.1	Ciclo Rankine	24
2.4.2	Induções, Extrações e Tomadas	26
2.5	Caldeira	26
2.5.1	Caldeiras Flamotubulares	26
2.5.2	Caldeiras Aquatubulares	27
2.5.3	Caldeiras Elétricas	28
2.6	Sistema de Recuperação de Vapor	28
2.7	Sistemas auxiliares	31
2.7.1	Sistema Elétrico	31
2.7.1.1	Disjuntores	32
2.7.1.2	Gerador	33
2.7.2	Instrumentação	35
2.7.3	Controle	38
2.7.3.1	Descritivo do Sistema de Controle	38
2.7.3.2	Modos de Controle	40
2.7.3.3	Componentes do Sistema de Controle	43

2.7.3.4	Sala de controle	46
2.8	Modelos Matemáticos	47
3	ESTUDO DE CASO	50
3.1	Características Construtivas	50
3.1.1	Turbinas a vapor	51
3.1.2	Turbina a gás	51
3.1.3	Caldeiras de recuperação	51
3.2	Características elétricas da instalação	52
3.2.1	Gerador elétrico	52
3.2.2	Cubículo do Disjuntor do Gerador	54
3.3	Instrumentação	55
3.4	Sistema de Controle	56
3.5	Modelo Matemático	57
3.6	Operação	58
3.7	Discussões	58
4	CONCLUSÃO	61
	REFERÊNCIAS	62
	APENDICE A – DIAGRAMA UNIFILAR	64

1 INTRODUÇÃO

Os modelos de produção de manufaturas e os modelos de geração de energia vem se desenvolvendo de uma maneira consonante, de modo que a evolução de cada uma das partes impulsiona o desenvolvimento da outra. Estes modelos sofrem as ações da sociedade, que os força a se modificar e adaptar. As adaptações e evoluções dos modelos energéticos podem ser vistas de uma maneira mais clara e explícita nas grandes revoluções industriais.

Antes de adentrar uma discussão sobre temas de sustentabilidade, é necessário observar o modo como a evolução constante da sociedade e de seus meios de produção afetam a geração de energia. Esta força atuante sobre os meios de geração pode ser observada de maneira mais clara durante as revoluções industriais, cada grande revolução da indústria foi acompanhada de mudanças no cenário energético global.

Deste modo, com o advento da globalização e os avanços da indústria 4.0, os modos de geração de energia são outra vez repensados e redefinidos. Além dos investimentos em descobertas de novas fontes para geração de energia, observa-se, no cenário energético atual, uma busca por modos mais eficientes de geração de energia.

Dentre as diversas frentes de pesquisas sendo desenvolvidas estão: o aumento da eficiência dos meios de geração já utilizados; o desenvolvimento de novos combustíveis para os processos de geração, visando uma redução na dependência dos combustíveis fósseis; e a redução de perdas nos processos de transmissão.

A inserção dos processos híbridos na matriz de geração mundial vem acontecendo de maneira gradual. Esta inclusão pode ser observada nos processos de geração tradicionais, como por exemplo a coqueima, ou ainda em novos meios produtivos, como a combinação de usinas hidráulicas e fotovoltaicas. Esta última utiliza a grande área disponível dos espelhos d'água das hidrelétricas para a instalação de placas fotovoltaicas com flutuadores. Atualmente, alguns projetos-pilotos existem nas usinas de Balbina (AM), Porto Primavera (SP) e Sobradinho (BA) (CHESF, 2016).

O processo de geração por meio do ciclo combinado utiliza turbinas a vapor, ciclo Rankine, e turbinas a gás, ciclo de Brayton. Esta geração se relaciona por meio do reaproveitamento do calor presente nos gases de exaustão do ciclo de Brayton (último processo do ciclo) para aquecer a água e gerar vapor para o ciclo Rankine (processo 2-3 do ciclo). Por meio desta simbiose, a eficiência global da planta de geração de energia pode ser elevada.

O objetivo do trabalho é apresentar e discutir os conceitos e benefícios da utilização de ciclos combinados para geração de energia. No estudo de caso discutido é apresentado o fechamento de ciclo de uma planta de geração de energia. Esta termoelétrica, instalada na Bolívia, possuía inicialmente uma potência instalada de 200MW, fornecida por um conjunto de cinco turbinas à gás. Durante o processo de fechamento de ciclo e expansão da planta foram instaladas mais quatro turbinas a gás, quatro turbinas à vapor e oito caldeiras de recuperação de vapor, instaladas em uma configuração 2:2:1, duas turbinas a gás, duas caldeiras de recuperação e uma turbina à vapor. Uma das turbinas à gás instalada na planta continua operando em ciclo aberto, onde os gases de exaustão são devolvidos à atmosfera sem o aproveitamento do seu potencial térmico,

A planta, que possui uma capacidade nominal de 45 MW, aproximadamente, para as turbinas instaladas, passou a gerar em média 520 MW de potência. Além do aumento na quantidade de energia gerada, o fechamento do ciclo permitiu um aumento na eficiência global do sistema. Este trabalho apresenta ainda algumas das características dos sistemas elétrico e de controle instalados e as modificações consideradas para a incorporação das turbinas adicionais à rede elétrica.

2 REFERÊNCIAL TEÓRICO

2.1 Apresentação dos Ciclos Combinados e das Usinas Híbridas

Com o advento da globalização, e com o avanço dos processos produtivos de manufaturas, tem-se tornado cada vez mais recorrentes as discussões sobre os modelos atuais de geração de energia e quais soluções podem ser aplicadas para reduzir os seus impactos no ambiente. Diversas visões vêm sendo debatidas para conscientizar sobre o uso dos recursos naturais não renováveis, como combustíveis fósseis, no processo de geração de energia e sua provável escassez em um futuro próximo. Hodiernamente, uma das soluções mais discutidas para a redução dos impactos causados ao meio ambiente, e para a substituição das fontes de combustíveis fósseis, é o emprego de fontes de energia renováveis e as formas de aumentar a eficiência dos processos de geração tradicionais, para poder desta maneira reduzir o consumo de combustíveis por kW gerado.

A Tabela 2.1 apresenta a composição da matriz energética atual do Brasil em comparação com os valores mundiais. Estes valores ponderam a contribuição que cada uma das formas de geração de energias renováveis e não renováveis possuem no cenário energético brasileiro e mundial. Representando ainda quais são as formas de geração de energia mais utilizadas no Brasil e no mundo.

Tabela 2.1 – Oferta Interna de Energia Elétrica no Brasil e Mundo (%) - 2018

Fonte de energia	Brasil [%]	Mundo [%]
Fontes renováveis		
Hidrelétrica	66,66	16,10
Biomassa	8,50	2,10
Solar	0,54	2,00
Eólica	7,60	5,60
Geotérmica	0,00	0,30
Subtotal renováveis	83,30	26,10
Fontes não renováveis		
Gás Natural	8,60	23,10
Petróleo e Derivados	1,50	3,40
Carvão Mineral	2,20	37,10
Nuclear	2,50	10,00
Outras não renováveis	1,90	0,30
Subtotal não renováveis	16,70	73,90
Total (%)	100	100

Fonte: MME - Resenha Energética Brasileira (2019)

Por meio dos valores apresentados, nota-se que a matriz energética do Brasil possui cerca de 83% de sua oferta vinda de fontes de renováveis. Sendo o principal fator de influência neste cenário o grande peso que as plantas de geração hidroelétricas possuem (aproximadamente 67%).

Ao se comparar o cenário da oferta de energia brasileiro com o cenário mundial, nota-se que são cenários opostos. No Brasil mais de 80% da oferta advém de fontes renováveis, destoando-se do cenário mundial que possui mais de 70% de sua oferta energética proveniente das fontes não renováveis.

Algumas plantas de geração de energia utilizam sistemas de recuperação de calor para realizar o fechamento do ciclo de geração. Esta solução possibilita uma maior eficiência global do ciclo. Por este motivo, é utilizada visando uma redução dos gastos em combustíveis não renováveis por kW gerado. Semelhante ao conceito de simbiose, presente na natureza, a combinação de fontes diferentes de geração de energia leva a uma maior eficiência total observada no sistema combinado. Tal eficiência se deve aos benefícios e à redução de investimentos que são consequência dos ciclos combinados e das usinas híbridas. O Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2018) apresenta quatro definições para categorizar os diferentes modos combinados de geração de energia: usinas adjacentes, usinas associadas, usinas híbridas e portfólios comerciais.

2.1.1 Usinas Adjacentes

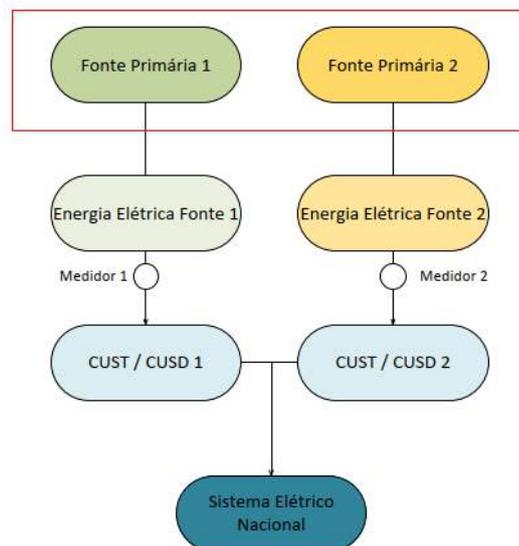
As usinas adjacentes possuem processos distintos e separados de geração de energia, sendo assim, a geração de energia de cada uma das fontes pode ser contabilizada de uma maneira independente da outra usina. Estas usinas devem estar contruídas em locais próximos, uma vez que o tipo de conexão com a rede que as categoriza é dependente desta proximidade.

Por possuir processos de geração de energia separados, as medições são realizadas por equipamentos separados e os contratos com a empresa reguladora também são realizados de maneira distinta, cada planta de geração deve possuir um contrato separado de capacidade de uso da rede. Como do ponto de vista do sistema elétrico estas usinas são distintas, então este tipo de geração não é denominado usina híbrida em si.

Contudo, este tipo de produção permite que as usinas sejam complementares, podendo utilizar o mesmo terreno para alocação da planta e compartilhar instalações.

O fluxograma apresentado na Figura 2.1 visa resumir as principais características deste tipo de geração. As fontes de geração de energia possuem gerações independentes, apesar de possuírem a proximidade física. Cada medição é realizada por um medidor separado, uma vez que os contratos com a concessionária são independentes. Após a medição da energia gerada, para a verificação do contrato, ocorre a conexão com o sistema elétrico nacional. São dois os principais tipos de contratos firmados com a empresa reguladora do sistema elétrico, o Contrato de Uso do Sistema de Transmissão (CUST) e o Contrato de Uso do Sistema de Distribuição (CUSD) (BRASIL, 2018).

Figura 2.1 – Fluxograma da Geração, Medição e Distribuição de Energia - Usinas Adjacentes



Fonte: Do autor (2019)

2.1.2 Usinas Associadas

As usinas associadas operam de um modo semelhante as usinas adjacentes, a sua principal diferença está na utilização de uma mesma infraestrutura de conexão e acesso a rede de distribuição. Deste modo, as usinas associadas utilizam o mesmo contrato junto à rede de distribuição.

As usinas associadas, possuem duas formas de geração de energia claramente distintas entre si, e deste modo não são consideradas usinas híbridas de geração de energia. Esta possibilidade de contratação do sistema de transmissão, utilizando um mesmo contrato com a rede, permite que a capacidade contratada seja menor que a soma das potências nominais destas plantas de geração (BRASIL, 2018). Todavia, este tipo de contratação, apesar de oferecer vantagens

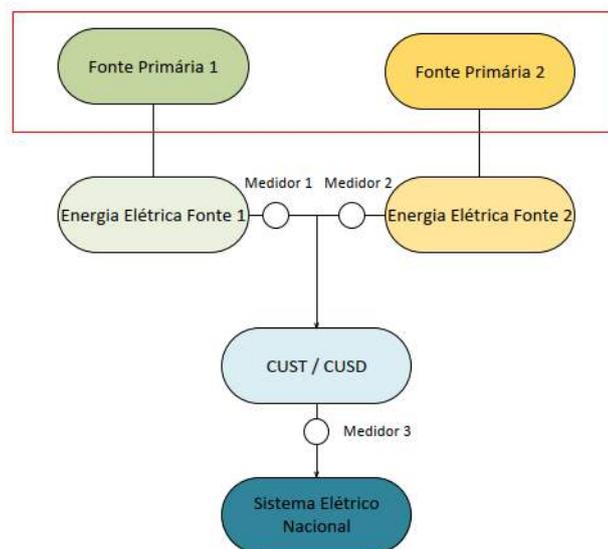
nos momentos de geração de carga inferior a nominal, carrega alguns desafios nos momentos que a carga gerada por ambas fontes for a nominal.

De acordo com Brasil (2018),

"[...] essa combinação traz maior complexidade às discussões pela necessidade de abordar o curtailment (em alguns momentos, a energia produzida não poderá ser escoada devido à limitação da rede, e terá que ser “desperdiçada”), além de demandar ajustes regulatórios e contratuais."

Como representado na Figura 2.2 as fontes primárias de geração de energia são distintas, sendo assim, a medição da energia gerada por cada fonte pode ser realizada de maneira individual, medidores 1 e 2, contudo os contratos, CUSD e CUST, com a empresa reguladora são feitos em conjunto, e então é realizada uma nova medição, medidor 3, para verificação da potência inserida no sistema de transmissão.

Figura 2.2 – Fluxograma da Geração, Medição e Distribuição de Energia - Usinas Associadas



Fonte: Do autor (2019)

2.1.3 Usinas Híbridas

Brasil (2018) define "identificamos como usinas híbridas *strictu sensu* aquelas em que as distintas fontes se combinem ainda no processo de produção de energia elétrica". Deste modo, as usinas assim categorizadas como híbridas são aquelas que, desde a geração de energia, possuem uma complementariedade elevada, tornando-se difícil a distinção de qual fonte primária foi efetivamente responsável pela produção da energia exportada.

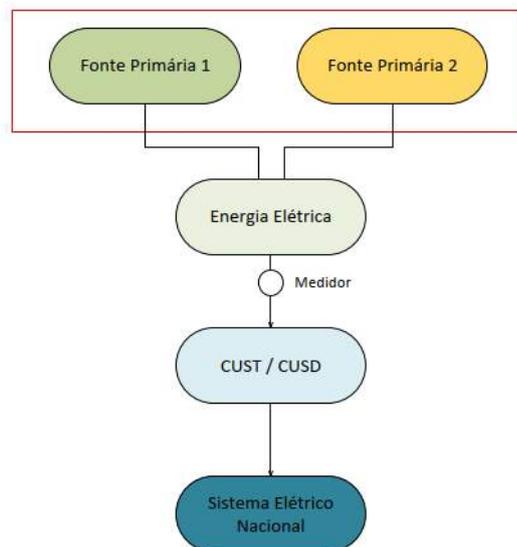
Muito discutidas no cenário energético brasileiro atual, este tipo de geração utiliza da complementariedade de recursos para aumentar a eficiência na geração. Esta simbiose de recursos é utilizada, por exemplo, em usinas hidráulicas e fotovoltaicas ou em usinas onde acontece a coqueima (queima de carvão e biomassa).

As usinas hidrelétricas de geração se caracterizam por possuírem uma grande superfície alagada, e, conseqüentemente, possuírem um grande "espelho d'água". Em plantas de geração hidráulicas + fotovoltaicas são utilizados painéis fotovoltaicos de geração de energia instalados em flutuadores sobre a superfície da água.

Já a coqueima é realizada pela queima conjunta nas caldeiras de carvão e biomassa. Este processo, que acontece nas caldeiras, reduz a quantidade de CO_2 produzida pelo processo, e assim, a quantidade de gases nocivos devolvidos à atmosfera é reduzida.

Um outro exemplo de usinas híbridas são os ciclos combinados que utilizam turbinas à gás e turbinas a vapor. As plantas de ciclo combinado (CCPP - *Combined Cycle Power Plants*) objetivam aproveitar a grande quantidade de energia térmica ainda presente nos gases de exaustão das turbinas a gás para a geração do vapor admitido pela turbina à vapor.

Figura 2.3 – Fluxograma da Geração, Medição e Distribuição de Energia - Usinas Híbridas



Fonte: Do autor (2019)

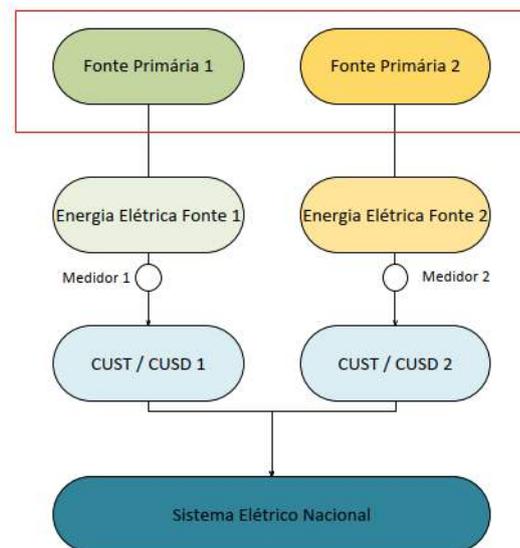
Conforme apresentado na Figura 2.3, as fontes primárias de geração possuem um alto nível de complementariedade, e assim, a energia elétrica gerada é um produto de ambas as fontes. Esta energia é então quantificada por um único medidor. O contrato com a empresa reguladora é único para este tipo de usina, bem como a conexão com a rede.

2.1.4 Portfólios Comerciais

O último tipo de complementariedade entre os sistemas de geração de energia são os portfólios comerciais. Estes, independem das distâncias físicas entre as usinas envolvidas ou do compartilhamento dos recursos utilizados na geração de potência. Apresentam apenas uma razão comercial-contratual, este tipo de combinação, visa reduzir riscos contratuais a um curto prazo, especialmente no caso de contratos por quantidade. Estes portfólios não possuem, contudo, impactos na contratação do uso da rede elétrica nacional para distribuição e transmissão.

Como apresentado na Figura 2.4, estes portfólios são independentes na geração de energia elétrica pelas fontes primárias, nas medições, nas contratações de distribuição e transmissão e na conexão com a rede de transmissão do sistema elétrico nacional.

Figura 2.4 – Fluxograma da Geração, Medição e Distribuição de Energia - Portfólios Comerciais



Fonte: Do autor (2019)

2.1.5 Ciclos combinados: turbina a gás e turbinas a vapor

Conforme descrito acima, o ciclo combinado pode ser categorizado como um modo de geração híbrido. Apesar de ser possível mensurar a quantidade de energia gerada em cada fonte primária, os ciclos possuem um nível de complementariedade elevado, e na maioria das aplicações apenas um ponto de medição é utilizado. As principais características destes ciclos são apresentadas a seguir.

Branco (2005) destaca em seu trabalho o que a maioria das usinas termoeletricas de geração de energia movidas à gás natural são projetadas para operar em um ciclo combinado,

gás e vapor, ainda que estas plantas, em sua maioria, iniciam as operações em ciclos abertos de geração de energia.

Em decorrência de um cenário energético mais estável e de uma redução de incentivos por parte do governo várias destas usinas, inicialmente projetadas para geração em ciclos combinados, permanecem operando em ciclos abertos.

Os chamados ciclos abertos são os ciclos de geração de energia constituídos puramente da turbina a gás, ou seja, uma usina termoelétrica movida a gás natural que não utiliza a caldeira de recuperação e a turbina a vapor para aumentar a produção energética da planta. A eficiência térmica das turbinas em operação isolada é baixa, uma vez que os gases de exaustão, que são devolvidos a atmosfera, possuem elevadas temperaturas (BRANCO, 2005).

Quando comparados aos ciclos abertos, os ciclos combinados, chegam a atingir valores de eficiência térmica até 16% maiores do que os alcançados por ciclos abertos. Enquanto algumas das maiores e mais modernas usinas a carvão, ou óleo, operando em ciclo aberto alcançam valores entre 40 e 44% de eficiência, os ciclos combinados chegam a alcançar até 56% de eficiência em seu processo de geração (BRANCO, 2005).

O modo como o ciclo é projetado e a razão entre as turbinas determina a disponibilidade de planta. Deste modo, podem ser utilizadas múltiplas turbinas a gás ou, uma solução menos comum, apenas uma turbina a gás. Esta última configuração, com uma turbina a vapor e uma a gás, possui uma disponibilidade de geração menor, visto que, caso a turbina a gás pare, a turbina a vapor será forçada a parar, já que o fornecimento de vapor é dependente dos gases da exaustão da turbina a gás.

A relação 2:1, duas turbinas a gás e uma a vapor, é comumente utilizada. Se uma das turbinas a gás estiver fora de operação o fornecimento de vapor será mantido, mesmo que reduzido, pela segunda turbina a gás. No caso de parada da turbina a vapor as turbinas a gás podem continuar em operação em um ciclo aberto de operação.

Esta configuração redundante quando utilizada com turbinas de mesma capacidade de geração permite a utilização de geradores de mesmo porte. Assim pode existir uma padronização dos equipamentos elétricos utilizados na planta, como por exemplo disjuntores e transformadores. Ainda que este seja um ponto favorável à solução que utiliza três máquinas de geração com a mesma potência, a configuração 2:1 com a potência da turbina a vapor inferior a potência das turbinas a gás é utilizada com certa frequência nos projetos de fechamento de ciclo.

2.2 Princípios Termodinâmicos e o Funcionamento das Máquinas Térmicas

A termodinâmica, amplamente percebida como a ciência da energia (ÇENGEL; TURNER; CIMBALA, 2008) e descrita pelo dicionário Michaelis (2019) como sendo a parte da física que estuda as relações entre as formas de energia e os processos de transformação, é o fundamento primeiro das máquinas térmicas. As turbinas à gás e turbinas à vapor são exemplos de máquinas térmicas que cujo funcionamento é regido pelos princípios da termodinâmica.

2.2.1 Primeira Lei da Termodinâmica

A primeira Lei da Termodinâmica descreve a conservação da energia de um sistema, a energia não pode ser criada nem destruída, é apenas transformada. Esta transferência da energia entre dois sistemas pode se dar por meio de trocas térmicas, trabalho ou fluxo de massa entre eles (ÇENGEL; TURNER; CIMBALA, 2008).

A primeira Lei da Termodinâmica pode ser descrita pela Equação 2.1 (LIBRETEXTS, 2019a):

$$\Delta U = Q + W \quad (2.1)$$

onde ΔU é a variação total da energia interna do sistema, Q é o calor trocado entre o sistema e o ambiente e W o trabalho realizado pelo sistema ou no sistema.

Considerando que a variação total da energia interna do sistema é a diferença entre a energia final e a inicial, e que o sistema realiza trabalho obtém-se a Equação 2.2.

$$E_2 - E_1 = Q - W \quad (2.2)$$

onde E_1 é a energia total inicial do sistema, E_2 a energia total final do sistema, Q é o calor trocado e W o trabalho realizado pelo sistema.

2.2.2 Segunda Lei da Termodinâmica

A segunda Lei da Termodinâmica descreve que todos os processos de trocas térmicas possuem uma determinada quantidade de energia não utilizável, chamada entropia, definida como a grandeza que representa a indisponibilidade da energia de um sistema para realizar trabalho. Sendo assim, a variação da entropia total de um sistema durante determinado período

de tempo determina sua irreversibilidade. Deste modo, os processos de trocas térmicas que possuem uma quantidade de entropia final maior que a inicial são chamados processos irreversíveis, uma vez que a quantidade de energia do sistema que não realiza trabalho aumenta (LIBRETEXTS, 2019b).

As Equações 2.3 e 2.4 abaixo relacionam os níveis de entropia (S), inicial e final de um sistema para o processo reversível e o processo irreversível, respectivamente.

$$S_{final} = S_{inicial} \quad (2.3)$$

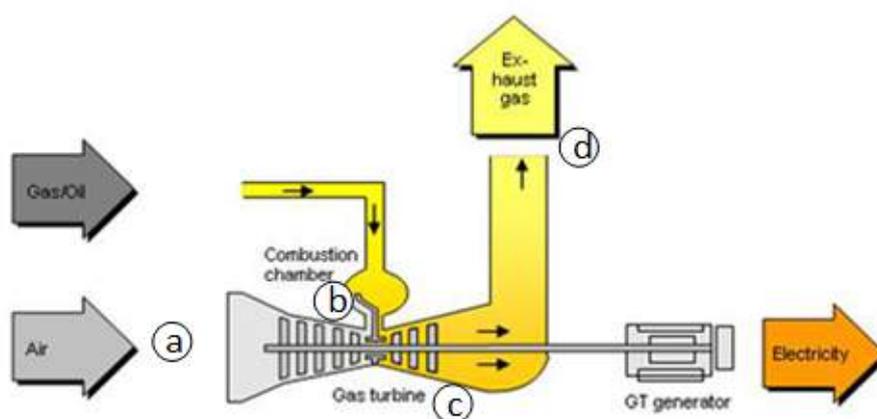
$$S_{final} > S_{inicial} \quad (2.4)$$

2.3 Funcionamento da Turbina a Gás

2.3.1 Ciclo de Brayton

O ciclo de Brayton (Figura 2.5) descreve o funcionamento das turbinas a gás. Este ciclo pode ser segmentado em quatro processos distintos entre si, estes processos acontecem de maneira complementar e sequencial.

Figura 2.5 – Ciclo de Brayton - Operação em Ciclo Aberto



Fonte: Adaptado de Watts (2012)

As quatro etapas deste ciclo são descritas a seguir:

- a) Processo 1-2: na primeira etapa o ar, inicialmente em condição ambiente de temperatura e pressão, é inserido em um compressor, onde ocorre o processo de compressão adiabática e isentrópica do ar. Durante este processo a temperatura do ar aumenta, e, por conseguinte, sua entalpia;

- b) Processo 2-3: o ar comprimido é direcionado à câmara de combustão, onde é realizada a mistura do ar com o combustível (e.g. gás natural) e sua queima. Os gases, resultantes desta queima saem da câmara de combustão com elevadas pressão e temperatura;
- c) Processo 3-4: os gases oriundos do processo anterior são inseridos na turbina a gás. Dentro da turbina a gás os gases se expandem, gerando o movimento rotacional do rotor da turbina. Movimento este responsável pelo acionamento do gerador e, conseqüentemente, da geração de potência. A potência gerada pelo movimento da turbina é utilizada para acionar o compressor utilizado no processo 1-2 supracitado;
- d) Processo 4-1: o último processo do ciclo de Brayton é descrito pela exaustão dos gases e sua troca térmica com o meio. Em um ciclo aberto, o meio no qual os gases de exaustão realizam esta troca térmica é a própria atmosfera, e em um ciclo fechado de geração a troca acontece dentro das caldeiras de recuperação, onde os gases a uma elevada temperatura são utilizados para a produção do vapor, utilizado na admissão das máquinas à vapor;

A eficiência termodinâmica, η_{term} , deste ciclo é descrita pela Equação 2.5.

$$\eta_{term} = 1 - \frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{Q}_{out}} \quad (2.5)$$

onde Q_{in} e Q_{out} são a quantidade de calor que entra no sistema e a quantidade de calor que sai do sistema, respectivamente.

Considerando as relações isentrópicas, onde a entropia do sistema é constante durante todo o processo, a equação 2.5 pode ser simplificada:

$$\eta_{term} = 1 - \frac{T_1}{T_2} = 1 - \left(\frac{P_1}{P_2} \right)^{(k-1)/k} \quad (2.6)$$

onde k igual a relação entre o calor específico a pressão constante e o calor específico a volume constante; T1 e T2 as temperaturas em cada processo do ciclo, processo 1-2 e 2-3, respectivamente; P1 e P2 as pressões dos processos 1-2 e 2-3, respectivamente.

2.3.2 Ciclo Regenerativo

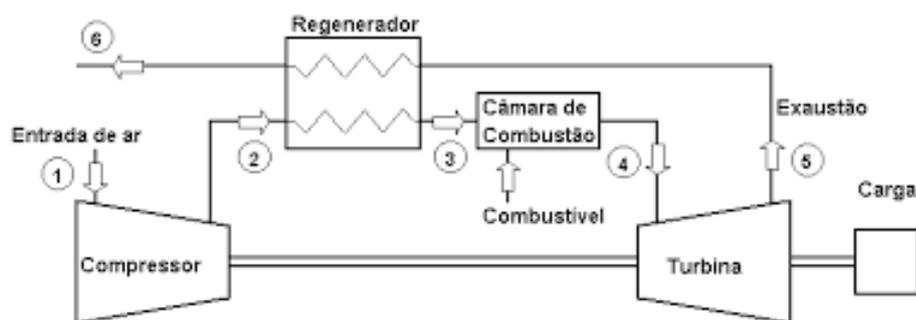
Dentro do processo de geração de energia de uma turbina a gás podem ser adicionados os chamados regeneradores. Estes equipamentos são utilizados para aquecer o ar que sai do

compressor antes que ele entre na câmara de compressão. Dentro do regenerador acontece a troca térmica entre os gases de exaustão da turbina a vapor e o ar.

Contudo, o uso de um regenerador no ciclo de geração possui algumas desvantagens. A primeira é o elevado custo de implementação no sistema, o que requer um estudo detalhado do aumento de eficiência que este equipamento pode trazer ao sistema. A segunda desvantagem desta aplicação é a redução da eficiência nos ciclos fechados, uma vez que o regenerador funciona como um trocador de calor, que realiza a troca térmica entre o ar comprimido e os gases de exaustão, e, deste modo, a redução da temperatura final dos gases de exaustão implica numa menor eficiência das caldeiras de recuperação.

A Figura 2.6 mostra os processos que compõe o ciclo regenerativo.

Figura 2.6 – Ciclo de Brayton - Operação em Ciclo Aberto com Regenerador



Fonte: Ramos (2007)

Conforme identificados na Figura 2.6, existem seis processos que compõe um ciclo regenerativo:

1. Entrada do ar no compressor;
2. O ar que sai do compressor circula pelo regenerador que, por meio de trocas térmicas, eleva a temperatura do ar;
3. Acontece a mistura do ar que sai do regenerador e do combustível na câmara de combustão;
4. Os gases saem da câmara de combustão e são inseridos na turbina;
5. Os gases que saem da turbina são inseridos no regenerador e usados para aquecer o ar;
6. Os gases de exaustão são liberados ao meio.

2.4 Funcionamento da Turbina a Vapor

2.4.1 Ciclo Rankine

O Ciclo Rankine é processo termodinâmico que pode ser dividido em quatro etapas distintas que convertem o calor em trabalho. O calor, oriundo de uma fonte externa do ciclo, aquece um fluido de trabalho que fica contido dentro do circuito do ciclo.

Os 4 processos deste ciclo são:

- a) Processo 1-2: Este processo consiste no bombeamento do fluido de trabalho, que sai de uma condição de baixa pressão para uma de alta pressão e podem ser descritos por:

$$\frac{\dot{W}_{bomba}}{\dot{m}} = h_2 - h_1 \quad (2.7)$$

onde \dot{W}_{bomba} é a potência mecânica da bomba, \dot{m} é a vazão mássica, e h_1 e h_2 são as entalpias nos pontos 1 e 2, respectivamente;

- b) Processo 2-3: Durante este processo o fluido de trabalho é aquecido. Um combustível é queimado dentro da caldeira para poder aquecer o fluido de trabalho do processo. Alguns dos combustíveis mais utilizados são carvão, gás natural, óleo e fissão nuclear.

Em turbinas a vapor o condensado é aquecido na caldeira até se tornar vapor seco de forma que, o fluxo de calor que entra no sistema seja dado por:

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_3 - h_2 \quad (2.8)$$

onde \dot{Q}_{in} é o fluxo de calor que entra no sistema, \dot{m} é a vazão mássica, e h_2 e h_3 são as entalpias nos pontos 2 e 3, respectivamente;

- c) Processo 3-4: O fluido de trabalho é expandido em uma turbina de geração de energia. Esta expansão faz com que as condições de P&T (pressão e temperatura) do fluido diminuam. Durante esta etapa, a potência mecânica ($\dot{W}_{turbina}$) gerada pela turbina pode ser descrita como:

$$\frac{\dot{W}_{turbina}}{\dot{m}} = h_3 - h_4 = (h_3 - h_4) \times \eta_{turbina} \quad (2.9)$$

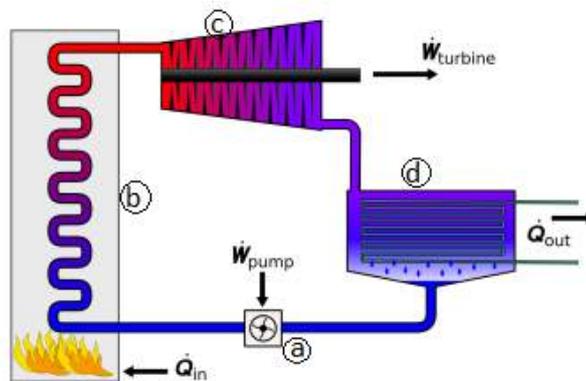
onde \dot{m} é a vazão mássica, $\eta_{turbina}$ a eficiência da turbina e h_3 e h_4 são as entalpias nos pontos 3 e 4, respectivamente;

- d) Processo 4-1: O fluido que sai pelo escape da turbina é então inserido em um condensador que irá reduzir a temperatura deste fluido à uma pressão constante.

$$\frac{\dot{Q}_{in}}{\dot{m}} = h_4 - h_1 \quad (2.10)$$

onde \dot{Q}_{in} é o fluxo de calor que entra no sistema, \dot{m} é a vazão mássica, e h_1 e h_4 são as entalpias nos pontos 1 e 4, respectivamente.

Figura 2.7 – Processos do Ciclo Rankine



Fonte: Adaptado de Siemens (2008)

Os quatro processos descritos acima descrevem o modo de funcionamento de uma turbina a vapor para geração de energia. Cada processo, conforme enumerado acima, pode ser identificado na Figura 2.7 como a passagem entre dois pontos demarcados do esquema. A eficiência termodinâmica deste ciclo pode ser definida pela Equação 2.11.

$$\eta_{term} = \frac{\dot{W}_{turbina} - \dot{W}_{bomba}}{\dot{Q}_{in}} \quad (2.11)$$

Por não ser um processo ideal, o Ciclo de Rankine, possui perdas que reduzem sua eficiência. Para poder elevar a eficiência do sistema são utilizadas algumas soluções, tais como o ciclo regenerativo ou o ciclo combinado.

O ciclo regenerativo utiliza vapor, extraído da turbina, para aquecer o condensado antes que ele entre na caldeira. Por retirar o vapor de dentro da turbina, este ciclo acaba reduzindo a potência gerada pela máquina, contudo, ao pré-aquecer o vapor o ciclo regenerativo possibilita um menor consumo de combustíveis na caldeira.

O ciclo combinado, descrito em detalhes na sessão 2.5, é utilizado para aumentar o aproveitamento dos recursos de geração presentes na planta, e assim, aumentar a eficiência final da planta de geração.

2.4.2 Induções, Extrações e Tomadas

O ciclo regenerativo utiliza o vapor retirado de dentro da máquina para poder pré-aquecer o condensado. O processo de retirada de vapor da máquina acontece de duas maneiras distintas, a primeira é a tomada. As tomadas são retiradas de vapor não controladas que funcionam como um orifício na carcaça da turbina e permitem a passagem do vapor.

Outro modelo de retirada de vapor são as extrações controladas. Este tipo de extração utiliza servomotores para controlar a pressão dentro das câmaras de extração da turbina e, assim, controlar as principais características do vapor que é retirado da máquina. Estas extrações controladas são comumente utilizadas em plantas onde o processo produtivo requer o uso de um vapor de qualidade e com pressão e temperatura controladas.

As induções, de uma maneira oposta às extrações e tomadas, possui a função de inserir vapor na máquina em estágios avançados. Esta indução de vapor pula os primeiros estágios da máquina.

O uso de induções, tomadas ou extrações em uma máquina fazem com que o sistema de controle, descrito adiante, seja mais complexo e, assim, altere o próprio modelo matemático que descreve o funcionamento mecânico da máquina.

2.5 Caldeira

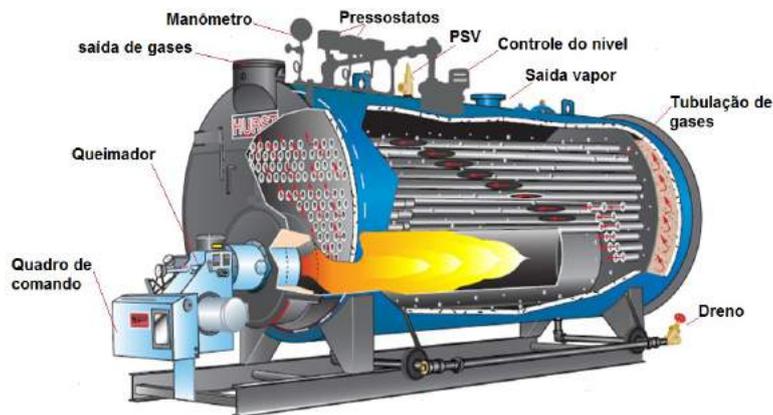
As caldeiras são utilizadas nos processos de geração de energia para fornecer o vapor de admissão para as turbinas a vapor. Atualmente existem múltiplos tipos de caldeiras, variando os métodos construtivos e a fonte de energia que aquece a água. Dentre eles destacam-se as caldeiras flamotubulares, as caldeiras aquatubulares e as caldeiras elétricas.

2.5.1 Caldeiras Flamotubulares

O modo construtivo destas caldeiras conduz os gases do processo de combustão pelo interior das tubulações. O fluido a ser aquecido, neste caso a água, será conduzido pelo interior da caldeira de maneira externa à tubulação. O contato com a tubulação faz o aquecimento do fluido por meio de trocas térmicas.

Na Figura 2.8 pode-se observar o esquema construtivo destes equipamentos. Cabe ainda, neste mesmo contexto, notar a presença dos instrumentos relacionados às medições de pressão da caldeira, como o manômetro e os pressostatos alocados na parte superior da caldeira.

Figura 2.8 – Esquema Construtivo de uma Caldeira Flamotubular

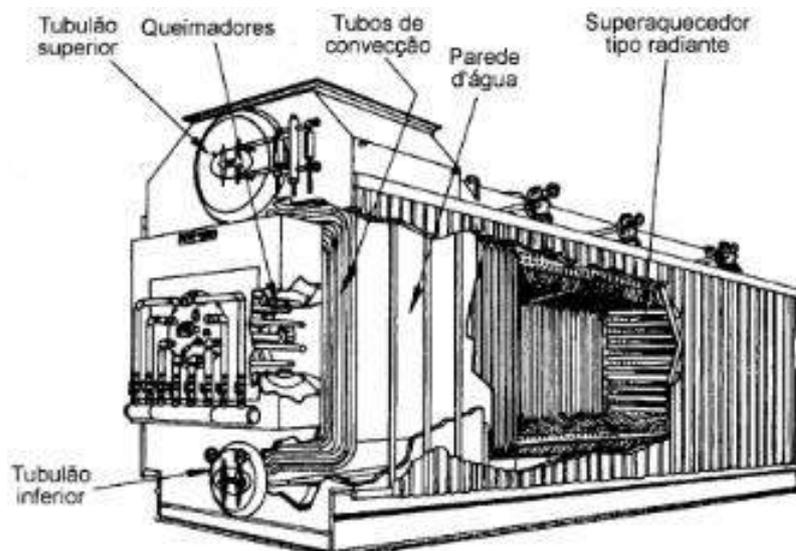


Fonte: Engenharia (2018)

2.5.2 Caldeiras Aquatubulares

As caldeiras aquatubulares possuem um conceito construtivo antagônico ao apresentado das caldeiras flamotubulares. Apesar de serem modos construtivos não tão dispares, o conceito de funcionamento apresentado por estas caldeiras é oposto. A Figura 2.9 apresenta o o esquema construtivo de uma caldeira aquatubular e alguns de seus principais componentes.

Figura 2.9 – Esquema Construtivo de uma Caldeira Aquatubular



Fonte: Ferreira (2008)

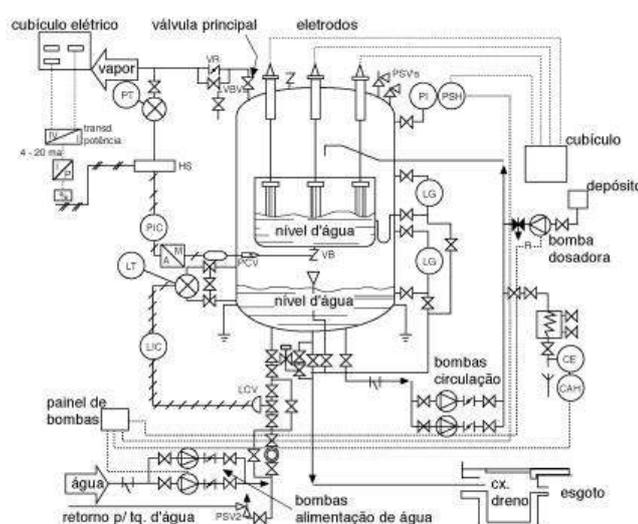
As caldeiras aquatubulares utilizam as tubulações para a passagem do fluido a ser aquecido. Deste modo, as caldeiras aquatubulares conduzem os gases queimados pelo exterior das tubulações de água, onde o fluido será aquecido por meio das trocas térmicas do contato com as tubulações.

2.5.3 Caldeiras Elétricas

Nas caldeiras elétricas o fluido é aquecido por troca de calor, direta ou indireta, com uma resistência por onde flui corrente elétrica. Por não necessitar de um local para armazenagem de combustíveis, este tipo de caldeira é utilizado com maior frequência quando há limitações do fornecimento de combustíveis, ou limitações na área disponível para a instalação.

A Figura 2.10 mostra o diagrama de instrumentação e processo de uma caldeira elétrica.

Figura 2.10 – Esquema Construtivo de uma Caldeira Elétrica



Fonte: Ensaio (2017)

Por serem alimentadas por uma fonte externa de energia, as caldeiras elétricas, possuem uma alta demanda energética, o que reduz a relação custo-benefício de sua implementação (ECAL, 2017).

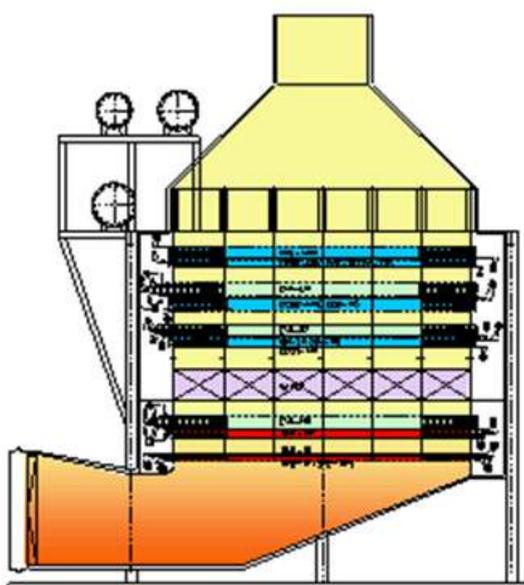
2.6 Sistema de Recuperação de Vapor

Para que o Ciclo Combinado possa acontecer é necessário que exista um elo entre os dois sistemas de geração de energia. Esta ligação entre os processos de geração de uma turbina a gás e uma turbina a vapor é realizado por uma caldeira de recuperação. A caldeira de recuperação

(HRSG - *Heat Recovery Steam Generator*) utiliza o calor proveniente dos gases que saem do processo da Turbina a gás para vaporizar o condensado que sai do ciclo da turbina a vapor.

Neste mesmo diapasão deve-se notar ainda que existem dois principais tipos de caldeiras de recuperação horizontal e vertical. A principal diferença entre estes dois tipos de caldeira é o sentido de circulação do gás. Em caldeiras verticais (Figura 2.11) o gás, proveniente do escape (exaustão) da turbina a gás, é conduzido verticalmente pela caldeira trocando calor com tubos horizontais por onde circula o condensado que será vaporizado e inserido na turbina a vapor.

Figura 2.11 – Esquema Construtivo de uma Caldeira de Recuperação Vertical



Fonte: MHPS (2019)

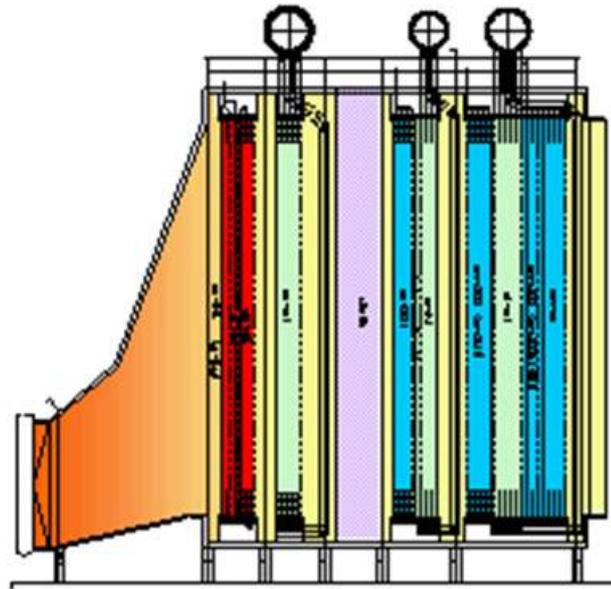
Por conduzir o gás de maneira vertical as Caldeiras de Recuperação Verticais utilizam uma área menor para instalação e assim são frequentemente utilizadas em plantas de geração de energia onde o espaço para instalação para o HRSG é reduzido. No entanto, não possuem limitadores verticais que possam limitar a altura deste equipamento.

O modo construtivo de uma caldeira de recuperação horizontal (FIGURA 2.12) permite a movimentação horizontal do gás, já os tubos de condensado estão, neste modelo construtivo, alocados de forma verticalizada.

Algumas empresas, como a CBC Indústrias Pesadas do grupo Mitsubishi Hitachi Power Systems, trabalham com HRSG Horizontais modulares reduzindo e otimizando o tempo gasto na planta durante o período de montagem e comissionamento da máquina (CBC, 2019).

Para controlar os gases que são liberados durante este processo para a atmosfera são utilizados catalizadores de redução (SCR - *Selective Catalyst Reduction*) dentro das caldeiras

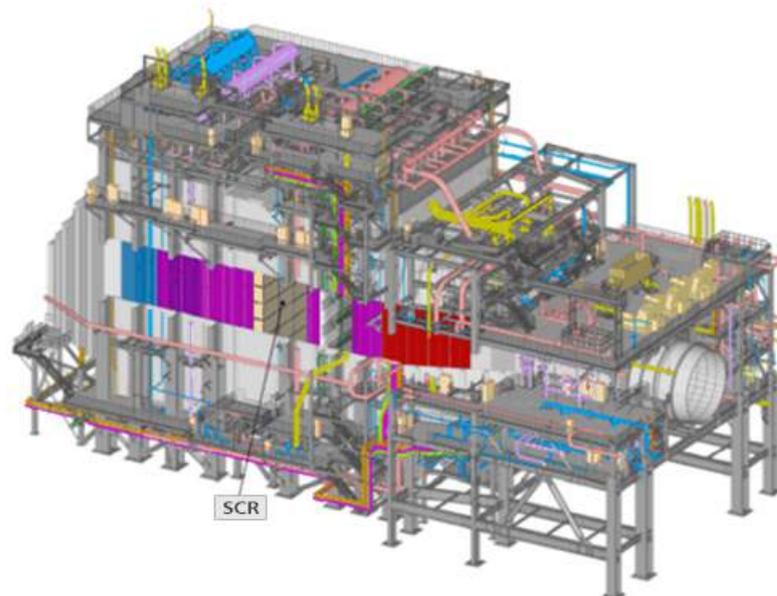
Figura 2.12 – Esquema Construtivo de uma Caldeira de Recuperação Horizontal



Fonte: MHPS (2019)

de recuperação. Este equipamento objetiva reduzir o teor de óxidos de nitrogênio nos gases de exaustão que são devolvidos a atmosfera. No modelo apresentado na Figura 2.13 é apresentado o local de instalação do SCR em uma Caldeira de Recuperação Horizontal.

Figura 2.13 – Esquema Construtivo de uma Caldeira de Recuperação Horizontal



Fonte: MHPS (2019)

2.7 Sistemas auxiliares

As plantas de geração de energia possuem, além dos equipamentos mecânicos, uma grande parte de equipamentos elétricos, de equipamentos de controle e instrumentos. Apesar de existirem no Brasil turbinas, ainda em operação, que são puramente mecânicas, a demanda por sistemas de controle mais complexos e mais abrangentes é crescente neste mercado.

Os sistemas de controle considerados para cada planta, ainda que não possuam uma relação direta com o mercado de aplicação, acabam sendo afetados por este. Assim, todo o escopo de sistemas, aqui denominados auxiliares, presente em uma planta do mercado papeleiro possui uma abordagem mais complexa, com uma quantidade maior de equipamentos redundantes, que um mercado sulcroalcooleiro, por exemplo.

Para uma maior clareza sobre os tópicos definidos a seguir, os sistemas auxiliares foram segmentados em três categorias Instrumentação, Elétrica e Controle.

2.7.1 Sistema Elétrico

O sistema elétrico da planta de geração é utilizado para converter a potência mecânica gerada pelas turbinas em potência elétrica. Esta conversão é realizada por meio de um gerador elétrico.

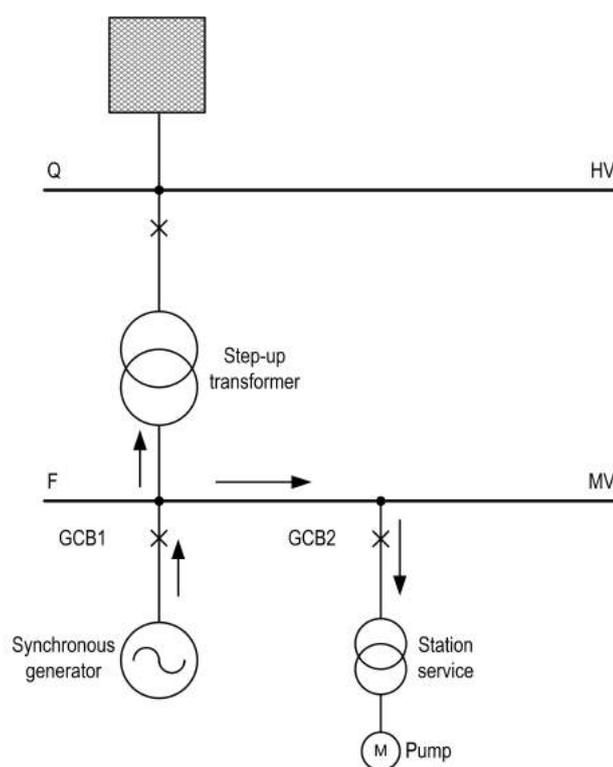
O gerador elétrico utilizado na planta deve ser conectado à rede elétrica por meio de disjuntores cuja função principal é realizar a proteção dos equipamentos conectados ao sistema elétrico da planta em caso de curto-circuito ou algum outro distúrbio presente na rede. Estes disjuntores devem ser controlados por um sistema de sincronismo. O sistema de sincronismo, descrito em maiores detalhes na sessão 2.8.3.3 item 3, compara as principais características da tensão de saída dos terminais do gerador com a tensão do sistema elétrico ao qual o gerador está ligado.

Dentro do sistema elétrico da planta estão ainda os cubículos do gerador e o transformador elevador. Os cubículos são responsáveis pelas proteções e medições relacionadas ao gerador, já o transformador elevador eleva a tensão de saída dos terminais do gerador para se adequar aos níveis de tensão presentes no barramento ao qual o gerador está conectado.

A Figura 2.14 mostra o diagrama unifilar simplificado da conexão do gerador no barramento interno de uma planta de geração. Neste unifilar pode-se observar o transformador elevador (*Step-up transformer*), o disjuntor do gerador (*GCBI*), o gerador síncrono (*synchro-*

nous generator), o barramento interno de média tensão da planta (F), o disjuntor das cargas da planta (GCB2) e o barramento de alta tensão para conexão com o sistema elétrico (Q).

Figura 2.14 – Diagrama unifilar simplificado da conexão de um gerador ao barramento interno da planta de geração



Fonte: Siemens AG (2015)

2.7.1.1 Disjuntores

Existem dois principais disjuntores no sistema considerado, o disjuntor do gerador e o disjuntor da subestação.

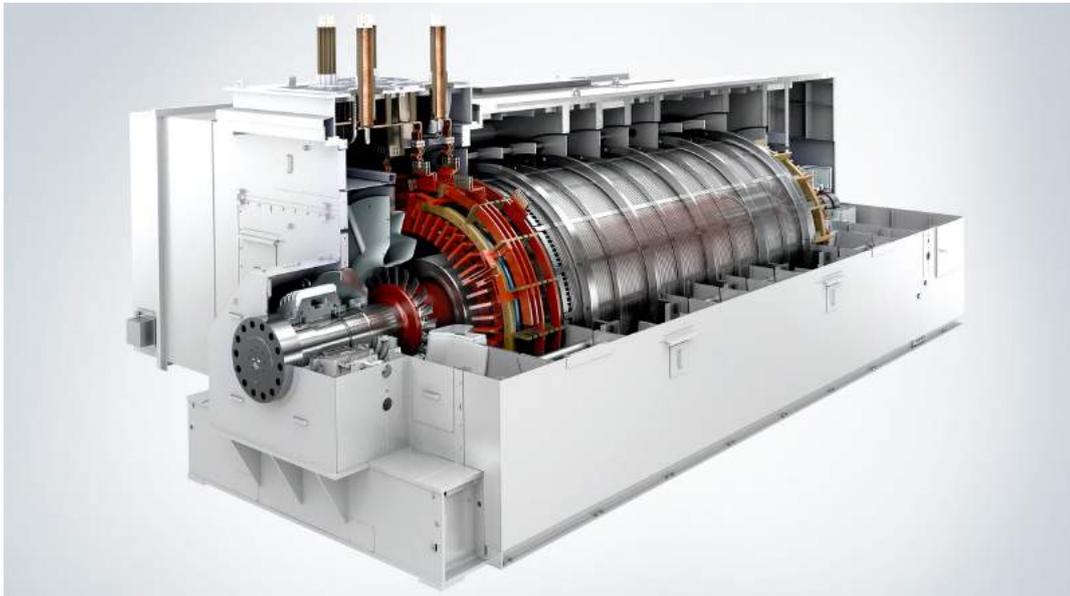
- a) Disjuntor do Gerador: o disjuntor do gerador é utilizado para a conexão entre o gerador e o barramento interno da planta. Em plantas com mais de um gerador é comum que existam múltiplos barramentos com disjuntores realizando as conexões entre eles.
- b) Disjuntor da Subestação: os disjuntores utilizados nas subestações das plantas de geração são utilizados para a conexão da planta com o sistema de transmissão e distribuição de energia elétrica. Estes se caracterizam por serem maiores e mais robustos que os disjuntores dos geradores.

Estes disjuntores trabalham de maneira semelhante, ambos são projetados para evitar que um curto circuito existente em quaisquer pontos da rede possa ser alimentado por outras cargas. Para que estes disjuntores possam ser fechados é necessário, primeiramente, verificar se existem condições adequadas entre os dois pontos da conexão para realizar a ligação. A verificação é realizada pelo sistema de sincronismo.

2.7.1.2 Gerador

Os geradores (Figura 2.15) são utilizados nas plantas de geração de energia para converter a energia mecânica, proveniente do movimento do rotor das turbinas, em energia elétrica.

Figura 2.15 – Modelo 3D de um gerador 2 polos



Fonte: Siemens Erfurt (2019)

O rotor da turbina é, então, acoplado, direta ou indiretamente, ao eixo do gerador. Um gerador diretamente acionado pela turbina possui uma rotação nominal igual a rotação da turbina em seu ponto de operação. Já um gerador acoplado à turbina por meio de um redutor não possui esta mesma limitação. Deste modo, como a rotação do gerador é determinada por sua frequência e pelo número de polos (EQUAÇÃO 2.12), o tipo de acoplamento entre as máquinas será determinado pela velocidade de rotação nominal da turbina.

$$N = \frac{120 \cdot f}{P} \quad (2.12)$$

Fonte: Fitzgerald, Kingsley e Umans (2006)

onde N é a rotação nominal da máquina, f a frequência de operação e P o número de polos da máquina.

Nas máquinas a vapor, a rotação de uma turbina, determinada pelos cálculos termodinâmicos, varia com o tamanho da máquina. Máquinas de grande porte, com potências maiores, possuem valores de rotação mais baixos, já as turbinas de pequeno porte podem atingir valores de duas a três vezes maiores.

Além destas limitações construtivas das máquinas, os próprios geradores utilizados para a geração de energia possuem limitações de rotação para elevadas faixas de potência. No Brasil, os dois principais fornecedores de gerador, WEG e GE, apesar de ofertarem em seu portfólio máquinas de 4 polos de até 100MW de potência, não possuem um histórico de referência de equipamentos tão grandes com esta configuração.

Neste mesmo diapasão, cabe ainda ressaltar os impactos que o redutor causa no conjunto. Em primeiro plano, deve-se notar que a inserção de um novo equipamento no trem de geração aumenta a quantidade de perdas do sistema. Adiciona-se ainda a este cenário, o grande número de falhas que este equipamento puramente mecânico pode sofrer, como por exemplo a perda de engrenagens devido ao esforço mecânico sofrido pelo mesmo.

À vista deste cenário, quando possível, a solução de acoplamento direto é utilizada. Em máquinas de grande porte, onde a rotação nominal da turbina se aproxima de 4000 rpm, é possível, durante a fase dos cálculos termodinâmicos, modificar a rotação das máquinas e assim utilizar geradores de 2 polos.

Associados ao gerador estão alguns painéis de proteção e controle. Além dos Painéis de Excitação, de Sincronismo, e de Proteção e Controle, descritos na próxima seção, os seguintes painéis são utilizados para proteções e medições associadas ao gerador:

- a) Cubículos do Gerador: Os Cubículos do Gerador são os painéis elétricos que comportam os equipamentos de medição e proteção do gerador, como o próprio disjuntor do gerador supracitado.

Estes cubículos são divididos de acordo com o fabricante de cada gerador. Contudo, de forma geral, podem ser divididos em três principais partes: o cubículo do disjuntor do gerador que comporta o disjuntor e seus equipamentos auxiliares, e comporta ainda os transformadores de corrente que realizam medições de corrente utilizadas no sistema de proteção do gerador; o cubículo de linha, onde são alocados os capacitores e para-raios utilizados para proteção da máquina, e os transformadores de potencial e de corrente para

a medição das tensões e correntes utilizadas nos sistemas de excitação, sincronismo e proteção da máquina; e o cubículo de neutro, que pode ser combinado ao cubículo de linha, onde estão alocados transformadores de corrente para os sistemas de excitação e proteção, e onde está alocado o transformador ou resistor de aterramento.

A Figura 2.16 mostra um dos modelos utilizados de Cubículo do Disjuntor do Gerador. Além do disjuntor em si, o cubículo possui sistemas de proteção e medição.

Figura 2.16 – Cubículo do Disjuntor do Gerador - Modelo HIGS



Fonte: Siemens HIGS (2018)

- b) Transformador Elevador: O transformador elevador é instalado entre o cubículo de linha do gerador e o cubículo do disjuntor. Este equipamento eleva os níveis de tensão da saída do gerador até o valor de tensão nominal do barramento ao qual o gerador está conectado, possibilitando assim a interligação com o barramento.

Os transformadores de corrente e potencial utilizados para a medição da geração bruta (sem as perdas do trafo elevador e do disjuntor) devem ser instalados entre o cubículo de linha e o trafo elevador.

2.7.2 Instrumentação

A instrumentação utilizada nas plantas de geração possui duas principais funções: proteção e controle. Esta divisão é utilizada para definir a quantidade de instrumentos necessária. Os instrumentos utilizados para proteção podem acionar a parada geral da máquina e precisam ser instalados em uma configuração 1 de 2. Isso quer dizer que, dois instrumentos são instalados,

mas os alarmes e a parada da máquina só precisam de um sinal, proveniente de um desses instrumentos, para ser acionados. Em casos onde existe a necessidade de um grau de proteção maior, como por exemplo em sistemas mais críticos, a filosofia de redundância utilizada é conhecida por 2 de 3. Nesta configuração, três instrumentos ou equipamentos são instalados, contudo os alarmes e a parada geral só são acionados quando o sinal é enviado por dois instrumentos.

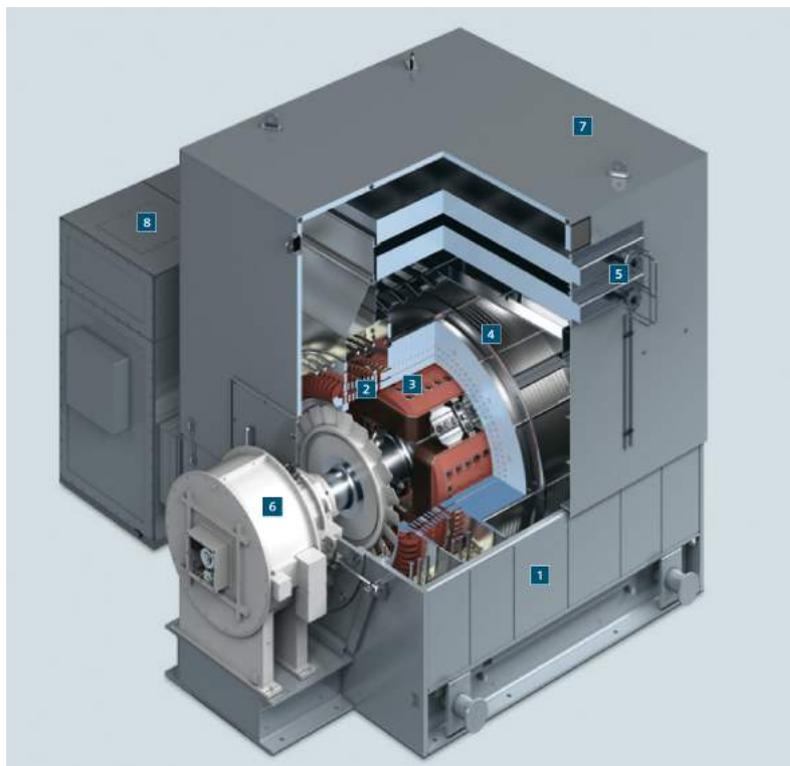
Um gerador, possui diversos instrumentos para monitoramento e proteção. Na Figura 2.17 são apontados 8 elementos construtivos do gerador, são estes:

1. Carcaça Soldada
2. Isolamento do Enrolamento do Estador
3. Rotor de Polos Salientes
4. Estator
5. Trocador de Calor
6. Sistema de Excitação Brushless
7. Carcaça do Gerador
8. Cubículos

Os principais instrumentos utilizados em um gerador estão associados a alguns destes elementos construtivos. Nos enrolamentos do estator (que podem ser identificados nos itens 2 e 4) são alocados sensores de temperatura, estes sensores de temperatura são instalados durante o processo de fabricação do gerador, e após a finalização do processo de manufatura destes instrumentos eles não podem ser removidos ou substituídos.

Ademais, no trocador de calor do gerador, que está indicado pelo item 5 na Figura 2.17, são utilizados sensores de nível. Como o ar quente, por ser menos denso, tende a subir, e o ar frio, por ser mais denso, desce, então os trocadores de calor do tipo ar-água são instalados acima do gerador e assim se aproveitam desta convecção natural do ar para uma maior troca térmica, e por conseguinte, uma maior eficiência no trocador de calor. Contudo, por serem trocadores à água, são utilizados bandeijamentos abaixo do trocador para evitar que quaisquer vazamento de água possa entrar em contato direto com os enrolamentos do gerador. Os sensores de nível são então instalados para a verificação e monitoração do nível de água das bandeijas.

Figura 2.17 – Modelo 3D de um gerador Siemens 4 polos



Fonte: Siemens Erfurt (2019)

Os mancais do gerador, do redutor e da turbina possuem um sistema de óleo, este sistema possui duas principais funções, resfriamento e lubrificação, para impedir perdas ou deformações nos rotores. Como o óleo utilizado neste sistema possui um limite de temperatura de operação, é necessário realizar a monitoração da temperatura dos mancais e assim, limitar a temperatura a qual o óleo é submetido.

Cabe ainda ressaltar um último sistema de proteção utilizado nos geradores, o monitoramento de vibração. Junto ao sistema de monitoramento de vibração da turbina, o gerador e o redutor são monitorados, para que os níveis de vibração não excedam os limites de operação permitidos. Os sensores de vibração, ou acelerômetros, são instalados nos mancais destes equipamentos para monitorar as variações durante a operação do trem de geração de energia. O sinal destes sensores é enviado ao sistema de controle da turbina, onde está o sistema de monitoramento de vibração, um equipamento comumente utilizado para esta função é o Bently Nevada 3500.

2.7.3 Controle

2.7.3.1 Descritivo do Sistema de Controle

O sistema de controle e a automação de turbinas são dois dos tópicos mais discutidos durante a fase de projeto da planta de geração de energia. Além de controlar toda a geração de potência da turbina, o sistema de controle também realiza a proteção do turbogerador (conjunto turbina e gerador). Com o crescimento e maior conscientização dos riscos associados aos trabalhos de manutenção e operação, os requisitos de proteção da máquina vem se tornando mais restritivos. Este aumento de restrições associado à realização de trabalhos perigosos fez com que ao longo dos anos as turbinas se tornassem mais automatizadas, com o intuito de limitar os riscos a ela associados.

Durante a operação de um Turbogenerador diferentes modos de operação e controle são utilizados. A principal diferença entre estes modos de controle está no objetivo final de cada um deles. Diferentes mercados de atuação possuem finalidades distintas ao integrar um turbogerador em seu sistema. Esta diferença pode ser exemplificada pelos grandes contrastes entre os projetos de geração de energia dos mercados de Papel e Celulose e de Óleo e Gás. No mercado de Papel e Celulose o principal objetivo do uso de uma turbina a vapor é o condicionamento do vapor que pode ser extraído da máquina no escape da turbina, ou por um sistema de extração. Já no mercado de Óleo e Gás a finalidade do conjunto turbogerador é gerar energia suficiente para abastecer a planta, neste mercado é comum que as plantas sejam plataformas em alto mar, sendo assim, o turbogerador deve gerar energia o suficiente para abastecer toda a plataforma de extração de petróleo.

O sistema de controle da turbina pode ser dividido em quatro frações primordiais, são elas:

- a) Sistema de Controle em Malha Aberta;
- b) Sistema de Controle em Malha Fechada;
- c) Proteção de Sobrevelocidade e Monitoramento de Vibrações;
- d) Sistema Supervisório;

A seguir são definidas cada uma das partes que compõe o sistema de controle da turbina:

- a) Sistema de Controle em Malha Aberta (OLC - *Open Loop Control*)

As malhas abertas não utilizam as informações de saída do sistema como retroalimentação. Este tipo de controle não realiza a compensação das perturbações sofridas pelo sistema. O OLC é responsável pelo controle dos sistemas auxiliares, como os motores elétricos associados às bombas, e pelas proteções térmicas.

Implementado dentro do CLP (Computador Lógico Programável), o OLC controla o funcionamento dos auxiliares por meio de sinais de entradas das bombas, transmissores e sinais de monitoramento de vibrações advindos do campo. Desta maneira, os sinais de saída deste controle são programados com base nos sinais de entrada recebidos do campo. Alguns exemplos de utilização deste controle são o controle do nível de óleo do tanque e o controle de temperatura dos mancais.

b) Sistema de Controle em Malha Fechada (CLC - *Closed Loop Control*)

O controle de malha fechada, CLC, é realizado por meio do governador da turbina. Este governador pode ser um equipamento separado do CLP, ou até mesmo uma lógica implementada dentro do CLP, como é o caso de alguns sistemas de controle específicos para o controle de turbinas. Utilizado para controlar a velocidade de rotação da turbina, o governador irá regular a entrada de vapor na turbina por meio das válvulas de admissão de vapor. Este controle de velocidade e de potência gerada pela turbina será discutido adiante.

c) Proteção de Sobrevelocidade e Monitoramento de Vibrações

Devido a elevada velocidade de rotação da turbina algumas vibrações podem ser observadas no turbogerador. Os sistemas de proteção de sobrevelocidade e de monitoramento de vibrações são utilizados para evitar que estas vibrações afetem o funcionamento do conjunto. Deste modo, são utilizados dois equipamentos dentro do painel de controle da turbina para realizar esta proteção. Estes equipamentos serão discutidos de uma maneira mais detalhada adiante.

d) Sistema Supervisório

O sistema supervisório, assim como o próprio nome diz, supervisiona a operação da turbina, ele monitora e opera as variáveis de controle. A supervisão do sistema de controle é realizada principalmente através de IHM (Interface Homem Máquina) e da Estação de Operação. Por meio destes dois equipamentos, o operador pode monitorar diversas va-

riáveis relacionadas ao processo de geração de energia da turbina e os alarmes gerados durante a operação. As telas de operação permitem ainda a modificação dos valores de *setpoint* da variável controlada, seja ela a pressão ou a potência gerada.

2.7.3.2 Modos de Controle

Após a descrição destas quatro partes fundamentais do sistema de controle faz-se mister descrever e diferenciar os tipos de controle que podem ser utilizados na turbina, sendo eles:

a) Controle de Carga

Este primeiro controle é utilizado para determinar a quantidade de energia gerada pelo sistema. A partir de um *setpoint* determinado pelo operador do sistema, o controle de carga realizado pelo governador controla a potência gerada pelo conjunto, este controle pode ser realizado também por meio de um controle de fator de potência ou de potência reativa gerada.

Em uma turbina a vapor o Sistema de Controle recebe um *feedback* da potência real sendo gerada pelo sistema e atua por meio do regulador de tensão (AVR - *Automatic Voltage Regulator*) nas válvulas de admissão de vapor na turbina. Quando o turbogerador está sincronizado com a rede elétrica a sua frequência será determinada pelo sistema, o que irá, conseqüentemente, limitar a rotação do conjunto como descrito na equação 2.12.

O Sistema Elétrico Nacional Brasileiro limita, por meio das regulações do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a frequência do sistema elétrico em 60 Hz (com pequenas variações determinadas por norma). Desta maneira, um gerador de 4 polos sincronizado com à rede elétrica terá uma rotação de 1800 rpm.

Assim, como a frequência de operação do gerador é limitada pela rede, o controle de carga de um gerador sincronizado à rede acontece a partir de variações no torque, resultantes do aumento de vapor ou gás admitido pela turbina. A potência gerada pelo conjunto pode ser relacionada ao torque do rotor pela equação 2.13.

$$P = \omega \cdot \tau \quad (2.13)$$

onde P é a potência gerada pelo conjunto, ω a velocidade angular e τ o torque.

b) Controle de Processo

Alguns mercados de aplicação utilizam turbinas a vapor em sua planta não somente com a finalidade de gerar energia, mas também para a preparação e adequação do vapor para a inserção no processo produtivo da planta. Dentre estes mercados destaca-se o de Papel & Celulose, neste mercado o vapor é um dos elementos essenciais ao processo produtivo. Sendo assim, o controle de carga não seria adequado a esta aplicação, visto que a potência gerada pelo conjunto turbogerador é, para o processo, de menor importância que as condições adequadas do vapor.

Como já descrito anteriormente, as turbinas a vapor podem ser construídas com o uso de extrações ou sangrias. O condicionamento do vapor para a utilização nos processos de produção acontece por meio de extrações ao longo da máquina. As linhas de vapor de extração possuem dois tipos de instrumentos principais, sensores de pressão e de temperatura. Estes sensores enviam sinais ao controlador que irá atuar na válvula de admissão da máquina visando adequar os valores P&T (pressão e temperatura) do vapor de extração. Os cálculos termodinâmicos, realizados durante a fase de projeto da planta, devem levar em consideração as condições de P&T requeridas pelo processo. Isto porque, os valores de pressão em cada estágio da máquina influenciam a potência gerada pela máquina e também a eficiência de todo o conjunto do turbogerador.

c) Controle em Ilha

É chamado controle em Ilha aquele utilizado quando o conjunto turbogerador está operando de maneira independente e desconectado do sistema nacional. Esta desconexão com o sistema elétrico implica uma liberdade de variação maior dos níveis de frequência da planta. Esta frequência deve, contudo, ser limitada pelo próprio sistema de controle, uma vez que a potência gerada pelo conjunto será utilizada para alimentar as cargas da planta. Este consumo interno determina a demanda de potência e também quais os limites de frequência permitidos para a operação correta dos equipamentos conectados no sistema elétrico interno da planta.

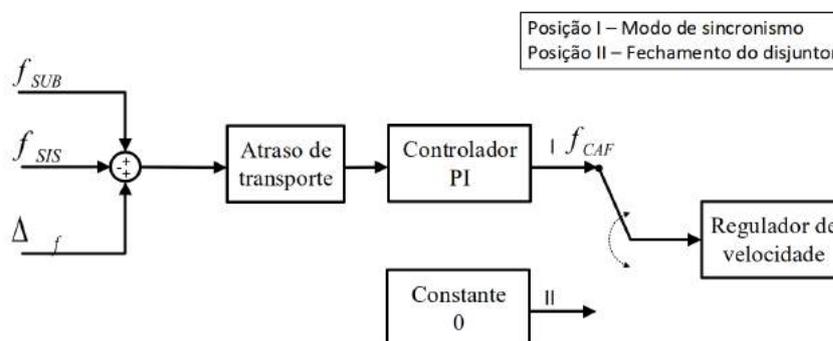
Para evitar danos aos equipamentos, a operação em ilha possui um gerador que é utilizado como referência, todos os demais geradores conectados ao sistema elétrico serão sincronizados utilizando o primeiro gerador como referência.

d) Controle de Frequência

O controle de frequência opera principalmente durante o sincronismo do gerador com o barramento, com o início após o comando inicial de sincronismo e finalização com o fechamento do disjuntor do gerador. Apesar de possuir como principal função o fechamento do disjuntor, o controle de frequência pode operar como controle primário durante todo o período de operação. Cabe ainda ressaltar que o controle de frequência, realizado pelo sistema de controle da turbina, não substitui o uso de um regulador de tensão.

Após o fechamento do disjuntor este controle é desacoplado e o regulador de tensão muda o modo de operação para o controle de potência. A Figura 2.18 descreve o funcionamento do controle de frequência, onde os valores de frequência antes e depois do ponto de conexão do disjuntor são comparados e enviados ao controlador, este sinal considera o atraso de transporte da informação até o controlador. O controlador então envia um sinal ao regulador que fará a adequação da frequência até o momento do sincronismo.

Figura 2.18 – Controle de frequência



Fonte: Ramalho (2016)

onde f_{SUB} é a frequência da rede do lado da planta, f_{SIS} é o valor de frequência da rede externa, Δ_f o desvio de frequência e f_{CAF} é o sinal de saída do controle.

e) Controle de Admissão

O controle de admissão passou a ser solicitado com maior frequência nos últimos anos, com a finalidade de controlar o vapor admitido pela máquina. Este controle é necessário em plantas onde a geração de vapor na caldeira não é contante devido a grande variação no combustível utilizado pela caldeira.

Como em plantas onde é realizada a queima do bagaço da cana-de-açúcar, onde ao longo do ano existe uma grande variação no suprimento de bagaço a ser utilizado. Deste modo,

o controle de admissão regula as condições de pressão e temperatura do vapor admitido pela máquina.

f) *Slidding Pressure*

O *Slidding Pressure* é na realidade um modo de operação onde nenhum dos controles acima é utilizado. Este tipo de operação acontece em ciclos combinados, onde as variáveis que afetam a geração de vapor na caldeira são muitas. Este modo de operação acontece por meio da abertura total da válvula de admissão, e assim, todo o controle da turbina a vapor é consequência do controle realizado na turbina à gás.

Durante os cálculos termodinâmicos da turbina são calculadas as condições de operação do modo *slidding pressure*, assim, quando estas condições são atingidas pela máquina um sinal é enviado ao operador que habilita este modo de operação por meio do sistema supervisorio da máquina.

2.7.3.3 Componentes do Sistema de Controle

Além do controlador, o sistema de controle de uma planta de geração precisa de alguns equipamentos adjacentes para o funcionamento correto da turbina, do gerador, dos motores elétricos e dos demais equipamentos utilizados na planta. Os principais equipamentos utilizados para o sistema de controle podem ser separados em painéis, alocados na sala de controle, na sala elétrica e no campo. Os principais painéis alocados dentro de uma sala elétrica são: o painel de controle da turbina, o painel de controle e proteção do gerador, o painel de sincronismo, painel de excitação do gerador, o centro de controle dos motores, o painel de acionamento da bomba de emergência, o UPS (*Uninterruptible Power Supply*) e o banco de baterias e retificador.

a) Painel de Controle da Turbina (PCT)

O painel de controle da turbina, a ser instalado dentro de uma sala climatizada, aloca os principais equipamentos para controle da turbina: CLP (Controlador Lógico Programável); Rack de Remotas IO (rack onde são alocados os cartões de entradas e saídas digitais utilizados para coleta de dados e envio de sinais aos instrumentos e atuadores da planta); equipamento de monitoração de sobrevelocidade; equipamento de monitoração de vibração; governador de velocidade e IHM.

Note que existem alguns sistemas de controle disponíveis que não precisam do auxílio de um governador de velocidade, uma vez que há dentro do próprio controlador destes sistemas a lógica de controle de velocidade.

b) Painel de Controle e Proteção do Gerador (PCG)

O painel de controle e proteção do gerador, assim como o PCT, deve ser alocado em um ambiente controlado, os principais equipamentos deste painel são o CLP; o rack de Remotas IO e o relé de proteção do gerador.

Note que em algumas aplicações o controle do gerador pode ser realizado no mesmo controlador existente no PCT, reduzindo assim o número de CLPs e eliminando a necessidade de interligação entre dois sistemas de controle separados.

c) Painel de Sincronismo

No painel de sincronismo são alocados os equipamentos utilizados para o sincronismo do disjuntor do gerador, este disjuntor faz a ligação entre o gerador e a rede elétrica, ou ao barramento interno da planta.

Este processo de sincronização consiste em sincronizar a tensão de saída do gerador com a tensão da rede elétricas.

Deste modo, o sistema de sincronismo irá verificar a frequência e a fase do sinal de saída do gerador. A adequação deste sinal será realizada pelo AVR (Regulador Automático de Tensão) até que os valores estejam dentro da faixa de valores permitida pelo sincronizador. Esta faixa de aceitação do sinal é definida durante a engenharia do sistema de sincronismo, e deve respeitar a regulação local.

No caso de uma planta de geração de energia com um único gerador, o sincronismo do disjuntor será feito comparando entre o gerador e a rede de transmissão a qual a planta está conectada. Em plantas onde existe mais de um gerador existe um barramento interno a planta, neste caso os geradores devem ser sincronizados a este barramento, que é conectado à rede elétrica por meio de um disjuntor.

d) Painel de Excitação do Gerador

A principal diferença entre os dois tipos de excitação do gerador utilizados nas plantas de geração de energia é o uso de escovas. O sistema de excitação Brushless se caracteriza por não utilizar escovas para o fornecimento da excitação inicial de um gerador, já o sistema

de excitação estático utiliza escovas para conduzir a corrente de excitação inicial ao rotor do gerador.

O principal componente do sistema de excitação é o regulador de tensão (AVR - *Automatic Voltage Regulator*) que regula a tensão por meio da corrente de campo do gerador. O regulador de tensão é utilizado em ambos os sistemas de excitação, estática ou brushless.

O sistema de excitação estática não precisa de muitos equipamentos adicionais. Por este motivo, é mais comum que seja utilizado em geradores de grande porte.

Ramalho (2016) descreve a operação do regulador de tensão em duas formas distintas, "controlando a tensão nos terminais do gerador ou controlando a potência reativa (ou fator de potência) que esse gerador fornece", estas duas formas atuam regulando a corrente de excitação do campo do gerador.

e) Centro de Controle de Motores (CCM)

Os motores presentes em uma planta de geração são divididos em dois grupos, os motores de corrente contínua (CC) e os motores de corrente alternada (CA). Para partir os motores da planta são utilizados os chamados Centro de Controle de Motores, CCMs, que podem ser do tipo CC, utilizado para acionamento dos motores de corrente contínua da planta, ou CA, utilizado para acionamento dos motores de corrente alternada.

f) Painel de Acionamento da Bomba de Emergência

O painel de acionamento da bomba de emergência é um CCM CC dedicado ao acionamento da bomba de emergência. Em alguns casos este painel possui ainda a função de distribuição 125 Vcc para os demais painéis presentes na sala elétrica.

g) UPS

O UPS (*Uninterruptible Power Supply*) é um sistema ininterrupto de alimentação de energia. Este sistema é utilizado para evitar ou reduzir as consequências causadas por uma interrupção da alimentação dos equipamentos, ou quando a alimentação do sistema possui uma qualidade ruim.

Durante os períodos onde não há fornecimento de energia, a energia armazenada é utilizada para manter o suprimento de alguns equipamentos específicos, e possibilitar um desligamento seguro de alguns dos principais equipamentos. Quando não há queda no

fornecimento de energia, o UPS pode ainda ser utilizado como um filtro, para garantir uma qualidade da tensão de alimentação do sistema.

h) Banco de Baterias e Retificador

O retificador possui duas funções principais na planta de geração, a de carregar o banco de baterias e a de alimentar as cargas contínuas da planta, como os painéis elétricos.

Já o banco de baterias é utilizado em caso de queda de energia. No caso de um apagão o sistema de proteção das turbinas e dos geradores existentes na planta irão ocasionar um alarme e um bloqueio, comumente denominado *trip*, que impedem o funcionamento destes equipamentos.

A parada de uma turbina deve acontecer de forma gradual, para que seus principais elementos não sofram distorções e deformações causadas pela redução da temperatura. Um dos equipamentos utilizados para o controle do resfriamento da turbina é a bomba de óleo de emergência. Este equipamento é utilizado para continuar o suprimento de óleo dos mancais dos geradores, e assim, permitir que o rotor da turbina seja rotacionado manualmente, ou com o auxílio de um motor elétrico.

Esta bomba de óleo de emergência deve ser alimentada unicamente pelo Banco de Baterias, que é dimensionado considerando a corrente necessária para a bomba durante o tempo necessário para a parada da máquina.

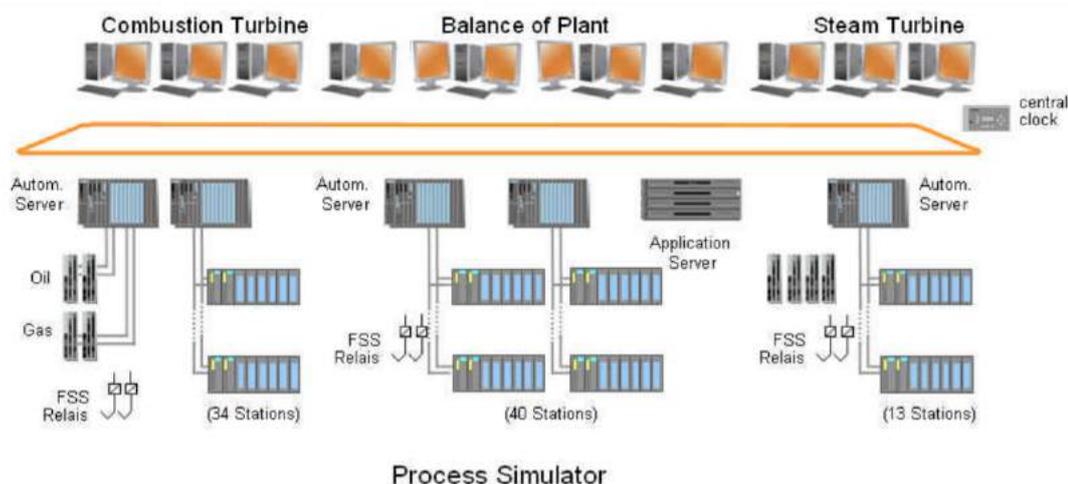
2.7.3.4 Sala de controle

A sala de controle é utilizada para a alocação dos equipamentos relacionados ao sistema supervisão da planta, sua função é comportar em um único lugar todas as estações de operação e engenharia da planta. Os principais sistemas de controle de uma planta de ciclo combinado para a geração de energia são: o sistema de controle das turbinas (que pode ser um único sistema para realizar o controle de ambas as turbinas, ou então, um sistema dedicado a cada turbina) e o DCS (*Distributed Control System*).

A Figura 2.19 representa a arquitetura de controle de uma planta de ciclo combinado. Nesta arquitetura estão representados os sistemas de controle da turbina a gás (*Combustion Turbine*), o sistema de controle da planta (*Balance of Plant*) e o sistema de controle da Turbina a Vapor (*Steam Turbine*). Os três sistemas de controle distintos estão sincronizados por meio de um sistema temporizador central. Conhecido por *central clock*, este temporizador é incorporado

ao anel de comunicação que interliga as estações de engenharia e de operação aos controladores de cada subsistema. Este anel de comunicação é denominado *application highway* e está representado em laranja na Figura 2.19.

Figura 2.19 – Comunicação entre os diferentes equipamentos de um sistema de controle



Fonte: Siemens SPPA T3000 (2007)

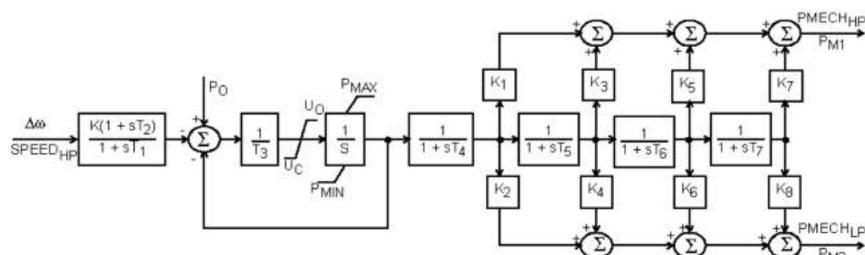
2.8 Modelos Matemáticos

Os modelos matemáticos são modelos utilizados para descrever o comportamento de um sistema após determinada ação. Os modelos matemáticos mais simples utilizam de equações matemáticas para relacionar diretamente a entrada à saída. Para um sistema de controle, onde o valor de saída deve ser adequado à uma faixa de valores, os sinais de saída são utilizados para a correção e adequação do sistema. O uso de múltiplos ganhos e sinais de realimentação determinam a precisão do modelo, e aumentam a complexidade do mesmo.

Diversos modelos podem representar o sistema dinâmico do funcionamento de uma turbina a vapor, incluindo seu governador. Contudo, existem alguns modelos, como por exemplo o modelo IEEE1 (FIGURA 2.20), que são utilizados com uma maior frequência para descrever este funcionamento. Cada parâmetro utilizado no modelo IEEE1 é descrito na Tabela 2.2 e seus limites na Tabela 2.3.

Em sua maioria, os modelos matemáticos são utilizados pelas plantas de geração de energia para os chamados estudos de estabilidade. O estudo de estabilidade é um requisito do sistema elétrico nacional de diversos países, uma vez que este estudo determina o modo como o turbogerador irá reagir às diversas condições de vapor, ou gás, que são admitidas pela máquina.

Figura 2.20 – Modelo IEEEG1 para o governador da turbina



Fonte: NEPLAN (2016)

Tabela 2.2 – Parâmetros do modelo IEEEG1

Nome	Unidade	Descrição
K	PU	Ganho do governador
T1	Segundos	Constante de tempo do governador - Atraso
T2	Segundos	Constante de tempo do governador - Avanço
T3	Segundos	Constante de tempo do posicionador da válvula
U0	PU	Velocidade de abertura máxima da válvula
UC	PU	Velocidade de fechamento máxima da válvula
PMAX	PU	Abertura máxima da válvula
PMIN	PU	Abertura mínima da válvula
T4	Segundos	Constante de tempo da câmara de entrada/ tubulação de entrada
T5	Segundos	Constante de tempo do segundo estágio
T6	Segundos	Constante de tempo do terceiro estágio
T7	Segundos	Constante de tempo do quarto estágio
K1	PU	Fração de alta pressão depois do primeiro estágio
K2	PU	Fração de baixa pressão depois do primeiro estágio
K3	PU	Fração de alta pressão depois do segundo estágio
K4	PU	Fração de baixa pressão depois do segundo estágio
K5	PU	Fração de alta pressão depois do terceiro estágio
K6	PU	Fração de baixa pressão depois do terceiro estágio
K7	PU	Fração de alta pressão depois do quarto estágio
K8	PU	Fração de baixa pressão depois do quarto estágio

Fonte: NEPLAN (2016)

Tabela 2.3 – Limites dos parâmetros do modelo IEEEG1

Parâmetros
$5,0 \leq K \leq 30$
$0 < T1 < 5,0$
$0 < T2 < 10,0$
$0,04 < T3 \leq 1,0$
$0,01 \leq UO \leq 0,3$
$-0,3 \leq UC < 0$
$-2,0 \leq K1 \leq 1$
$K2 = 0$
$0 < T4 \leq 1,0$
$0 < T5 \leq 10,0$
$0 \leq K3 < 0,5$
$0 \leq K4 < 0,5$
$0 < T6 < 10,0$
$0 \leq K5 < 0,35$
$0 \leq K6 < 0,55$
$0 < T7 < 10,0$
$0 \leq K7 < 0,3$
$0 \leq K8 < 0,3$
$0,5 \leq PMAX < 2,0$
$0 \leq PMIN < 0,5$

Fonte: NEPLAN (2016)

3 ESTUDO DE CASO

O estudo de caso contido nesta seção descreve o modo de operação de um ciclo combinado instalado na Bolívia. Ainda que seja possível contabilizar a energia gerada por cada máquina, o modo de operação desta planta trabalha com a medição da geração de todo o conjunto na conexão com a rede. Esta característica permite que caracterizemos esta geração como uma usina híbrida, uma vez que as diferentes fontes de geração de energia primária fornecem potência elétrica ao sistema de maneira complementar.

Seguindo a configuração 2:1, descrita anteriormente, este ciclo possui quatro turbinas de geração de energia à vapor, oito turbinas a gás e oito HRSG (*Heat Recovery Steam Generator*), além de uma turbina a gás operando em ciclo aberto.

A planta, de caráter modular, faz parte de um conjunto de três plantas de geração da Bolívia. Estas plantas fazem parte do plano 2025 do país, que visa tornar a Bolívia o país referência da América Latina em fornecimento de energia elétrica.

A instalação da planta foi dividida em três fases distintas. Na primeira fase foram instaladas 5 turbinas a gás para a operação em ciclo aberto; a segunda fase é a fase de fechamento de ciclo, com a instalação de duas turbinas a vapor e duas caldeiras de recuperação para o fechamento de ciclo segundo a configuração 2:1; e a terceira fase de expansão, que visa aumentar a potência instalada com a adição de turbinas a gás e a vapor em ciclo fechado.

A operação iniciou com 5 turbinas a gás operando em ciclo aberto, e em um segundo momento foi realizada a instalação das máquinas referentes as duas últimas fases, para o fechamento do ciclo e expansão da planta. Durante o fechamento de ciclo e expansão foram instaladas quatro novas turbinas a gás, quatro turbinas a vapor, oito caldeiras de recuperação e 8 novos geradores. Deste modo, a capacidade instalada da planta saiu de 200MW para 520MW (BURKE, 2019)(POWER; TECHNOLOGY, 2018)(TMI, 2019).

3.1 Características Construtivas

As máquinas instaladas possuem valores de potência nominal muito próximos. As diferenças existentes surgem a partir dos cálculos termodinâmicos de cada tipo de turbina, a vapor ou a gás, que visam elevar a eficiência total.

Como discutido anteriormente, turbinas de mesma capacidade permitem a reutilização dos projetos dos equipamentos da planta, como os geradores elétricos e seus equipamentos auxiliares. As características construtivas das turbinas instaladas são descritas a seguir.

3.1.1 Turbinas a vapor

As quatro turbinas a vapor instaladas na planta são turbinas de reação idênticas, modelo SST400. São turbinas de condensação multiestágios com uma indução. A indução permite que vapor seja inserido na máquina após o estágio inicial de admissão, alterando a pressão presente neste estágio.

A Tabela 3.1 descreve as condições do vapor no ponto de carga principal da turbina.

Tabela 3.1 – Condições de operação do vapor

	Unidade	Admissão	Indução	Escape
Pressão	[bar]	81,385	6,318	0,082
Temperatura	[°C]	520	205	42
Vazão	[t/h]	120,67	21,82	142,49
Entalpia	[kJ/kg]	3446	2858	2275

Fonte: Siemens (2016)

3.1.2 Turbina a gás

As turbinas a gás instaladas são do modelo SGT800, a potência de operação média destas máquinas instaladas está entre 43 e 45 MW. Esta variação com relação ao valor da potência nominal da turbina a vapor é consequência da modificação dos cálculos termodinâmicos visando maiores eficiências de operação para a planta.

Ainda que a planta possua um elevado aumento da eficiência global com o fechamento de ciclo, uma das turbinas a gás continua operando em um ciclo aberto. Esta operação em ciclo aberto permite que ainda um outro estágio de expansão da planta seja realizado, ainda que o projeto da planta de geração tenha atingido o ponto desejado de operação.

A potência instalada inicialmente com o uso das cinco turbinas a gás era de 200MW, com a adição de mais quatro turbinas a gás no sistema, a potência gerada unicamente pelas turbinas a gás passa a ser de aproximadamente 360MW. Este aumento de 80% da capacidade de geração permite um aumento da disponibilidade da planta, mesmo quando as turbinas à vapor não estiverem em operação.

3.1.3 Caldeiras de recuperação

Para aumentar a disponibilidade de vapor da planta foram utilizadas duas caldeiras de recuperação por ciclo. Esta configuração 2:2:1 (duas turbinas a gás, duas caldeiras de recupe-

ração e uma turbina a vapor) é utilizada para aumentar a disponibilidade da planta de geração, uma vez que busca garantir o suprimento de vapor quando uma das turbinas a gás estiver fora de operação. Assim, com uma turbina a gás, ou uma caldeira de recuperação fora de operação o suprimento de vapor para a turbina a vapor é mantido, ainda que reduzido.

Como apresentado na Tabela 3.1 a quantidade de vapor admitido pela turbina está diretamente relacionada à potência mecânica gerada pela mesma. Condições de vapor reduzidas fazem com que a eficiência da turbina a vapor seja reduzida, e, por conseguinte, a eficiência global do ciclo.

Em condições normais de operação as caldeiras de recuperação instaladas geram um vapor de alta pressão com temperatura média 518,89 °C e um vapor de baixa pressão com temperatura média 202,46 °C. A Tabela 3.2 apresenta as demais características do vapor gerado.

Tabela 3.2 – Características do vapor gerado

Características do vapor	Valor	Unidade
Valores de alta pressão		
Vazão média	15,58	[kg/s]
Pressão média	72,35	[barg]
Temperatura média	518,89	[°C]
Valores de baixa pressão		
Vazão média	3,49	[kg/s]
Pressão média	6,11	[barg]
Temperatura média	202,46	[°C]

Fonte: Siemens (2019)

3.2 Características elétricas da instalação

O diagrama unifilar da planta, apresentado no Apêndice A mostra a conexão entre os principais equipamentos elétricos instalados na planta. Dentre estes equipamentos, utilizados para proteção, medição e geração de energia, o de maior impacto ao sistema elétrico interno da planta é o gerador síncrono.

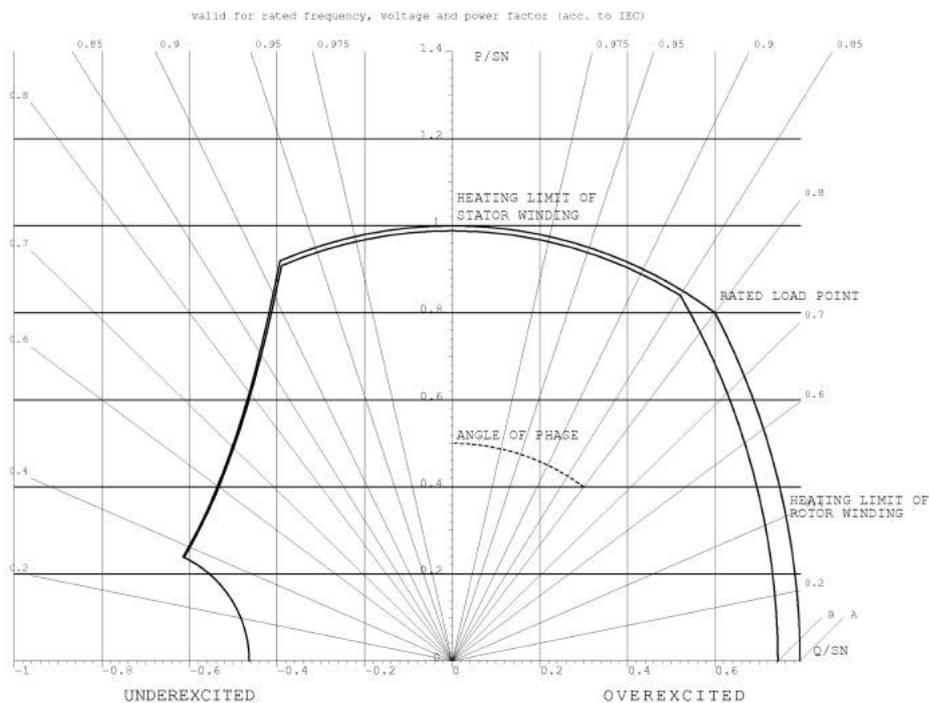
3.2.1 Gerador elétrico

Os treze geradores instalados na planta, cada um acoplado a uma turbina, são geradores idênticos. Esta característica foi possibilitada pelo uso de turbinas com potências semelhantes. Os geradores síncronos utilizados para este tipo de aplicação possuem um fator de potência

diferente de 1, sendo assim a potência ativa do mesmo pode variar dentro dos limites da curva de capacidade do gerador, apresentada na Figura 3.1.

As curvas representadas na Figura 3.1 são geradas a partir dos limites construtivos da máquina. Onde o eixo X relaciona a potência reativa da máquina com a potência aparente; o eixo Y relaciona a potência ativa da máquina com a potência aparente e as linhas que se intersectam no ponto (0,0) são as linhas referêntes aos fatores de potência. Deste modo, a linha que é paralela ao eixo Y é a linha do fator de potência 1, onde a potência aparente da máquina é igual a potência ativa da máquina.

Figura 3.1 – Curva de Capabilidade do Gerador Instalado



Fonte: Siemens (2016)

O gerador instalado neste projeto possui uma potência aparente de 52,374 MVA, conforme os dados do gerador apresentados na Tabela 3.3. Deste modo, variações de potência das máquinas acionadoras, as turbinas acopladas ao seu eixo, podem ser comportadas pelo gerador com o ajuste do fator de potência considerado.

A Figura 3.2 mostra um dos geradores utilizados no projeto.

Tabela 3.3 – Dados operacionais do gerador

Dados Operacionais	Unidade	Valores
Potência Aparente	[MVA]	52,374
Tensão	[kV]	11
Frequência	[Hz]	50
Corrente	[A]	2749
Velocidade	[rpm]	1500
Fator de Potência (atraso/avanço)	PU	0,85/0,92

Fonte: Siemens (2016)

Figura 3.2 – Gerador instalado



Fonte: Siemens (2019)

3.2.2 Cubículo do Disjuntor do Gerador

O cubículo do disjuntor do gerador utilizado para a conexão do gerador com o barramento interno da planta é do modelo HIGS (*Highly Intergrated Generator Circuit Breaker Switchgear*).

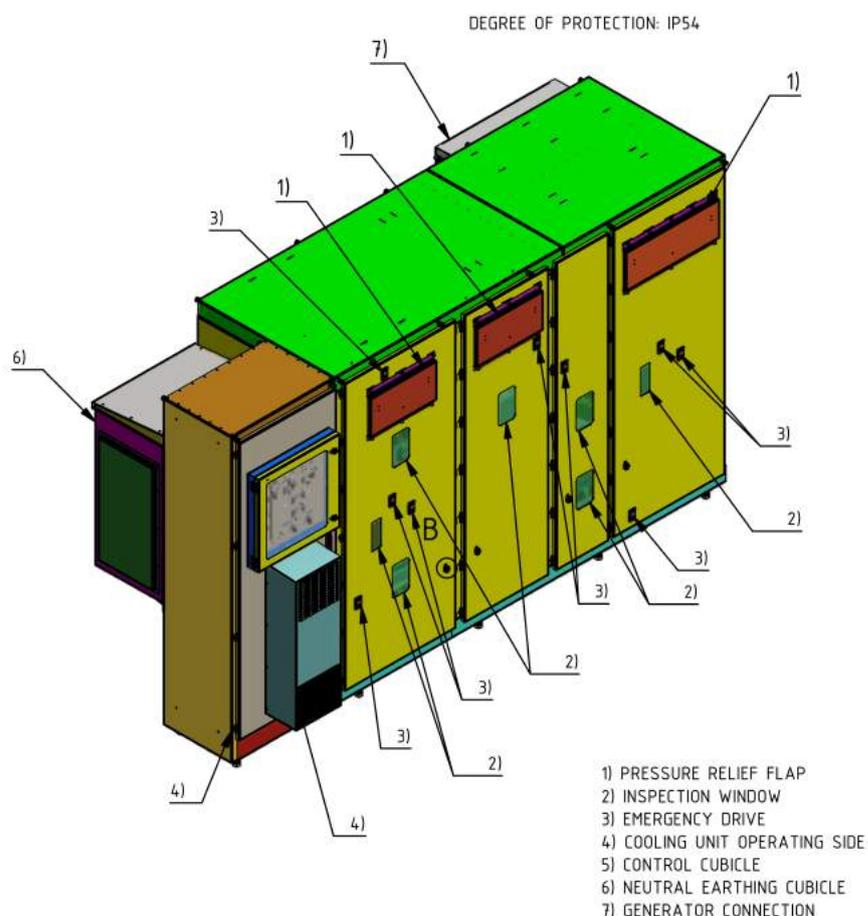
Na Figura 3.3 são apresentados os principais elementos construtivos do painel de alocação do disjuntor. O painel de cinco colunas possui um sistema de ar condicionado dedicado para resfriamento, uma vez que os níveis de tensão e corrente do disjuntor são elevados.

Características construtivas do painel:

- 1) Abas para alívio de pressão
- 2) Janela de inspeção
- 3) Driver de emergência

- 4) Unidade de resfriamento
- 5) Cubículo de controle
- 6) Cubículo de aterramento do neutro
- 7) Conexão geral

Figura 3.3 – Modelo 3D do cubículo do disjuntor do gerador



Fonte: Siemens AG (2016)

3.3 Instrumentação

Ao todo para um trem de geração (turbina a vapor, redutor e gerador) foram instalados 221 instrumentos, dentre transmissores de pressão, transmissores de temperatura, drenos, válvulas, entre outros. Através da associação dos instrumentos ao sistema de controle acontece o monitoramento da operação, a proteção dos equipamentos e a composição de um histórico.

Para aumentar a disponibilidade da máquina e reduzir a necessidade de paradas para manutenção é utilizado o sistema de monitoramento remoto (RMS - *Remote Monitoring System*). O RMS possibilita a operação por períodos maiores de tempo sem a necessidade de parada dos equipamentos, uma vez que as principais características das máquinas estão sendo monitoradas.

As condições de pressão dentro de uma câmara, por exemplo, podem indicar a presença de incrustações e impurezas em cada estágio da máquina. Isto porque a presença de impurezas nos estágios de palhetamento de uma turbina causam uma queda de pressão nos estágios seguintes. O RMS permite que a variação de pressão em cada ponto da máquina seja monitorada ao longo do tempo, reduzindo, assim, a necessidade de parada e abertura da máquina para verificar a existência de impurezas.

De maneira similar, ao monitorar a temperatura do isolamento dos mancais da turbina é possível verificar as condições de operação do sistema de lubrificação e resfriamento dos mancais.

Este histórico de operação do RMS é utilizado para realizar o diagnóstico remoto da planta (RDS - *Remote Diagnostic System*).

3.4 Sistema de Controle

Como as turbinas a vapor representam apenas uma parcela da planta de geração de energia, seu sistema de controle na maioria das aplicações é incorporado ao sistema de controle geral da planta ou ao sistema das turbinas a gás. Esta integração permite que o sistema de controle da turbina se comunique com o sistema da planta, e, em casos onde o sistema de controle da planta de geração de energia ou da turbina a gás é o mesmo sistema Siemens, o controle da turbina a vapor passa a ser um sistema embarcado, onde todo o sistema supervisor da planta é concentrado em um único sistema geral.

O sistema de controle instalado possui uma configuração redundante, onde os principais equipamentos são duplicados para aumentar a disponibilidade do sistema em caso de falhas. Esta redundância é utilizada para aproximar o sistema de controle da turbina a um sistema tolerante a falhas. Esta filosofia redundante foi utilizada para o relé de proteção do gerador, para o regulador de tensão, para o relé de sincronismo e para o controlador.

O T3000 utilizado como sistema de controle das turbinas é um sistema de controle desenvolvido para controle, supervisão, operação e monitoramento de turbinas, em um mesmo controlador são realizados ambos o controle em malha aberta e o controle em malha fechada

do conjunto. Além disso, o sistema de controle é responsável ainda pela proteção da máquina e pela comunicação com o DCS.

3.5 Modelo Matemático

A partir do modelo matemático IEEE1, descrito em maiores detalhes na sessão 2.9, e das características construtivas das máquinas a vapor instaladas na planta pode-se simplificar o modelo utilizado para a representação da turbina (FIGURA 3.4).

Os valores de K, T1 e T2 utilizados no modelo são valores padrão, estes valores são modificados e calibrados durante a fase de comissionamento da máquina.

Os valores de K1, K3, K5 e K7 representam as frações da turbina. Estas frações determinam a proporção que cada turbina estágio da turbina contribui para a composição total da potência da mesma. A soma destes ganhos deve ser igual a 1. K3, K5 e K7 são utilizados apenas quando há estágios de reaquecimento ao longo da turbina.

Os ganhos K2, K4, K6 e K8 são utilizados em máquinas de múltiplos eixos. Os modelos de turbina SST400, utilizados no projeto, possuem apenas um eixo principal onde estão instalados todos os estágios de palhetamento da máquina. Deste modo, estes parâmetros são iguais a zero.

Os parâmetros utilizados no modelo para o ponto de operação principal da máquina são apresentados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Parâmetros do modelo do governador

Descrição	Valor
Potência [MW]	43,48
K	20,00
T1	60,00
T2	20,00
T3	0,30
UO	0,25
UC	-3,30
PMAX	1,01
PMIN	0
T4	0,09
K1	0,26
T5	0,23
K3	0,74

Fonte: Siemens (2016)

turbinas a gás do modelo SGT-800 distribuídas entre as três plantas, sendo cinco pertencentes da planta estudada na sessão anterior.

Durante a fase de expansão das plantas, onde foram realizados os fechamentos de ciclo, foram instaladas outras 14 turbinas a gás do mesmo modelo, onze turbinas a vapor do modelo SST-400 com sistemas de condensação, 22 caldeiras de recuperação de vapor, 25 geradores elétricos, 25 transformadores e um sistema supervisorio geral para o controle de cada planta.

Algumas das vantagens da instalação dos equipamentos iguais conforme descritos acima são apresentadas durante a fase de projeto; na compra de materiais e emprego de recursos; e durante a operação e manutenção das máquinas.

Durante a fase de projetos, a economia de recursos se deve a réplica dos projetos, uma vez que os equipamentos são idênticos, os seus projetos são replicados e apenas revisados caso necessário, deste modo, o tempo empregado durante a fase de projeto é reduzido. Ademais, esta economia de tempo permite uma economia de recursos financeiros empregados nos projetos das máquinas, reduzindo assim o custo total de implementação do projeto.

Outra vantagem de uma planta de geração com equipamentos homogêneos é a redução dos itens sobressalentes adquiridos, uma vez que uma mesma peça sobressalente pode ser utilizada em mais de um equipamento.

Com a implementação das novas turbinas a operação das três plantas passou de 40% de eficiência durante a operação inicial em ciclo aberto, para 51% de eficiência após a instalação das máquinas para o fechamento do ciclo, além de ter alcançado um aumento da potência instalada superior a 1GW.

Para a incorporação de uma turbina à vapor no sistema de geração são necessários alguns sistemas auxiliares adicionais ainda não discutidos, como por exemplo o sistema de tratamento e condicionamento da água. As impurezas presentes no condensado facilitam a erosão dos estágios internos da máquina, uma vez que estas impurezas geram um vapor de qualidade inferior. Deste modo, um dos sistemas auxiliares necessário à operação segura da turbina a vapor é o sistema de tratamento da água, bem como do tratamento do condensado extraído da turbina.

Ainda que diversos sistemas auxiliares sejam necessários à instalação, uma potência maior de energia permite um retorno do investimento em um tempo menor, este tipo de análise econômica utilizada em grande parte dos projetos é conhecido por *capex*, são estes os custos relacionando a instalação da capacidade de geração. O aumento de eficiência gerado na planta

faz com que o retorno ao investimento inicial seja acelerado, e assim reduzindo o tempo de análise do *capex* (BURKE, 2019).

4 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou um descritivo técnico dos equipamentos e soluções utilizados para a expansão de uma termoelétrica. Dentre os recursos empregados para esta expansão alguns apresentam benefícios ao sistema de operação da planta de geração.

Os principais benefícios associados à utilização dos ciclos fechados para a geração de energia, observados na planta estudada, podem ser divididos em dois grupos: os benefícios que trazem um retorno financeiro imediato e os benefícios que trazem um retorno financeiro durante a operação da planta. No primeiro grupo podem ser inclusas as reduções de preço por uso de equipamentos e máquinas iguais, este tipo de redução se deve ao custo reduzido de projeto e engenharia, uma vez que o mesmo projeto é utilizado para múltiplos equipamentos. Esta redução do custo de implementação do projeto é observada no uso dos 8 geradores idênticos instalados na planta, além das turbinas a gas e a vapor.

Já o segundo tipo de retorno financeiro se deve ao aumento de eficiência na planta de geração e na redução de recursos ociosos. Apesar do aumento em eficiência na geração, nota-se que ainda existem recursos ociosos na planta, como a turbina a vapor que permanece em um ciclo aberto de geração de energia.

O projeto entrou em operação no mês de Setembro de 2019. As máquinas de geração ainda não atingiram sua potência nominal de operação, por este motivo ainda não foram sincronizadas com a rede. Por se tratar de um projeto ainda em andamento algumas informações técnicas relacionadas a planta de geração não puderam ser inclusas neste trabalho.

REFERÊNCIAS

- BRANCO, F. P. **ANÁLISE TERMOECONÔMICA DE UMA USINA TERMELÉTRICA A GÁS NATURAL OPERANDO EM CICLO ABERTO E EM CICLO COMBINADO**. Ilha Solteira, SP: Universidade Estadual Paulista, 2005.
- BRASIL. **USINAS HÍBRIDAS: Uma análise qualitativa de temas regulatórios e comerciais relevantes ao planejamento**. Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/>>.
- BURKE, J. A 1gw power expansion in bolivia. **Diesel & Gas Turbine Worldwide GAS TURBINE WORLDWIDE**, Outubro 2019. Disponível em: <<https://diesलगasturbine.com/a-1gw-power-expansion-in-brazil/>>.
- CBC. HRSG. **CBC Indústrias Pesadas S.A.**, 2019. Disponível em: <<https://www.cbcsa.com.br/en/products/20-boiler/70-heat-recovery-steam-generator-hrsg>>.
- CHESF. Energia Solar em Sobradinho. **Chesf**, Março 2016. Disponível em: <https://www.chesf.gov.br/_layouts/15/chesf_noticias_farm/noticia.aspx?idnoticia=59>.
- ECAL. Caldeira elétrica. **ECAL**, 2017. Disponível em: <<https://www.ecal.com.br/paginas/caldeira-eletrica>>.
- ENGENHARIA, T. Partes que compõem uma caldeira. **Blog Industria**, Outubro 2018. Disponível em: <<http://togawaengenharia.com.br/partes-que-compoem-uma-caldeira/>>.
- ENSAIO. Segurança na operação de caldeiras. **Ensaio**, 2017. Disponível em: <<http://ensaio.org/seguranca-na-operaco-de-caldeiras--nr-13-natal--rn-2012-2010-c.html?page=4>>.
- FERREIRA, F. O. **Estrururas e Controles de Caldeiras, Notas de estudo de Tecnologia Industrial**. Vitória,ES: Universidade Federal do Espírito Santo, 2008.
- FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. E.; UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas: com Introdução à Eletrônica De Potência**. [S.l.]: Bookman, 2006.
- LIBRETEXTS. 1st law of thermodynamics. **LibreTexts**, 2019. Disponível em: <[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Thermodynamics/The_Four_Laws_of_Thermodynamics/First_Law_of_Thermodynamics](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Thermodynamics/The_Four_Laws_of_Thermodynamics/First_Law_of_Thermodynamics)>.
- LIBRETEXTS. 2nd law of thermodynamics. **LibreTexts**, 2019. Disponível em: <[https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_\(Physical_and_Theoretical_Chemistry\)/Thermodynamics/The_Four_Laws_of_Thermodynamics/Second_Law_of_Thermodynamics](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Thermodynamics/The_Four_Laws_of_Thermodynamics/Second_Law_of_Thermodynamics)>.
- MHPS. Heat recovery steam generators (HRSG). **Mitsubishi Hitachi Power Systems**, 2019. Disponível em: <<https://www.mhps.com/products/boilers/lineup/hrsg/>>.
- MICHAELIS. Dicionário brasileiro da língua portuguesa. **Editora Melhoramentos Ltda.**, 2019. Disponível em: <<http://michaelis.uol.com.br/busca?r=0&f=0&t=0&palavra=termodinamica>>.
- NEPLAN. Turbine-governor models: Standard dynamic turbine-governor systems in neplan power system analysis tool. **NEPLAN Smarter Tools**, 2016. Disponível em: <https://www.neplan.ch/wp-content/uploads/2015/08/Nep_TURBINES_GOV.pdf>.

POWER; TECHNOLOGY. Siemens begins construction of new bolivia service and training centre. **Power Tecnology**, Novembro 2018. Disponível em: <<https://www.power-technology.com/news/siemens-bolivia-energy-service/>>.

RAMALHO, C. E. **Sistema de sincronização de geradores síncronos distribuídos utilizando unidades de medição fasorial**. São Carlos, SP: Universidade de São Paulo, 2016.

RAMOS, E. F. **Análise do desempenho de um sistema de cogeração com uma microturbina a gás natural**. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.

TMI, S. . C. Three expanded power plants deliver additional 1 gw to bolivia. **International Turbomachinery**, Outubro 2019. Disponível em: <<https://www.turbomachinerymag.com/three-expanded-power-plants-deliver-additional-1-gw-to-bolivia/>>.

WATTS, A. McIntyre's talk in london – plus, the uk's tilting at wind-mills may actually increase co2 emissions over natural gas. **WUWT**, 2012. Disponível em: <<https://wattsupwiththat.wordpress.com/2012/08/18/mcintyres-talk-in-london-plus-the-uks-tilting-at-windmills-may-actually-increase-co2-emissions-over-natural-gas/>>.

ÇENGEL, Y. A.; TURNER, R. H.; CIMBALA, J. M. **Fundamentals of thermal-fluid sciences**. Boston: McGraw-Hill, 2008.

