

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Elétrica
Graduação em Engenharia Elétrica

André Peroni de Moraes

Geração de Energia Elétrica com
Aproveitamento de Excedente de Vapor de
Baixa Pressão

Porto Alegre – RS
2017

André Peroni de Moraes

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM APROVEITAMENTO DE EXCEDENTE DE VAPOR DE BAIXA PRESSÃO

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

Orientador: Prof. Dr. Roberto Petry Homrich

Porto Alegre - RS

2017

André Peroni de Moraes

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM APROVEITAMENTO DE EX-
CEDENTE DE VAPOR DE BAIXA PRESSÃO/ André Peroni de Moraes. – Porto
Alegre - RS, 2017-

86 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Petry Homrich

Projeto de Diplomação – UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO
SUL

ESCOLA DE ENGENHARIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA, 2017.

1. Balanço Termoelétrico. 2. Turbina a Vapor. 3. Gerador Síncrono. I. Roberto
Petry Homrich. II. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. III. Escola de
Engenharia. IV. Título

André Peroni de Moraes

GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA COM APROVEITAMENTO DE EXCEDENTE DE VAPOR DE BAIXA PRESSÃO

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Porto Alegre - RS, 04 de agosto de 2017:

Prof. Dr. Roberto Petry Homrich
Orientador

Prof. Dra. Gladis Bordin
Membro da Banca

**Prof. Dr. Luis Tiaraju dos Reis
Loureiro**
Membro da Banca

Eng. Benhur Bandeira Boff
Membro Suplente da Banca

Porto Alegre - RS
2017

*Este trabalho é dedicado à minha família, principalmente meus pais,
Paulo e Mônica, que sempre me incentivaram e entenderam a necessidade
de abdicar tempo junto a eles para que isso fosse possível.
Agradeço à ajuda mútua que estabelecemos entre colegas durante o curso,
onde contribuímos para minimizar as dificuldades de cada um.
Gostaria de agradecer aos cientistas que tornaram possível todo o
desenvolvimento tecnológico atual do mundo e que deram todo o embasamento
para que seja possível desenvolver novas tecnologias, como cientistas,
James Maxwell, Nikolas Tesla, Albert Einstein, Isaac Newton,
Jean-Baptiste Joseph Fourier, entre outros.*

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de agradecer meus pais, por terem me ensinado bons valores e a importância do aprendizado na vida das pessoas, me dando todo o apoio para que esse sonho fosse possível, além de todo o esforço feito para proporcionar os recursos necessários para que meus irmãos e eu tivéssemos as condições para buscarmos nossos objetivos. O apoio dos familiares e amigos foi fundamental para que eu seguisse em frente, mediante as dificuldades do curso.

Importante agradecer todos os cientistas que dedicaram suas vidas a desenvolver todo o arcabouço teórico do qual é fundamentado o curso de engenharia elétrica e que tornam esse curso tão interessante e de certa forma difícil.

*“Não é sobre chegar ao topo do mundo e saber que venceu
É sobre escalar e saber que o caminho te fortaleceu.”
(Ana Vilela)*

Resumo

Neste estudo foi verificado o problema de excedente de vapor de baixa e o impacto financeiro que ele traz para uma empresa do ramo petroquímico. A partir disso foram propostas três hipóteses de solução para o problema. A primeira hipótese foi a condensação do vapor excedente para reaproveitamento da água. A segunda foi a instalação de um turbogerador com sistema de condensação no escape para aproveitamento do vapor excedente através da geração de energia elétrica para uma vazão fixa de vapor de admissão de 25t/h ou variável entre 4t/h e 25t/h, além de avaliar esta hipótese com a possibilidade de desviar parte do vapor de baixa pressão que atualmente é destinado ao aquecimento de um produto da empresa, passando a utiliza-lo no turbogerador. Sendo a terceira hipótese similar à segunda, porém para uma vazão fixa de vapor de admissão de 50t/h ou variável entre 8t/h e 50t/h, sendo também avaliado esta hipótese com a possibilidade de desviar parte do vapor de baixa pressão que atualmente é destinado ao aquecimento de um produto da empresa, passando a utiliza-lo no turbogerador. Foi feito um levantamento de dados que influenciam no estudo para um período de um ano e são eles: vazão de vapor de baixa pressão emitido para a atmosfera no período de um ano, vazão de gás queimado no *Flare* no período de um ano e que poderia estar sendo utilizado para gerar vapor, cotação da tonelada de gás natural, cotação do dólar e cotação do valor de venda de energia elétrica. Com base na avaliação dos dados e através do conhecimento da planta petroquímica da empresa, foram propostos ajustes no processo industrial para aumentar a lucratividade para uma possível implantação, sendo que o projeto se mostrou viável financeiramente.

Palavras-chave: Vapor de Baixa Pressão, Turbogenerador, Lucro, Viabilidade.

Abstract

In this study we verified the problem of low steam surplus and the financial impact that it brings to a company in the petrochemical industry. From this, 3 hypotheses were proposed to solve the problem. The first hypothesis was the condensation of excess steam for reuse of water. The second was the installation of a turbogenerator with condensation system in the exhaust to take advantage of surplus steam through the generation of electric energy for a fixed inlet steam flow of 25t/h or variable between 4t/h and 25t/h, besides evaluating This hypothesis with the possibility of deflecting part of the low steam that is currently destined to the heating of a product of the company, starting to use it in the turbogenerator. The third hypothesis is similar to the second, but for a fixed admission steam flow rate of 50t/h or variable between 8t/h and 50t/h. This hypothesis is also evaluated with the possibility of deflecting part of the low pressure steam that is currently for the heating of a product of the company, starting to use it in the turbogenerator. A survey of data that influence the study was carried out for a period of one year and they are: low pressure steam flow to the atmosphere in the 1 year period, the gas flow burned in the *Flare* in the period of 1 year and that could be used to generate steam, the price of the ton of natural gas, the price of the dollar and the price of the sale of electricity. About the evaluation of the data and through the knowledge of the company's petrochemical plant, adjustments were proposed in the industrial process to maximize profitability for a possible deployment, and the project proved to be financially viable.

Key-words: Low Pressure Steam, Turbogenerator, Profit, Viability.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Distribuição das reservas de água do planeta.	27
Figura 2 – Representação do Processo de Osmose Inversa.	35
Figura 3 – Ciclo de Rankine com a entropia no eixo das abscissas e a temperatura no eixo das ordenadas.	37
Figura 4 – Tabela de propriedades de vapor de água superaquecido.	38
Figura 5 – Vista esquemática de um gerador síncrono monofásico de rotor cilíndrico com um único enrolamento concentrado e dois polos.	40
Figura 6 – Curva da tensão induzida na bobina do estator da Figura 5.	41
Figura 7 – Vista esquemática da máquina síncrona trifásico de rotor cilíndrico de 2 polos.	42
Figura 8 – Curva das tensões induzidas nas bobinas do estator da Figura 7.	42
Figura 9 – Modelagem da máquina síncrona de rotor cilíndrico por fase com (a) Circuito equivalente e (b) diagrama fasorial.	43
Figura 10 – Ilustração de fluxo de caixa ao longo do tempo.	48
Figura 11 – Sistema de água da ERP.	51
Figura 12 – Fluxo do vapor no sistema de vapor de água da ERP.	52
Figura 13 – Tubulações coletoras e distribuidoras de vapor de água da ERP, com representação das válvulas redutoras de alta para média pressão (M), média para baixa pressão (B), alívio para atmosfera (B') e controle de temperatura (T).	53
Figura 14 – Distribuição principal de energia elétrica da ERP com representação de disjuntores (DJ), chaves seccionadoras (CH) e geradores de energia elétrica (TG).	55
Figura 15 – Quantidade de vapor de baixa pressão em toneladas liberado para a atmosfera ao longo dos meses de um ano.	58
Figura 16 – Quantidade de gás combustível queimado no flare em toneladas ao longo dos meses durante um ano.	59
Figura 17 – PLD em reais ao longo dos meses de um ano.	60
Figura 18 – Ilustração de etapa de troca de calor para especificação do produto A.	61
Figura 19 – Histograma e curva de distribuição normal da vazão de VBP que excede a quantia mínima de 25t/h para aquecimento do produto A com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).	62

Figura 20 – Diagrama de blocos com representação da metodologia para cálculo do lucro do sistema de geração de energia elétrica com aproveitamento do VBP.	66
Figura 21 – Histograma com distribuição normal da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).	67
Figura 22 – Histograma com distribuição normal da vazão de gás combustível queimado no flare durante um ano com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).	68
Figura 23 – Histograma com distribuição normal da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente de 25t/h com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).	70
Figura 24 – Histograma com distribuição normal da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente acima de 4t/h sem a utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).	74
Figura 25 – Histograma com distribuição normal da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente acima de 4t/h com a utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).	75
Figura 26 – Histograma com distribuição normal da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente de 50t/h com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).	77
Figura 27 – Histograma com distribuição normal da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente acima de 8t/h sem utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).	80

Figura 28 –Histograma com distribuição normal da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente acima de 8t/h com utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP). 81

Lista de tabelas

Tabela 1 – Fator multiplicador de Lang para a estimativa de custo de instalação. . .	47
Tabela 2 – Fator multiplicador de Hand para a estimativa de custo de instalação. . .	47
Tabela 3 – Quantidade de combustível para gerar 1t/h de vapor de alta pressão. . .	58
Tabela 4 – Quantidade de combustível e custo para gerar 1MWh de energia elétrica em 13,8kV.	60
Tabela 5 – Análise estatística da quantidade de VBP em toneladas por hora que excede a quantia mínima de 25t/h para aquecimento do produto A . .	62
Tabela 6 – Análise estatística da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano.	67
Tabela 7 – Análise estatística da vazão de gás combustível queimado no <i>Flare</i> durante um ano.	68
Tabela 8 – Análise estatística empírica da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente de 25t/h.	69
Tabela 9 – Especificações técnicas do turbogerador Siemens SST-300.	72
Tabela 10 – Energia elétrica gerada pelo gerador conforme a vazão de admissão. . .	72
Tabela 11 – Análise estatística empírica da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente acima de 4t/h sem a utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A.	73
Tabela 12 – Análise estatística empírica da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente acima de 4t/h com a utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A.	74
Tabela 13 – Análise estatística empírica da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente de 50t/h.	76
Tabela 14 – Especificações técnicas do turbogerador Siemens SST-600.	79
Tabela 15 – Energia elétrica gerada pelo gerador conforme a vazão de admissão. . .	79
Tabela 16 – Análise estatística empírica da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente acima de 8t/h sem utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A.	79

Tabela 17 – Análise estatística empírica da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente acima de 8t/h com utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A.	81
---	----

Lista de abreviaturas e siglas

CA	Corrente Alternada
CBCI	Casa de Bombas de Combate a Incêndios
CC	Corrente Contínua
CH	Chave Seccionadora
DJ	Disjuntor
ERP	Empresa do Ramo Petroquímico
ETA	Estação de Tratamento de Água
FMM	Força Magnetomotriz
GC	Gás Combustível
GN	Gás Natural
gpm	Galões por Minuto
MWh	Mega Watt Hora
NTU	Unidade de Turbidez Nefelométrica
PLD	Preço de Liquidação das Diferenças
ppm	Parte por Milão
R\$/ano	Real por ano
t/h	Tonelada por hora
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
US\$/ano	Dólar por ano
VAP	Vapor de Alta Pressão
VBP	Vapor de Baixa Pressão
VMP	Vapor de Média Pressão
VP	Valor Presente
VPL	Valor Presente Líquido

Sumário

1	Introdução	27
1.1	Motivação	28
1.2	Objetivos	29
1.3	Estrutura do Trabalho	29
2	Revisão de Conceitos e Métodos	31
2.1	Tratamento de Água	31
2.1.1	Tratamento de Água Bruta em Clarificada	31
2.1.1.1	Principais Agentes Coagulantes	32
2.1.1.2	Sulfato de Alumínio	32
2.1.1.3	Auxiliares de Coagulação	33
2.1.2	Água Potável através de Microfiltração	33
2.1.3	Água Desmineralizada Através de Osmose Reversa	34
2.2	Vapor de Água	35
2.2.1	Geração de Vapor de Água	35
2.2.2	Vapor de Água para Promover Potência Mecânica em Turbinas	37
2.3	Geração de Energia Elétrica	38
2.3.1	Máquinas Rotativas	38
2.3.1.1	Máquinas Síncronas	39
2.4	Cálculos Estatísticos	44
2.4.1	Histograma Aplicado em Distribuição Contínua	44
2.4.2	Distribuições Contínuas	45
2.4.2.1	Distribuição Normal	46
2.5	Avaliação Financeira	46
2.5.1	Fator de Estimativa de Custo de Instalação	46
2.5.2	Avaliação de Retorno de Investimento	48
2.5.2.1	Taxa Mínima de Atratividade (TMA)	48
2.5.2.2	Valor Presente (VP) ou Valor Presente Líquido (VPL)	48
3	Sistema de Água, Vapor de Água e Energia Elétrica da ERP	51
3.1	Tratamento de Água da ERP	51
3.2	Geração e Distribuição de Vapor de Água	52
3.3	Geração e Distribuição de Energia Elétrica	54
4	Dados para Análise do Problema	57
4.1	Excedente de Vapor de Baixa Pressão	57

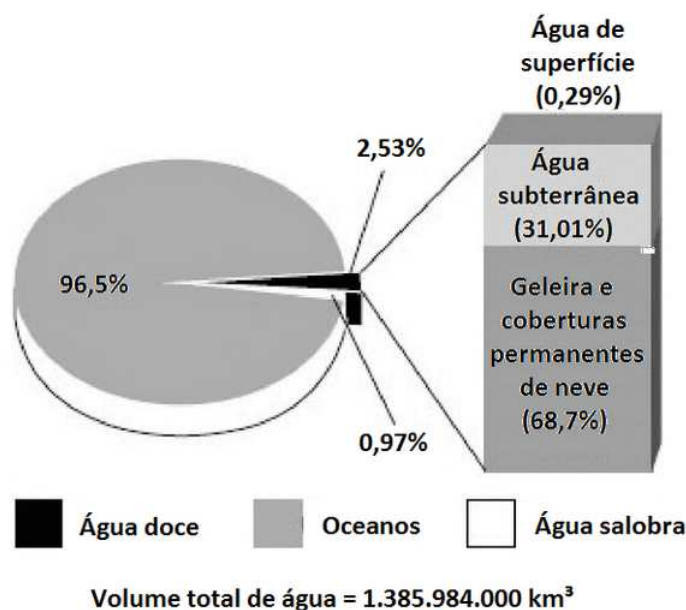
4.2	Excedente de Gás Combustível Queimado no Flare	59
4.3	Custo de Geração e Venda da Energia Elétrica	59
4.4	Vapor para Aquecimento de Produto A	61
5	Hipóteses de Soluções do Problema	65
5.1	Condensação do Vapor de Baixa Pressão para Economizar com Reaproveitamento da Água	66
5.2	Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão Fixa de 25t/h de Vapor de Baixa Pressão	69
5.2.1	Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão Fixa de 25t/h de Vapor de Baixa Pressão sem Utilização de Parte do Vapor de Aquecimento do Produto A	70
5.2.2	Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão Fixa de 25t/h de Vapor de Baixa Pressão com Utilização de Parte do Vapor de Aquecimento do Produto A	71
5.3	Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão de Vapor de Baixa Pressão entre 4t/h e 25t/h	71
5.3.1	Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão de Vapor de Baixa Pressão entre 4t/h e 25t/h sem a Utilização de Parte do Vapor de Aquecimento do Produto A	73
5.3.2	Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão de Vapor de Baixa Pressão entre 4t/h e 25t/h com a Utilização de Parte do Vapor de Aquecimento do Produto A	74
5.4	Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão Fixa de 50t/h	76
5.4.1	Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão Fixa de 50t/h sem Utilização de Parte do Vapor de Aquecimento do Produto A	77
5.4.2	Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão Fixa de 50t/h com Utilização de Parte do Vapor de Aquecimento do Produto A	78
5.5	Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão de Vapor de Baixa Pressão entre 8t/h e 50t/h	78

5.5.1	Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão de Vapor de Baixa Pressão entre 8t/h e 50t/h sem Utilização de Parte do Vapor de Aquecimento do Produto A	79
5.5.2	Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão de Vapor de Baixa Pressão entre 8t/h e 50t/h com Utilização de Parte do Vapor de Aquecimento do Produto A	81
6	Conclusões	83
	Referências	85

1 Introdução

A água é um composto fundamental para manutenção da vida e extremamente abundante no planeta, no entanto muito embora a água cubra dois terços da superfície da Terra, apenas uma pequena parcela referente à “água doce” pode ser utilizada sem que necessite um grande investimento para adequar suas características físicas, químicas e biológicas como pode-se ver na [Figura 1](#) (MIERZWA; HESPANHOL, 2005).

Figura 1: Distribuição das reservas de água do planeta.



Fonte: MIERZWA; HESPANHOL (2005).

Por esse motivo se torna importante pensar no reuso da água não só por motivos financeiros, mas além disso pela questão ambiental de preservação dos recursos hídricos.

A utilização da água como forma de energia é ampla na indústria petroquímica, pois se trata de um composto com características bem conhecidas e estáveis, dominadas pela humanidade.

“A história das primeiras máquinas a vapor teve início com o problema de alagamento das minas de carvão e ferro na Inglaterra que possuíam grandes rodas de água para içar baldes d’água, trabalho que equivalia a 500 cavalos. Denis Papin iniciou experiências com bombas a vapor, e Thomas Severy construiu a primeira máquina a vapor aproveitável em 1698, porém foi o modelo proposto por Thomas Newcomen, onde o cilindro foi separado da caldeira, que solucionou o problema das minas. Esse modelo ficou em operação por 75 anos. Ao se tornar inoperante diante da profundidade excessiva das minas,

o talentoso James Watt foi capaz de aumentar drasticamente a eficiência da máquina. Com um alto aprimoramento mecânico no forjamento de cilindros retilíneos, a máquina a vapor de Watt de 20cv foi posta em operação nas minas de carvão. A transformação do movimento alternado e linear do êmbolo da máquina em movimento giratório permitiu a criação de uma fonte universal de energia que passou a acionar navios, locomotivas, serrarias, cerâmicas, drenagens e outros tipos de atividades. Uma geração após Watt, o domínio do vapor conduzia a Inglaterra ao posto de primeira nação industrial do mundo” (FARIAS; SELKITTO, 2011).

Além do vapor como forma de energia, com o passar do tempo foi descoberta a eletricidade, sendo que a primeira aplicação se deu no campo das comunicações, com o telégrafo e o telefone elétricos. Em 1882, Thomas Edison foi responsável pela construção das primeiras usinas geradoras em corrente contínua, com o foco de atender sistemas de iluminação. Em 1886, foi feita a primeira transmissão de energia elétrica em corrente alternada por George Westinghouse, que foi facilitada pela utilização do vapor através de turbinas para promover energia mecânica para geradores (FARIAS; SELKITTO, 2011).

”O uso da corrente alternada e dos sistemas polifásicos desenvolvidos por Nikola Tesla, em conjunto com o transformador eficiente de Willian Stanley, proporcionaram a transmissão a grandes distâncias e o uso doméstico da energia elétrica. Sua facilidade de transporte e de conversão direta, em qualquer outro tipo de energia, conferiram a energia elétrica o posto de principal insumo da presente era. Sua importância pode ser comprovada pelo fato dos países mais industrializados duplicarem seu consumo de energia elétrica a cada dez anos. Atualmente, a produção de eletricidade é responsável por aproximadamente um terço do consumo de energia primária mundial” (FARIAS; SELKITTO, 2011).

A energia elétrica se tornou tão importante para a sociedade que o consumo de energia é atualmente um dos principais indicadores do desenvolvimento econômico e do nível de qualidade de vida de qualquer sociedade. Ele reflete tanto o ritmo de atividade dos setores industrial, comercial e de serviços, quanto a capacidade da população para adquirir bens e serviços tecnologicamente mais avançados, como automóveis (que demandam combustíveis), eletrodomésticos e eletroeletrônicos (que exigem acesso à rede elétrica e pressionam o consumo de energia elétrica)” (ANEEL, 2017).

1.1 Motivação

Em função da importância do aproveitamento da água, visando a melhoria do sistema industrial e devido ao recorrente problema de desperdício de vapor para a atmosfera, foi feito este estudo do aproveitamento do excedente de vapor de baixa pressão que para geração de energia elétrica, uma vez que ocorre a liberação dele na atmosfera.

1.2 Objetivos

Com base nos dados avaliados, buscou-se uma alternativa viável para o aproveitamento da água que originou este vapor e da energia gasta para poder gerá-lo, aumentando assim a eficiência energética da planta petroquímica onde foi efetuado o presente estudo. Isso é importante, pois além de gerar ganho financeiro, pode trazer uma alternativa para que a empresa possa gerar ainda mais vapor de baixa pressão caso seja de interesse dela.

1.3 Estrutura do Trabalho

No [Capítulo 2](#) há uma revisão teórica dos conceitos e métodos utilizados relacionados com o estudo feito, explanando inicialmente a teoria relacionada ao tratamento da água, até ela atingir o estágio de "Água Desmineralizada" que será utilizada para a geração de vapor de água. Em seguida está presente a parte relacionada à geração de vapor, que é uma fonte de energia largamente utilizada nas indústrias do ramo petroquímico e que é utilizada para acionar turbinas acopladas a geradores para a geração de energia elétrica. Logo após é tratado da parte teórica de máquinas elétricas rotativas e máquinas síncronas, uma vez que são amplamente utilizadas para a geração de energia elétrica. Para finalizar este capítulo, foi exposto o método utilizado para a análise de viabilidade de uma possível implantação de um sistema, onde contém a parte relacionada à análise estatística para avaliar como os dados importantes a serem analisados se comportam ao longo do período, além do método empírico para determinar o custo total de um equipamento já instalado, quando se conta apenas o custo do equipamento.

No [Capítulo 3](#) é descrito os sistemas da empresa do ramo petroquímico onde está sendo o estudo, que por motivos de segredo industrial não pode ser revelado o nome e alguns detalhes das suas instalações. Mesmo assim é ilustrado como é feito o tratamento de água na empresa, geração de vapor e energia elétrica, bem como a distribuição para os consumidores de forma a expor o cenário atual da empresa, dando uma base para facilitar a compreensão de alguns aspectos desenvolvidos nos capítulos seguintes.

A razão que motivou o estudo feito consta no [Capítulo 4](#), onde é exposto o problema do excedente de vapor de baixa pressão e contém o levantamento dos dados referentes não só a isso, mas também a todas as variáveis que podem influenciar de alguma forma para posteriormente sugerir algumas possíveis soluções para o problema.

O [Capítulo 5](#) é reservado às sugestões de possíveis soluções para o problema de excedente de vapor de baixa pressão, onde o foco está na geração de energia elétrica através do acionamento de uma turbina a vapor acoplada a um gerador. Para isso foram analisados os dados levantados no [Capítulo 4](#) e feito um estudo estatístico e financeiro para avaliar a viabilidade de instalação de um equipamento para este fim.

No [Capítulo 6](#) estão as conclusões a respeito da viabilidade do estudo praticado e qual dos equipamentos seria mais viável financeiramente de ser instalado, com base dos dados coletados no período de um ano.

2 Revisão de Conceitos e Métodos

2.1 Tratamento de Água

O embasamento teórico para a composição desta seção foi feito a partir de documentos internos da empresa do ramo petroquímico em que foi executado o estudo deste trabalho, cuja origem teórica é desconhecida e portanto não é possível expressá-la. Isto posto, seguem as informações teóricas referentes a cada assunto.

2.1.1 Tratamento de Água Bruta em Clarificada

A clarificação pode ser definida como sendo a remoção da matéria finamente dividida e em suspensão numa água. Geralmente é a primeira etapa em qualquer tipo de tratamento d'água, pois a maioria das aplicações da água exige que a mesma seja clara e sem cor.

O processo de clarificação tem duas etapas: Floculação e Decantação. As partículas de diâmetro entre 0,001 e 1 micron são denominados colóides. Quando essas partículas são dispersas por agitação na água, forma-se uma suspensão coloidal que não mais se separa em fases, qualquer que seja o tempo de decantação (PETROQUÍMICA, 2017).

A floculação tem por objetivo transformar as partículas coloidais em partículas decantáveis, permitindo deste modo a eliminação da maior parte das matérias em suspensão, por posterior decantação.

Se as partículas coloidais se chocassem umas com as outras poderiam se aglutinar, aumentar de tamanho e conseqüentemente decantar-se. O que impede esse choque entre as partículas coloidais são as cargas elétricas elevadas e de mesmo sinal que elas possuem, repelindo-se umas às outras pela ação das forças eletrostáticas. Estas cargas elétricas em geral são grupos ionizáveis de carga negativa (particularmente OH⁻ da água) adsorvidos na superfície das partículas coloidais (PETROQUÍMICA, 2017).

O que se deseja na clarificação é essencialmente a desestabilização do colóide, ou seja, sua coagulação, e o crescimento das partículas formadas (floculação) de maneira que seja fácil separá-las da água por sedimentação ou filtração (PETROQUÍMICA, 2017).

Consegue-se a coagulação adicionando à água eletrólitos contendo íons de carga elevada. Estes íons neutralizam as cargas elétricas protetoras da partícula coloidal de sinal contrário, anulando as forças de repulsão eletrostática, de maneira a permitir a aproximação e contato entre as partículas (PETROQUÍMICA, 2017).

O poder de um íon é fortemente dependente de sua valência, sendo um íon bivalente

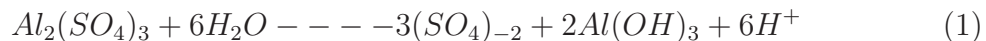
de 30 a 60 vezes e um íon trivalente 700 a 1000 vezes mais efetivos que um monovalente. Por este motivo um dos produtos mais usados em coagulação é o sulfato de alumínio (PETROQUÍMICA, 2017).

2.1.1.1 Principais Agentes Coagulantes

Os produtos mais usados em coagulação são sais de alumínio ou de ferro, tais como sulfato de alumínio, aluminato de sódio, sulfato férrico, cloreto férrico e sulfato ferroso (PETROQUÍMICA, 2017). Estes sais, em presença da alcalinidade natural da água ou da alcalinidade a ela adicionada, dão origem a hidróxidos metálicos trivalentes. Estes precipitam sob a forma de flocos volumosos e pesados, com enorme área superficial por unidade de volume, aprisionando facilmente sólidos em suspensão (PETROQUÍMICA, 2017).

2.1.1.2 Sulfato de Alumínio

É o produto mais amplamente utilizado como coagulante. Quando dissolvido na água, sofre hidrólise de acordo com a Equação (1):



Os H^+ são adsorvidos na superfície das partículas de $Al(OH)_3$, fazendo com que estas partículas adquiram carga elétrica positiva. Em conseqüência, quando se utiliza o sulfato de alumínio, as cargas negativas das partículas coloidais, naturalmente presentes na água, são neutralizadas pelas cargas positivas das partículas de $Al(OH)_3$, dando origem à formação de flocos (BERNARDO; DANTAS, 2006).

O pH da água é de fundamental importância na coagulação. Para cada tipo de coagulante e cada água existe uma faixa ótima de pH, em que o consumo de coagulante é mínimo e a qualidade obtida no tratamento é melhor (COMUSA, 2017)

Para o sulfato de alumínio, a faixa ótima de pH para coagulação é entre 5,7 e 7,5. Abaixo de 5,7 o $Al(OH)_3$ formado se dissolve, formando íons Al^{+3} , enquanto acima de 7,5 há formação de íons $(AlO_3)_{-3}$. O ajuste de pH é feito por agente alcalinizantes (cal, barrilha, soda) ou acidulantes (ácido sulfúrico), conforme o caso (PETROQUÍMICA, 2017).

Deve-se ressaltar que, quando o sulfato de alumínio (ou outro sal de ácido forte) é adicionado à água, sua hidrólise libera H^+ , que reage com a alcalinidade presente. Cada ppm de sulfato de alumínio adicionado consome 0,5 ppm de alcalinidade da água, reduzindo o seu pH (REIS, 2016).

Se a alcalinidade da água é suficiente para neutralizar e superar esta tendência à acidificação, a floculação se processa sem problemas. Entretanto, na maioria dos casos a alcalinidade natural é insuficiente, dificultando a floculação. Para isto é que se utilizam reagentes alcalinizantes: soda, cal, barrilha, ou aluminato de sódio, que corrigindo a deficiência de alcalinidade, permite boa floculação, elevando o pH da água para o valor ideal. Normalmente são adicionados 0,4 ppm de cal, contendo 90% de $\text{Ca}(\text{OH})_2$, ou 0,5 ppm de barrilha para cada ppm de sulfato de alumínio. Por isto, a coagulação depende da análise da água e do pH após adição dos produtos químicos (PETROQUÍMICA, 2017).

2.1.1.3 Auxiliares de Coagulação

São produtos adicionados para melhorar a coagulação e floculação, produzindo flocos maiores e mais pesados, em faixas mais amplas de pH.

Polieletrólitos: São polímeros que quando dissolvidos na água se ionizam, adquirindo carga positiva ou negativa. Daí a classificação dos polímeros em catiônicos, aniônicos ou não-iônicos, sendo que estes não se ionizam em água (não sendo, portanto, polieletrólitos verdadeiros). Além de carga elétrica, o peso molecular do polímero exerce grande influência na floculação. Os de alto peso molecular têm cadeias muito longas e por isso são capazes de estabelecer ligações entre partículas muito pequenas dispersas na água: as cadeias do polímero adsorvem na superfície das partículas, puxando-as juntas em massas mais pesadas e com isso tornando a sedimentação mais rápida. Os polieletrólitos podem agir como coagulantes, mesmo sem a presença destes, e, se usados com sais de alumínio ou de ferro, reduzem sensivelmente o gasto destes produtos, além de serem nitidamente superiores à sílica ativada (BERNARDO; DANTAS, 2006).

A vantagem principal que os polieletrólitos oferecem é o tamanho dos flocos, proporcionando maior velocidade de sedimentação. Outra vantagem no uso dos polieletrólitos é o fato de que eles ampliam a faixa de pH ótimo para a coagulação da água. No Brasil, devido às características de nossas águas e sólidos suspensos, só nos aniônicos e não-iônicos encontram-se a sua melhor aplicação (PETROQUÍMICA, 2017).

2.1.2 Água Potável através de Microfiltração

Água potável pode ser originada através de processos de clarificação e posteriormente a filtração com filtros de areia, como ocorre normalmente nas empresas de tratamento de água nas cidades, ou então através de equipamentos de microfiltração. O equipamento de Microfiltração é um tipo de filtro que purifica a água em modo contínuo, diferente das estações de tratamento de água convencionais que temos nas cidades, já que este equipamento sempre mantém um fluxo contínuo de água, além de não promover a purificação da água através da injeção de produtos químicos.

Este sistema de microfiltração tem a finalidade de fornecer água a remoção de impurezas maiores que 0,1micron da água de alimentação, que pode ser água com turbidez menor que 200NTU (intertravamento de proteção do equipamento) (PETROQUÍMICA, 2017).

O sistema pode fornecer diferentes valores de vazão de água microfiltrada, dependendo do número de módulos (Skids) instalados, sendo concebido de modo a operar totalmente automatizado, com supervisão, sequenciamento de funções e controle por painéis com sistemas operacionais de comando com interface para interação humana local ou remota.

Cada módulo faz uma retrolavagem após um determinado tempo de operação que pode ser ajustado para o tempo que for conveniente, levando em consideração a turbidez da água de alimentação e além disso pode passar por limpezas químicas (ácidas e básicas) conforme a for necessário, com a monitoração da diferença de pressão entre entrada e saída de cada módulo.

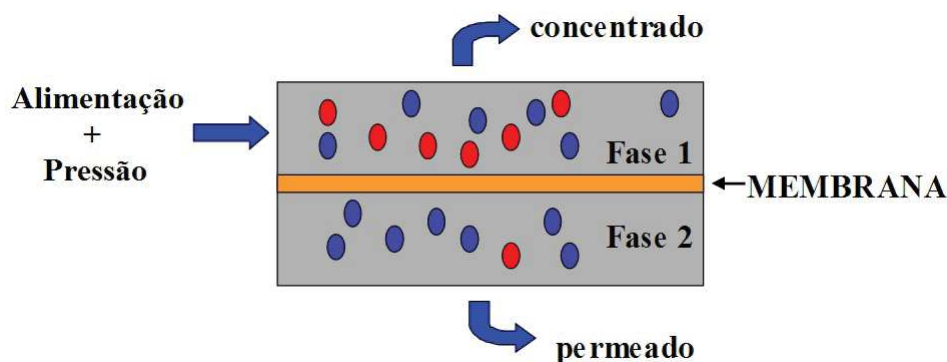
2.1.3 Água Desmineralizada Através de Osmose Reversa

Osmose é um fenômeno natural que ocorre quando duas soluções com diferente concentrações de soluções dissolvidas são separadas por uma “Membrana Semipermeável”. Em osmose natural, o solvente ou água nesta aplicação passa através da membrana da solução com menor concentração de material iônico para a solução com maior concentração iônica. Este processo continua até a concentração iônica das duas soluções estejam iguais ou até que a passagem da água através da membrana alcance a pressão osmótica da solução se as soluções forem isoladas em um recipiente (PETROQUÍMICA, 2017).

A água desmineralizada pode ser originada através de equipamentos de Osmose Reversa que é o reverso deste fenômeno natural, pela aplicação de pressão externa na solução que contém alta concentração de íons dissolvidos, assim forçando a água através da membrana semipermeável na direção oposta, deixando atrás os íons dissolvidos e os sólidos suspensos. No processo de osmose reversa, a água que passou através da membrana é comumente chamada de permeado. A água que permanece atrás da membrana com os sólidos dissolvidos e suspensos é chamada de concentrado, salmoura, ou rejeito, como é demonstrado na [Figura 2](#) (PETROQUÍMICA, 2017).

É impraticável converter toda a água processada em permeado devido ao aumento da pressão osmótica e sólidos suspensos que podem acumular na superfície da membrana. A taxa da passagem da água de produto (ou produtividade) através da membrana é chamada taxa de fluxo e é geralmente expressa em ”galões por pé quadrado de superfície da membrana por dia”, em ”galões por dia por cartucho de osmose reversa” ou em ”galões por minuto por cartucho de osmose reversa”. A taxa de fluxo de uma membrana particular

Figura 2: Representação do Processo de Osmose Inversa.



Fonte: Adaptado de OLIVEIRA (2007).

é geralmente limitada por diversos fatores incluindo temperatura, pressão de operação, e ação de lavagem da superfície para manter a superfície da membrana livre de sólidos suspensos (PETROQUÍMICA, 2017).

A taxa de recuperação de água de alimentação convertida em água de produto é geralmente expressa em forma de porcentagem, com a razão da água de produto sendo expressa como taxa de recuperação. Por exemplo: se a taxa de vazão de alimentação da unidade Osmose Reversa é 200gpm e a taxa de permeado da unidade Osmose Reversa é 150gpm a taxa de recuperação pode ser expressa como 75%. O restante 50gpm não passa através da membrana. Isto é chamado de concentrado e deve ser descartado (PETROQUÍMICA, 2017).

Rejeição da membrana é uma expressão da capacidade de restringir a passagem de íons dissolvidos através da membrana, e é geralmente expressa como uma porcentagem. Por exemplo: se a água de alimentação para a membrana contém 100ppm de sólidos dissolvidos, e o permeado só 2ppm de sólidos dissolvidos após o processamento, o resultado da taxa de rejeição de íons dissolvidos é 98%. O oposto desta expressão é também às vezes usado e conhecido como taxa de passagem de sais, como no nosso exemplo, pode ser expresso como 2% de taxa. Uma taxa de rejeição de membrana de 100% não é possível devido às imperfeições na membrana e a construção do elemento da membrana (PETROQUÍMICA, 2017).

2.2 Vapor de Água

2.2.1 Geração de Vapor de Água

Vapor de água é usado como meio de geração, transporte e utilização de energia desde os primórdios do desenvolvimento industrial. Inúmeras razões colaboraram para

a geração de energia através do vapor. A água é o composto mais abundante da Terra e portanto de fácil obtenção e baixo custo. Na forma de vapor tem alto conteúdo de energia por unidade de massa e volume. As relações temperatura e pressão de saturação permitem utilização como fonte de calor a temperaturas médias e de larga utilização industrial com pressões de trabalho perfeitamente toleráveis pela tecnologia disponível, já há muito tempo (BIZZO, 2012).

Grande parte da geração de energia elétrica do hemisfério norte utiliza vapor de água como fluido de trabalho em ciclos termodinâmicos, transformando a energia química de combustíveis fósseis ou nucleares em energia mecânica, e em seguida, energia elétrica (BIZZO, 2012).

A grande maioria das indústrias de processo químico e petroquímico tem o vapor como principal fonte de aquecimento: reatores químicos, trocadores de calor, evaporadores, secadores e inúmeros processos e equipamentos térmicos. Mesmo outros setores industriais, como metalúrgico, metal-mecânico, eletrônica, etc., podem utilizar de vapor como fonte de aquecimentos de diversos processos (BIZZO, 2012).

Vapor saturado tem a grande vantagem de manter temperatura constante durante a condensação a pressão constante. A pressão de condensação do vapor saturado controla indiretamente a temperatura dos processos. O controle de pressão, por ser um controle mecânico de ação direta é conseguido muito mais facilmente que o controle direto de temperatura (BIZZO, 2012).

A faixa de temperaturas até 170°C utiliza vapor saturado até 10 kgf/cm^2 , cuja temperatura de saturação é 183°C . Nesta faixa está a grande maioria de pequenos e médios consumidores de vapor. Maiores temperaturas são possíveis a custa do aumento da pressão de saturação, o que implica num maior custo de investimento devido a necessidade de aumento da resistência mecânica e requisitos de fabricação e inspeção do gerador de vapor. O limite da temperatura de vapor saturado é o ponto crítico, a 374°C e 218 atmosferas. Não é vantajoso utilizar vapor superaquecido para processos de aquecimento a temperaturas mais altas, já que não seria fácil o controle de temperatura e diminuiria drasticamente a disponibilidade de energia por unidade de massa ou volume de vapor. Vapor superaquecido é utilizado e produzido para geração de energia elétrica ou mecânica em ciclos termodinâmicos, e neste caso a limitação de temperaturas de trabalho fica por conta dos materiais de construção empregados. Em utilização industrial, poderia ser arbitrado uma classificação de geradores de vapor em relação a pressão de trabalho (BIZZO, 2012):

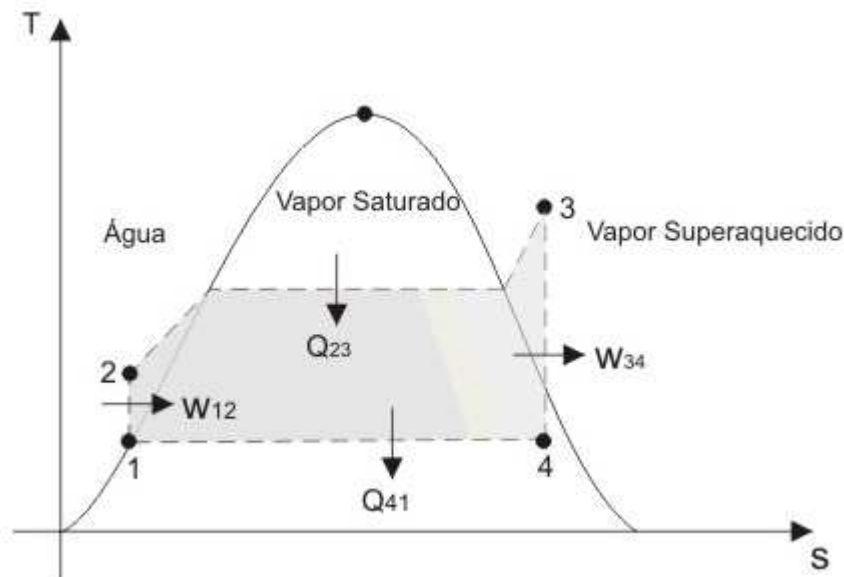
- baixa pressão: até 10 kgf/cm^2 ;
- média pressão: de 11 a 40 kgf/cm^2 ;
- alta pressão: maior que 40 kgf/cm^2 ;

Repetindo que esta classificação é arbitrária, porém representativa da faixa de utilização de vapor na indústria. Grandes caldeiras, as quais são utilizadas tanto para geração própria de energia elétrica quanto para processos de aquecimento, estão limitadas a pressões da ordem de 100 kgf/cm^2 . Existem caldeiras de maiores pressões, mas utilizadas somente em grandes centrais termoelétricas ou grandes complexos industriais, representando um número muito reduzido de unidades, em comparação com as milhares de pequenas caldeiras em operação (BIZZO, 2012).

2.2.2 Vapor de Água para Promover Potência Mecânica em Turbinas

A termodinâmica é a base para o estudo de aproveitamento da energia contida no vapor de água para a geração de energia mecânica em turbinas, onde se utiliza do ciclo ideal de Rankine contido na Figura 3 para determinar o comportamento do fluido com relação ao ganho e liberação de energia. Do ponto 1 para o ponto 2 está relacionado à bomba de água, do ponto 2 para o ponto 3 está relacionado a caldeira, do ponto 3 para o ponto 4 é o campo relacionado a operação de turbina e do ponto 4 para o ponto 1 é a parte relacionada a operação de condensador (IENO; NEGRO, 2004).

Figura 3: Ciclo de Rankine com a entropia no eixo das abscissas e a temperatura no eixo das ordenadas.



Fonte: Adaptado de IENO; NEGRO (2004).

Fundamentado na primeira lei da termodinâmica, que trata a respeito da lei da conservação de energia, tem-se que a potência desenvolvida no eixo da turbina (W_s em *Watts*) está relacionada com a vazão em massa (V em kg/h), entalpia de entrada (h_e em kJ/kg) e entalpia saída (h_s em kJ/kg), conforme demonstrado na Equação (2), con-

siderando o sistema sem perdas (IENO; NEGRO, 2004).

$$W_s = V.(h_e - h_s) \quad (2)$$

Como as propriedades relacionadas à água em seus estados são amplamente conhecidas, os valores relacionados a entalpia podem ser encontrados em tabelas como o exemplo mostrada na Figura 4, que neste caso demonstra valores correspondentes ao vapor superaquecido que é o foco no caso de operação com turbinas (IENO; NEGRO, 2004).

Figura 4: Tabela de propriedades de vapor de água superaquecido.

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 0.06 \text{ bar} = 0.006 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 36.16^\circ\text{C}$)					$p = 3.0 \text{ bar} = 0.30 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 133.55^\circ\text{C}$)				
Sat.	23.739	2425.0	2567.4	8.3304	Sat.	0.606	2543.6	2725.3	6.9919
80	27.132	2487.3	2650.1	8.5804	120				
120	30.219	2544.7	2726.0	8.7840	160	0.651	2587.1	2782.3	7.1276
160	33.302	2602.7	2802.5	8.9693	200	0.716	2650.7	2865.5	7.3115
200	36.383	2661.4	2879.7	9.1398	240	0.781	2713.1	2947.3	7.4774
240	39.462	2721.0	2957.8	9.2982	280	0.844	2775.4	3028.6	7.6299
280	42.540	2781.5	3036.8	9.4464	320	0.907	2838.1	3110.1	7.7722
320	45.618	2843.0	3116.7	9.5859	360	0.969	2901.4	3192.2	7.9061
360	48.696	2905.5	3197.7	9.7180	400	1.032	2965.6	3275.0	8.0330
400	51.774	2969.0	3279.6	9.8435	440	1.094	3030.6	3358.7	8.1538
440	54.851	3033.5	3362.6	9.9633	500	1.187	3130.0	3486.0	8.3251
500	59.467	3132.3	3489.1	10.1336	600	1.341	3300.8	3703.2	8.5892

Fonte: Adaptado de HAAR (1984).

2.3 Geração de Energia Elétrica

2.3.1 Máquinas Rotativas

A conversão eletromecânica ocorre quando surgem alterações no fluxo concatenado decorrentes do movimento mecânico. Nas máquinas rotativas, as tensões são geradas nos enrolamentos ou grupo de bobinas quando esses giram mecanicamente dentro de um campo magnético, ou quando um campo magnético gira mecanicamente próximo aos enrolamentos, ou ainda quando circuito magnético é projetado de modo que a relutância varie com a rotação do rotor. Por meio desses métodos, o fluxo concatenado em uma bobina específica é alterado ciclicamente e uma tensão elétrica variável no tempo é gerada (FITZGERALD, 2003), (CHAPMAN, 2013).

Um grupo dessas bobinas, conectadas em conjunto, é referido comumente com "enrolamento de armadura". Em geral, o termo enrolamento de armadura de uma máquina rotativa é usado para se referir a um enrolamento ou grupo de enrolamentos que conduzam corrente alternada. Em máquinas CA, tais como as síncronas ou as de indução, os enrolamentos de armadura alojam-se tipicamente no parte estacionária do motor conhecida como estator, caso em que os enrolamentos podem ser referidos também como enrolamentos de estator (FITZGERALD, 2003).

Tipicamente, as máquinas síncronas e CC apresentam um segundo enrolamento (ou conjunto de enrolamentos) que produz corrente contínua e que é usado para produzir o fluxo principal de operação da máquina. Tal enrolamento é referido tipicamente como "enrolamento de campo". O enrolamento de campo em uma máquina CC encontra-se no estator, ao passo que no caso de uma máquina síncrona, ele é encontrado no rotor, caso em que a corrente deve ser fornecida ao enrolamento de campo por meio de um contato mecânico rotativo. Sendo que os imãs permanentes também produzem fluxo magnético constante e, em algumas máquinas, são usados no lugar dos enrolamentos de campo (FITZGERALD, 2003), (GOURISHANKAR, 1965).

2.3.1.1 Máquinas Síncronas

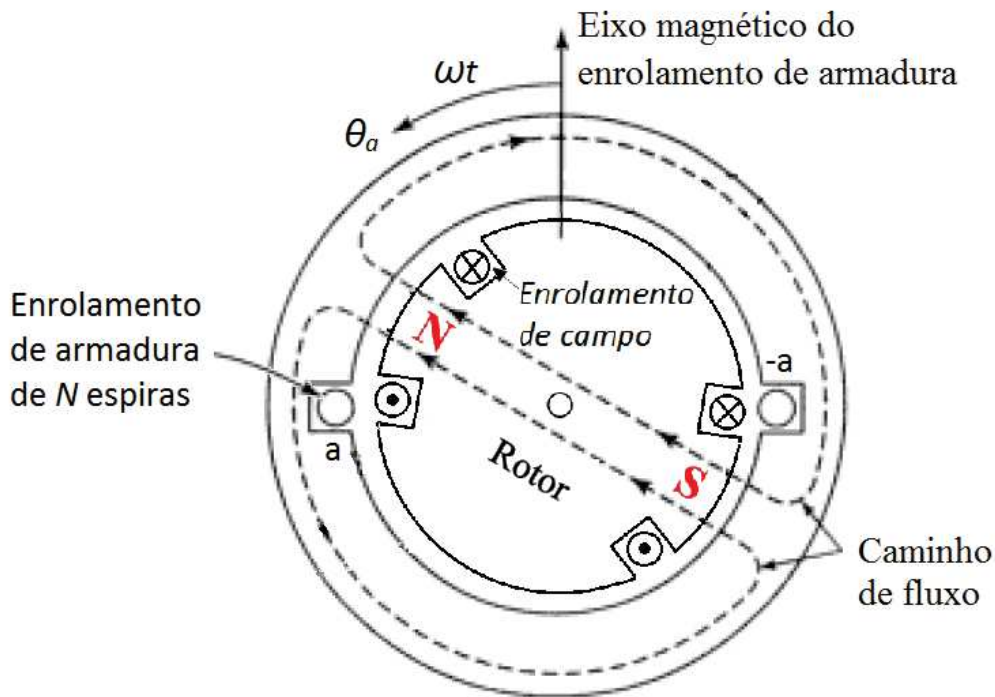
Uma descrição preliminar do desempenho de uma máquina síncrona pode ser obtido discutindo a tensão induzida na armadura do gerador síncrono CA de rotor cilíndrico, muito simplificado, que está mostrado na Figura 5, que se trata de um corte transversal. O enrolamento de campo dessa máquina produz apenas um par de polos magnéticos (como os de uma barra imantada), e por essa razão essa máquina é referida como máquina de dois polos (CHAPMAN, 2013).

O enrolamento de campo é excitado por uma corrente contínua que é levada até ele por meio de Escovas Estacionárias de Carvão que fazem contato com Anéis Coletores ou Anéis Deslizantes Girantes. Usualmente, essa disposição para os dois enrolamentos é ditada por fatores de ordem prática: é vantajoso ter o enrolamento de campo, único e de baixa potência, no rotor e o enrolamento de armadura, de potência elevada e geralmente polifásico, no estator (CHAPMAN, 2013).

O enrolamento de armadura da Figura 5 consiste em uma única bobina de N espiras, que está representada como a e $-a$, alojados em ranhuras estreitas, diametralmente opostas. localizadas na periferia interna do estator (FITZGERALD, 2003).

O rotor é girado à velocidade constante a partir de uma fonte de potência mecânica conectada ao seu eixo. Supõe-se que o enrolamento de armadura esteja em circuito aberto e, portanto, o fluxo dessa máquina será produzido apenas pelo enrolamento de campo, onde os caminhos de fluxo estão mostrados esquematicamente por linhas tracejadas na Figura 5 (FITZGERALD, 2003).

Figura 5: Vista esquemática de um gerador síncrono monofásico de rotor cilíndrico com um único enrolamento concentrado e dois polos.



Fonte: Adaptado de FITZGERALD (2003).

A variação de fluxo magnético ocasionado pela rotação dos polos *norte* e *sul* contidos no rotor, induz tensão elétrica sinusoidal na bobina do estator, que pode ser representada pela [Figura 6](#).

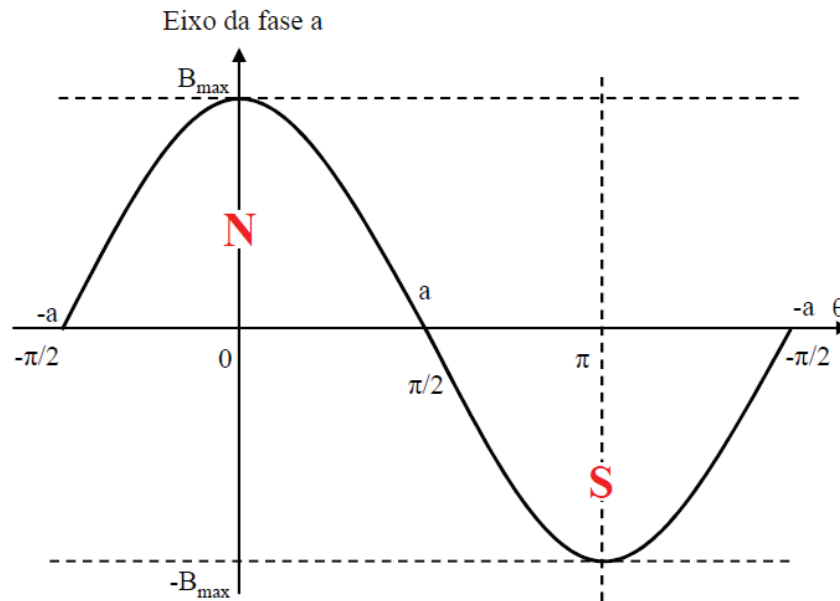
A tensão na bobina da armadura passa por um ciclo completo a cada revolução da máquina de dois polos. Sua frequência, em ciclos por segundo (Hz), é a mesma que a velocidade do rotor em rotações por segundo; a frequência elétrica da tensão gerada está sincronizada com a velocidade mecânica; sendo essa a razão para a expressão máquina “síncrona”. Assim, uma máquina síncrona de dois polos deve girar a 3600 rotações por minuto para produzir uma tensão de 60Hz ([FITZGERALD, 2003](#)).

A tensão induzida na bobina da máquina síncrona, que pode ser representada pela letra e , e que foi ilustrada na [Figura 6](#), pode ser obtida a partir da lei da indução de Faraday, como é mostrado na Equação (3), em função da velocidade angular w , do valor máximo da senoide E_{max} e do instante de tempo t , a partir da prerrogativa de que o rotor está girando a uma velocidade constante ([FITZGERALD, 2003](#)).

$$e_a = E_{max} \cdot \text{sen}(w.t) \quad (3)$$

Analogamente à máquina síncrona monofásica de dois polos, pode-se construir o

Figura 6: Curva da tensão induzida na bobina do estator da Figura 5.



Fonte: Elaborado pelo autor.

raciocínio para a máquina trifásica com 2 polos, ilustrada na Figura 7 (FITZGERALD, 2003).

Assim como na máquina síncrona monofásica, a variação de fluxo magnético originado pelos polos *Norte* e *Sul* do enrolamento de campo contido no rotor em rotação, vão induzir tensões senoidais em cada uma das bobinas, sendo estas tensões defasadas em 120° geométricos, para a máquina de 2 polos, como ilustrado na Figura 8, uma vez que a disposição física destas bobinas deve ser equidistante umas das outras (FITZGERALD, 2003).

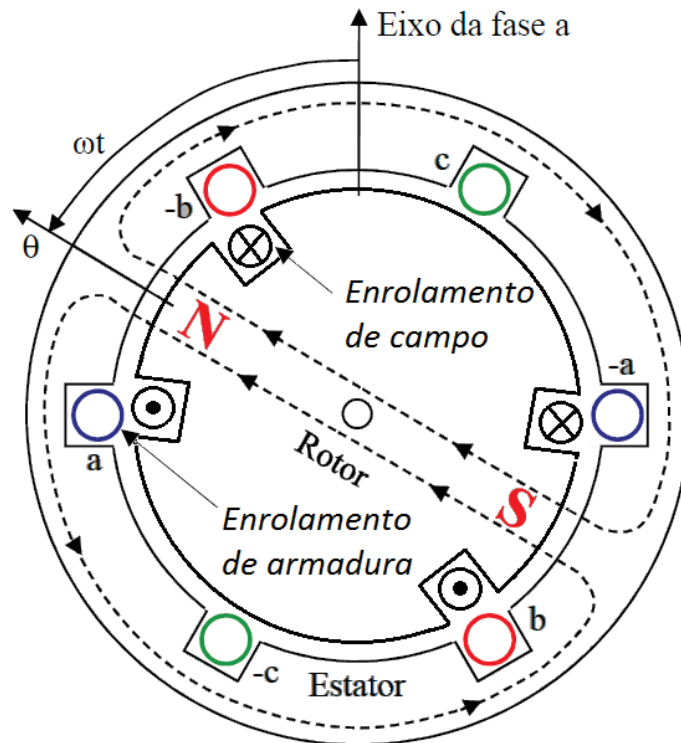
Bem como foi feito na Equação (3), mediante a utilização da Lei de Faraday para encontrar a equação que descreve a tensão e na fase a , é possível usar deste conhecimento e simplesmente inserir a defasagem de 120° na Equação (3), para obter as tensões elétricas e_b e e_c para as fases b e c , respectivamente mostrado na Equação (4) e Equação (5) (FITZGERALD, 2003).

$$e_b = E_{max} \cdot \text{sen}(w.t - 120^\circ) \quad (4)$$

$$e_c = E_{max} \cdot \text{sen}(w.t + 120^\circ) \quad (5)$$

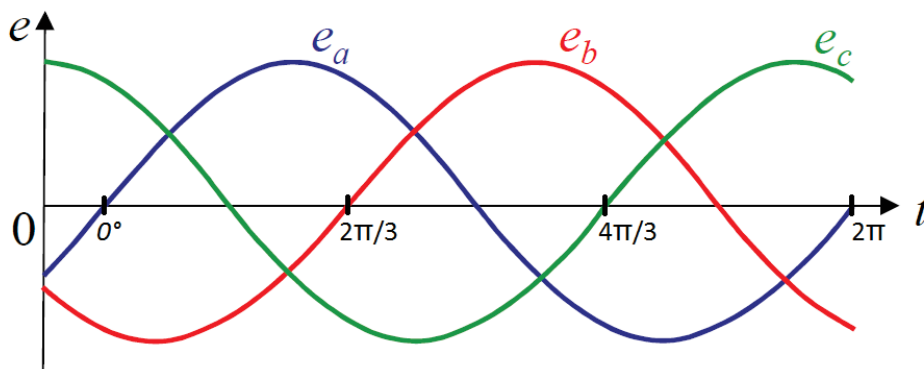
Com a alteração do número de polos da máquina síncrona, não há mudança no embasamento teórico para o estudo da formação das curvas de tensão, haja vista que a

Figura 7: Vista esquemática da máquina síncrona trifásico de rotor cilíndrico de 2 polos.



Fonte: Adaptado de FITZGERALD (2003).

Figura 8: Curva das tensões induzidas nas bobinas do estator da Figura 7.



Fonte: Elaborado pelo autor.

montagem dos polos deve ser feita de forma que ocorra a alternância entre polo *Norte* e *Sul*. No entanto, é importante salientar que modificando o número do polos em uma máquina síncrona, a rotação de operação também irá mudar, independente de estar operando como gerador ou motor, para atender as especificações da rede elétrica padronizada para o Brasil (60Hz). Sendo que a rotação da máquina é definida pela Equação (6), que

define a rotação síncrona n_s (em *rpm*) em função da frequência elétrica f_e e do número de polos da máquina síncrona (FITZGERALD, 2003).

$$n_s = \frac{120 \cdot f_e}{\text{polos}} \quad (6)$$

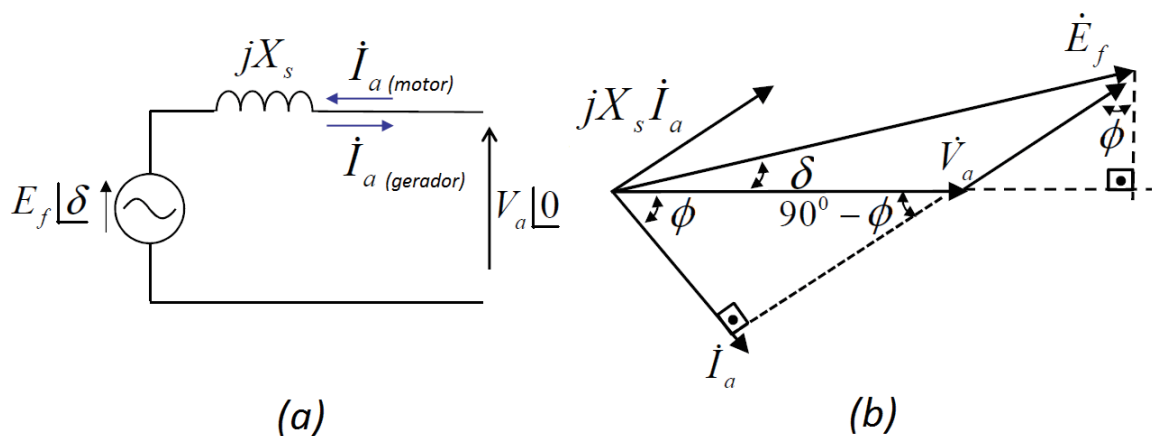
Muitas características importantes do comportamento da máquina síncrona podem ser compreendidas a partir da análise de uma única máquina conectada a um barramento infinito. O comportamento em regime permanente de uma máquina síncrona pode ser visualizado em termos da equação do conjugado e fazendo alterações de notação apropriada à teoria das máquinas síncronas, tem-se a Equação (7), onde ϕ_R é o fluxo resultante por polo no entreferro, F_i é a FMM do enrolamento CC do campo, δ_{RF} é o ângulo de fase elétrica entre os eixos magnéticos de ϕ_R e F_i (CHAPMAN, 2013).

$$T = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{(\text{polos})^2}{4} \cdot \phi_R \cdot F_i \cdot \text{sen} \delta_{RF} \quad (7)$$

Em um gerador, o conjugado da força motriz do acionador mecânico primário atua no sentido de rotação do rotor, impulsionando a onda de FMM do rotor à frente do fluxo de entreferro resultante. O conjugado eletromecânico opõe-se então à rotação, haja vista que a situação oposta ocorre com a máquina síncrona operando como um motor (FITZGERALD, 2003).

A partir de testes feitos na máquina síncrona é possível obter seus parâmetros e com isso fazer a modelagem do comportamento elétrico como é mostrado na Figura 9, desprezando a resistência elétrica da máquina que é muito pequena se comparada com a reatância indutiva, o que simplifica os cálculos posteriores.

Figura 9: Modelagem da máquina síncrona de rotor cilíndrico por fase com (a) Circuito equivalente e (b) diagrama fasorial.



Na [Figura 9](#) (a) temos o circuito equivalente para a máquina síncrona operando como gerador (com a corrente elétrica I_a para a direita) e como motor (com a corrente elétrica I_a para a esquerda) na letra, juntamente com o diagrama fasorial para a máquina síncrona operando como gerador na [Figura 9](#) (b). Com a modelagem do circuito é possível chegarmos à equação da tensão elétrica com a somatória das tensões pela Lei de Kirchhoff, conforme mostrado na Equação (8).

$$E_f = jX_s I_a + V_a \quad (8)$$

A partir do diagrama fasorial obtém-se a equação para a somatória das tensões elétricas mediante os ângulos contidos na figura, como pode ser visto na Equação (9).

$$E_f \cdot \text{sen} \delta = I_a \cdot X_s \cdot \text{cos} \phi \quad (9)$$

Com base no diagrama fasorial é simples encontrar a equação para a potência ativa, apresentada na Equação (10).

$$P = V_a \cdot I_a \cdot \text{cos} \phi \quad (10)$$

Ao isolar a componente da corrente elétrica acompanhada do seu ângulo na Equação (9) e inserindo na Equação (10), encontra-se a potência ativa descrita de forma que é possível inserir diretamente os parâmetros da máquina síncrona conforme a Equação (11).

$$P = \frac{V_a \cdot E_f \cdot \text{sen} \delta}{X_s} \quad (11)$$

2.4 Cálculos Estatísticos

Quando se aplica a Estatística na resolução de problemas administrativos, verifica-se que muitos problemas apresentam as mesmas características, o que permite estabelecer um modelo teórico para determinação da solução de problemas, como exemplo: Os possíveis valores que a variável aleatória X pode assumir; A função de probabilidade associada à variável aleatória X ; O valor esperado da variável aleatória X ; A variância e o desvio-padrão da variável aleatória X ([BERTOLO, 2008](#)).

2.4.1 Histograma Aplicado em Distribuição Contínua

O método para verificação do formato da distribuição de uma variável contínua pode ser a construção do histograma. O histograma é um gráfico de barras justapostas em

que no eixo horizontal está a variável de interesse dividida em classes e no eixo vertical a frequência da classe correspondente. Este gráfico está disponível na maioria dos programas estatísticos (LEOTTI; COSTER; RIBOLDI, 2012).

Quando se trata de valores que não são inteiros, se faz necessário usar de um artifício para facilitar a criação de um histograma. Este artifício é baseado na criação de um pequeno intervalo dentro do próprio intervalo dos valores amostrados, onde se comprime o espaço amostral para ser detalhado com mais facilidade no histograma. O que irá determinar o número de pequenos intervalos contidos dentro do espaço amostral o nível de detalhamento desejado, podendo ser determinado de forma empírica pela Equação (12), onde C é o número de classes ou o novo número de amostras e N é o número original de amostras.

$$C = \sqrt{N} \quad (12)$$

Para transformar o espaço amostral em um novo, considerando os pequenos intervalos, é necessário encontrar um valor de incremento Inc , como mostra a Equação (13). Onde $x_{mínimo}$ é o menor e o $x_{máximo}$ é o maior valor amostrado.

$$Inc = \frac{x_{mínimo} - x_{máximo}}{C} \quad (13)$$

Após ter encontrado o número de classes (novo número de amostras) um valor de incremento, pode ser criado um novo espaço amostral, onde cada valor subsequente será encontrado como uma progressão aritmética, cuja razão sera o valor do incremento como pode ser visto na Equação (14).

$$x_i = x_{i-1} + Inc \quad (14)$$

Desta forma fica simples analisar os valores amostrados que estão compreendidos por dentro do novo espaço amostral através de *softwares* de cálculo e a partir disso elaborar um histograma.

2.4.2 Distribuições Contínuas

Variável aleatória contínua é aquela que pode assumir inúmeros valores num intervalo de números reais e é medida numa escala contínua. Por exemplo, uma variável aleatória contínua deve ser definida entre os números reais 0 e 1, ou números reais não negativos ou, para algumas distribuições, qualquer número real. A temperatura, a pressão, a precipitação ou qualquer elemento medido numa escala contínua é uma variável aleatória contínua (BITTENCOURT; VIALI, 2006).

Existem duas funções associadas a cada variável contínua X : a função densidade de probabilidade, simbolizada por $f(X)$, e a função cumulativa de probabilidade, ou função de distribuição de probabilidade representada por $F(X)$. A função $f(X)$ é aquela cuja integral de $X=a$ até $X=b$ ($b \geq a$) dá a probabilidade de que X assuma valores compreendidos no intervalo (a, b) , ou seja (BITTENCOURT; VIALI, 2006):

$$P(x) = \int_a^b f(x)dx \quad (15)$$

2.4.2.1 Distribuição Normal

Entre as distribuições teóricas de variável aleatória contínua, uma das mais empregadas é a distribuição normal. Sua importância em análise matemática resulta do fato de que muitas técnicas estatísticas, como análise de variância, de regressão e alguns testes de hipótese, assumem e exigem a normalidade dos dados. Além disso, a ampla aplicação dessa distribuição vem em parte devido ao teorema do limite central. Este teorema declara que na medida em que o tamanho da amostra aumenta, a distribuição amostral das médias amostrais tende para uma distribuição normal (DEVORE; SILVA, 2006), (BERTOLO, 2008).

A função que descreve a curva referente à distribuição normal pode ser vista na Equação (16), onde μ é a média e σ é o desvio-padrão (BERTOLO, 2008).

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (16)$$

Quando se tem em mãos uma variável aleatória com distribuição normal, o principal interesse é obter a probabilidade dessa variável aleatória assumir um valor em um determinado intervalo (BERTOLO, 2008), como mostra a Equação (17).

$$Pr(x) = \int_a^b \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} dx = \int_a^b f(x)dx \quad (17)$$

O cálculo desta integral não é trivial, porém com o auxílio de programas computacionais se torna relativamente simples (BERTOLO, 2008).

2.5 Avaliação Financeira

2.5.1 Fator de Estimativa de Custo de Instalação

Para que seja possível estimar um custo de implementação de um equipamento, vários equipamentos ou até mesmo uma planta industrial, existem estudos voltados à estimativa do custo total de instalação, como é o caso do Fator de Proporcionalidade

desenvolvido por *Hans Lang*, que propôs este método de cálculo aproximado depois de tabular o custo de várias fábricas americanas na década de 40. Este método se trata uma forma empírica de fazer esta estimativa através de um fator de multiplicação sobre o custo do equipamento ou instalação conforme consta na [Tabela 2](#) (MATTOS, 2014).

Tabela 1: Fator multiplicador de Lang para a estimativa de custo de instalação.

Tipo de Planta	Fator de Lang
Processamento de Sólidos	3,10
Processamento de Sólidos e Fluídos	3,63
Processamento de Fluídos	4,74

Fonte: MATTOS (2014).

Por outro lado, há o método desenvolvido por W. E. Hand que é mais elaborado, já que utiliza fatores diferentes para diferentes grupo de equipamento, como pode ser visto na [Tabela 2](#) (MATTOS, 2014).

Tabela 2: Fator multiplicador de Hand para a estimativa de custo de instalação.

Grupo de Equipamentos	Fator de Hand
Torres de Destilação	4,0
Tanques	2,5
Acumuladores de Óleo	2,5
Trocadores de Calor	3,5
Bombas e Motores	4,0
Instrumentação e Controle	4,0
Equipamentos Diversos	2,5

Fonte: MATTOS (2014).

A Equação (18) é um exemplo que ilustra o método de Lang para um cálculo de estimativa do custo total de instalação de uma turbina à vapor para acionar uma bomba de água que tivesse sido orçada em R\$12 milhões, onde se tem o Custo de Instalação (CI), Custo do Equipamento (CE) e Fator de Lang (FL) (MATTOS, 2014).

$$CI = CE.FL = 12x10^6.4,74 = R\$56,88\text{milhões} \quad (18)$$

Conforme a estimativa pelo método de Hand, o custo total do equipamento utilizado no exemplo da Equação (18) teria o valor mostrado na Equação (19) (MATTOS,

2014).

$$CI = CE.FL = 12x10^6.4 = R\$48\text{milhões} \quad (19)$$

2.5.2 Avaliação de Retorno de Investimento

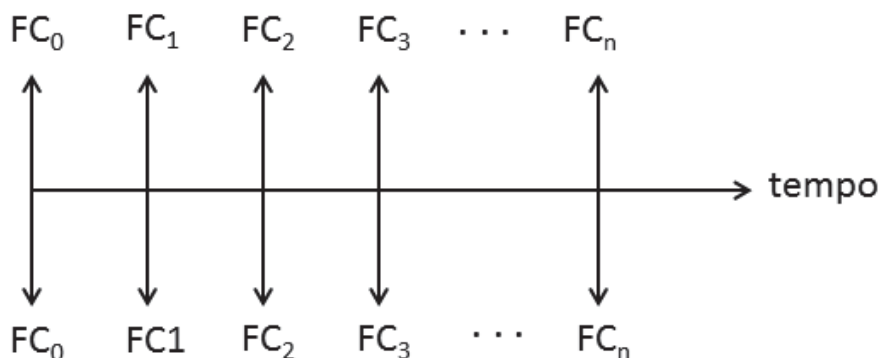
2.5.2.1 Taxa Mínima de Atratividade (TMA)

Se trata de uma taxa de juros da qual se espera que o investimento feito tenha um retorno igual ou superior. O valor escolhido para TMA é particular de cada investidor e pode variar com o passar do tempo devido a inflação e outras oscilações de mercado (FILHO; KOPITTKKE, 2010).

2.5.2.2 Valor Presente (VP) ou Valor Presente Líquido (VPL)

É a diferença entre o valor investido e o valor resgatado ao fim do investimento, trazidos ao valor presente. Se VP for positivo, então o valor investido será recuperado e haverá um ganho. Se VP for zero, significa que aplicar ou não fará diferença. Agora se VP for negativo significa que o investidor estará resgatando um valor menor que o valor investido, então não se deve aplicar neste investimento. Na Figura 10 há uma ilustração do fluxo de caixa (FC), onde as setas para baixo se referem a um valor investido e as setas para cima são referentes ao lucro obtido, ambos ao longo do tempo (FILHO; KOPITTKKE, 2010).

Figura 10: Ilustração de fluxo de caixa ao longo do tempo.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Para o cálculo do VPL é utilizado a Equação (20), colocando o FC com sinal positivo quando se refere a um lucro obtido e o sinal negativo para uma despesa ou investimento. Quando se trata de um investimento, pode-se verificar em quanto tempo

ele irá "se pagar", observando em qual valor de "n" se atinge o VPL igual ou maior que zero.

$$VPL = \sum_{n=0}^N \frac{FC_n}{(1 + TMA)^n} \quad (20)$$

3 Sistema de Água, Vapor de Água e Energia Elétrica da ERP

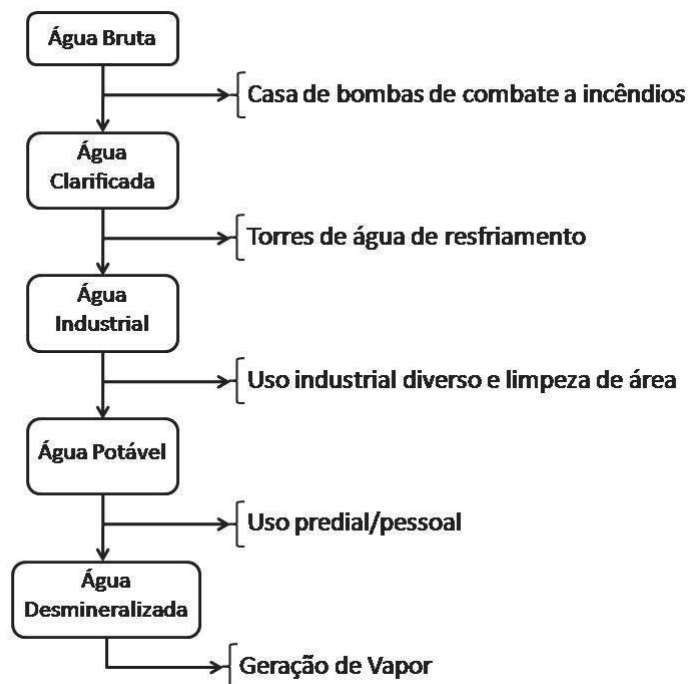
A empresa do ramo petroquímico (ERP) onde foi feito este estudo, é uma empresa que promove os recursos necessário para efetuar os seus processos industriais, a partir da captação de água bruta e tratamento para usos diversos, geração de vapor d'água e energia elétrica.

Devido ao alto valor de investimento, tecnologia empregada nas suas instalações e a concorrência de mercado, algumas informações são tratadas como segredo industrial e não podem ser detalhadas neste capítulo.

3.1 Tratamento de Água da ERP

O fluxo da água desde sua captação até a água desmineralizada que é utilizada para gerar vapor, pode ser visto no fluxograma da [Figura 11](#).

Figura 11: Sistema de água da ERP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

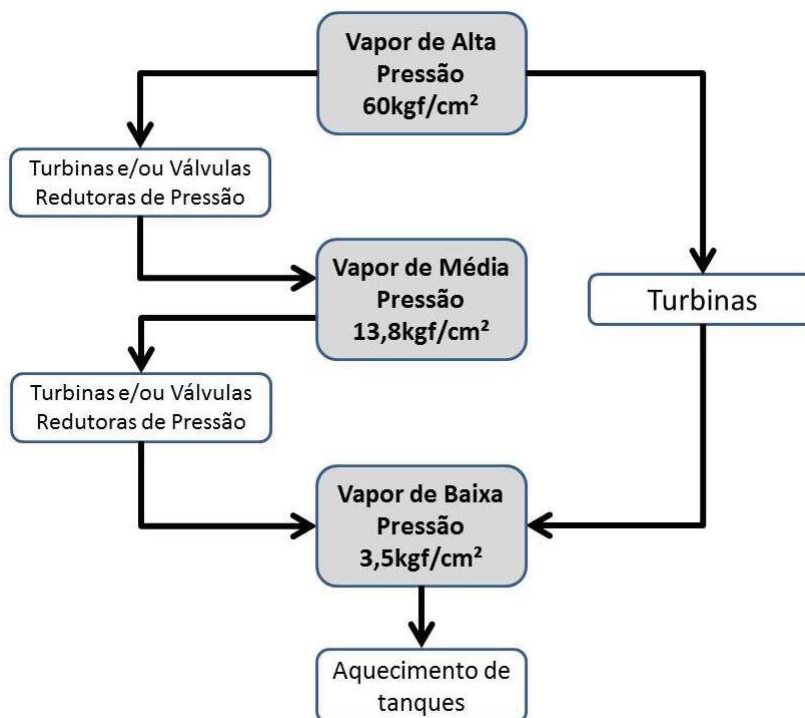
A água bruta é captada na casa de bombas que retira água do rio que abastece

a cidade e envia para um lago situado no interior da empresa que serve de tanque de armazenamento, sendo que dele é enviado para a casa de bombas de combate a incêndio (CBCI) e também para a estação de tratamento de água (ETA). Em seguida a água bruta recebe o primeiro tratamento na ETA, originando a água clarificada que supre as torres de água de resfriamento e que após passar por filtros de areia recebe o nome de Água Industrial, utilizada na limpeza de área industrial, sistema de resfriamento de mancais de equipamentos rotativos, entre outras aplicações. Dando sequência ao percurso da água, o equipamento de microfiltração é alimentado com água industrial, sendo responsável por fornecer a água potável para suprir os prédios e o equipamento de osmose inversa, que por fim é o responsável por fornecer a água desmineralizada utilizada para a geração de vapor.

3.2 Geração e Distribuição de Vapor de Água

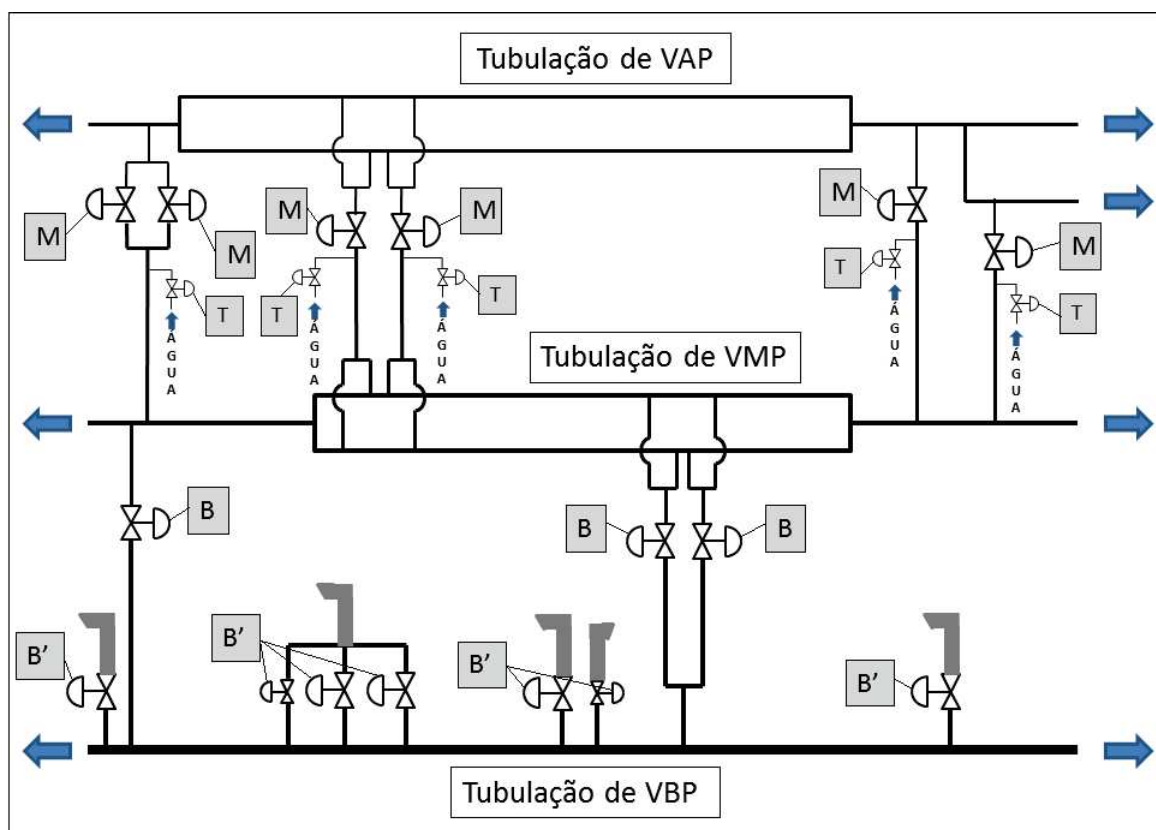
O vapor é produzido praticamente na sua totalidade em alta pressão (60kgf/cm^2), tendo uma vazão média de 435t/h , e as demais pressões (média pressão em $13,8\text{kgf/cm}^2$ e baixa pressão em $3,5\text{kgf/cm}^2$) são resultantes do uso do vapor principalmente em turbinas que rebaixam a pressão após utilizar a energia do vapor para promover trabalho. Pode-se observar o fluxo do vapor no diagrama de blocos da [Figura 12](#).

Figura 12: Fluxo do vapor no sistema de vapor de água da ERP.



A distribuição de vapor de água ocorre através de tubulações que funcionam como coletores, onde ocorre a injeção do vapor produzido nas caldeiras, e distribuidores deste vapor para os consumidores, cujo esboço pode ser visto na [Figura 13](#), onde é possível verificar três níveis de pressão: alta, média e baixa.

Figura 13: Tubulações coletoras e distribuidoras de vapor de água da ERP, com representação das válvulas redutoras de alta para média pressão (M), média para baixa pressão (B), alívio para atmosfera (B') e controle de temperatura (T).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A produção de vapor de alta pressão é feita através de cinco caldeiras com vazão nominal de vapor de 80t/h e um permutador com vazão máxima em modo contínuo de 300t/h. Sendo que uma das caldeiras opera apenas com gás, em virtude de ser uma caldeira de coeração, ou seja, queima gás combustível com alto excesso de ar para acionar uma turbina a gás, acoplada em um gerador de energia elétrica (capacidade nominal de 27MW) e produz vapor com a exaustão de gases quentes de combustão dessa turbina, podendo adicionar uma queima suplementar para aproveitamento do excesso de ar existente nos gases de combustão e gerar ainda mais vapor.

As outras três caldeiras operam com óleo e gás, podendo utilizar estes combustíveis individualmente ou através de queima mista. Já o permutador que é o maior produtor de vapor, considerando as vazões individuais, opera em conjunto com outros trocadores de calor que servem para trocar calor com água desmineralizada resfriando o catalizador,

sendo que este vapor gerado neste processo é superaquecido no permutador, trocando calor com gases quentes do processo de regeneração do catalisador de determinada unidade de processo. Em virtude disso não é possível ter uma vazão fixa de vapor oriundo deste processo, já que a vazão de gases quentes pode variar de acordo com a quantidade e especificação do produto processado na unidade.

A produção de vapor de média pressão é originada pela exaustão de turbinas, como pode ser visto no diagrama de blocos da [Figura 12](#), por extrações intermediárias existentes em três turbogeradores em operação na empresa, que operam admitindo vapor de alta pressão e com sistema de condensação na exaustão, porém contendo um estágio intermediário de extração de vapor de média pressão que é liberado neste coletor. Outra opção para geração de VMP, é a utilização de válvulas redutoras de pressão que estão identificadas na [Figura 13](#) com a letra M, cujas quais operam em conjunto com as válvulas identificadas pela letra T que fazem o controle de temperatura deste vapor utilizado para garantir a pressão da tubulação de média pressão, haja vista que este controle pode ser feito de forma automática ou manual.

O coletor de vapor de baixa pressão é abastecido praticamente na sua totalidade por turbinas que admitem vapor de alta ou média pressão e liberam vapor de baixa pressão nos seus escapes. Como é possível observar na [Figura 12](#), a grande maioria dos equipamentos que utilizam o vapor de alta e média pressão, acaba tendo sua exaustão para o coletor de vapor de baixa pressão, haja vista que o maior consumidor deste são aquecimentos de tanques em que são armazenados os produtos, ou seja, não possui uma utilização que demande num grande consumo e também não contem um sistema de condensação para a reutilização do vapor excedente, transformando-o novamente em vapor. Consequentemente o excedente de vapor de baixa pressão é liberado na atmosfera como medida de segurança através das válvulas identificadas na [Figura 13](#) como B', a fim de manter a pressão do coletor de baixa pressão no valor de operação. No entanto, em caso de baixa geração de VBP, o valor de referência de pressão pode ser suprido por válvulas redutoras de pressão identificadas pela letra B na [Figura 13](#), sendo que estas não possuem controle de temperatura associado.

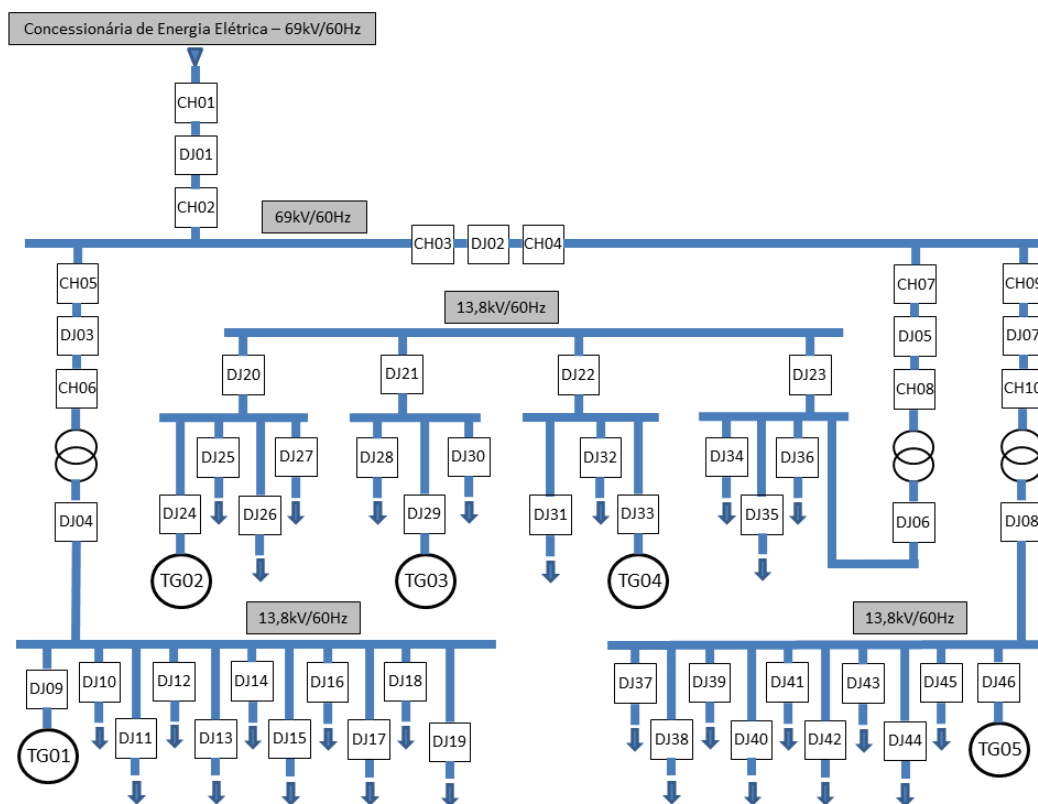
3.3 Geração e Distribuição de Energia Elétrica

A geração de energia elétrica na ERP se dá através de três geradores a vapor de água com geração nominal de 7,5MW, uma turbina a gás com potência nominal de 27MW e uma turbina que opera com os gases quentes da exaustão de uma das unidades, com potência nominal de 27MW. Isso totaliza uma capacidade de geração de 76,5MW de potência. O sistema elétrico dessa empresa possui um disjuntor de interligação com a concessionária que geralmente está fechado e proporciona tanto a venda quanto de compra

de energia elétrica. Por limitações da linha de distribuição da concessionária a venda pode chegar a 26MW e a compra está limitada em 10MW durante o horário de ponta e 11MW fora do horário de ponta.

A energia elétrica é distribuída para o total de 54 subestações, ocasionando o consumo médio durante o ano de 38MWh, sendo que a distribuição principal pode ser vista na [Figura 14](#), onde estão identificados a interligação com a concessionária de energia elétrica, a conexão dos cinco geradores de energia elétrica (TG), os diversos disjuntores (DJ) e chaves seccionadoras (CH) com uma numeração meramente ilustrativa.

Figura 14: Distribuição principal de energia elétrica da ERP com representação de disjuntores (DJ), chaves seccionadoras (CH) e geradores de energia elétrica (TG).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A ERP é autossuficiente em energia elétrica e mais do que isso, tem a necessidade de gerar mais do que consome na maior parte do tempo para evitar a compra de energia elétrica e aproveitar insumos que do contrário seriam queimados no *Flare*, que se trata de um sistema de segurança final nas unidades industriais para onde são direcionados conteúdos inflamáveis para aliviar pressões que excedam os limites máximos de operação onde são queimados numa de tocha que pode chegar a 120m de altura. Com isso, foi feito um contrato com a concessionária de energia elétrica onde a principal finalidade é garantir o fornecimento de energia elétrica para a empresa caso ela tenha problemas na sua geração própria, garantindo uma quantidade de energia elétrica para promover a

operação dos seus principais sistemas, sendo que os limites de compra de energia elétrica permitida são: 10MW em "horário de ponta" e 11MW fora de "horário de ponta". Essas limitações existem em virtude de limitações físicas da rede de distribuição.

4 Dados para Análise do Problema

A geração do vapor de baixa pressão, como visto na [seção 3.2](#), é proveniente do escape de turbinas de alta e média pressão, sendo que o principal consumo deste vapor, que tem por características a pressão de $3,5 \text{ kgf/cm}^2$ e temperatura de 180°C , são as serpentinas de aquecimento de tanque com armazenamento de produtos de baixa densidade, outros sistemas de aquecimento que não exigem uma temperatura muito elevada, além de desaeradores de condensado de vapor.

Em função de não haver um aproveitamento do excedente de vapor de baixa pressão, é comum priorizar a operação de motores elétricos ao invés de turbinas a vapor para otimizar o sistema e minimizar o descarte de vapor de baixa pressão para a atmosfera, haja vista que praticamente todos os sistemas tem uma turbina a vapor e um motor elétrico para a mesma função, podendo operar com um ou outro. No entanto, é importante salientar que a operação com turbinas a vapor como prioridade é considerada como tendo maior confiabilidade para o sistema, já que o motor elétrico tem um desempenho melhor ao partir sob demanda e as turbinas costumam apresentar problemas de vibração ao partir, devido à leve condensação de vapor que pode ocorrer no interior do equipamento, ocasionado por trechos de vapor estagnado e o equipamento não estar totalmente aquecido.

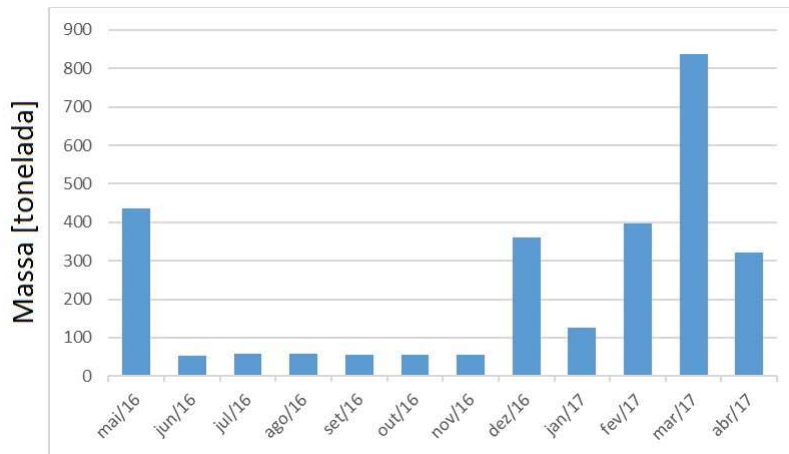
A política de administração da empresa tem influência direta para determinar a metodologia adotada na operação, podendo optar em operar prioritariamente com turbinas, maximizando a confiabilidade ou operar prioritariamente com motores elétricos, maximizando os lucros, ou então operar com uma mescla de turbinas e motores buscando um ponto ideal entre lucros e confiabilidade, porém isso não significa que não haverá vapor liberado na atmosfera em qualquer das três opções de acordo com as condições atuais, principalmente na primeira opção.

4.1 Excedente de Vapor de Baixa Pressão

Infelizmente por não ter um sistema de aproveitamento do vapor de baixa pressão, na atualidade a empresa prioriza a operação com motores elétricos como base e mesmo assim é possível verificar na [Figura 15](#) os dados referentes a quantidade de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera ao longo dos meses durante um ano.

O custo da tonelada de vapor é calculado com base na quantidade e custo do combustível utilizado para gerá-lo, ou seja, pode ter a participação de óleo combustível, gás combustível e gás natural, onde a quantidade necessária para geração de 1t/h de vapor

Figura 15: Quantidade de vapor de baixa pressão em toneladas liberado para a atmosfera ao longo dos meses de um ano.



Fonte: Elaborado pelo autor.

está expressa na [Tabela 3](#). Estes valores de custo da geração de vapor são atualizados todos os dias pelo setor responsável da empresa devido as variações de custo que este combustível pode sofrer, sendo importante salientar que para título de estudo de viabilidade de um sistema, essa ERP leva em consideração basicamente o custo da tonelada de vapor gerada com Gás Natural como combustível.

Tabela 3: Quantidade de combustível para gerar 1t/h de vapor de alta pressão.

Combustível	Quantidade [t/h]
Óleo Combustível	0,07425
Gás Combustível	0,05737
Gás Natural	0,05356

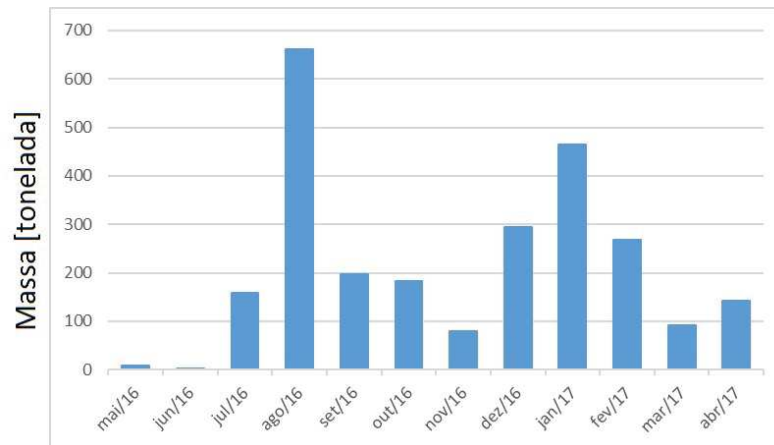
Fonte: Elaborado pelo autor.

Os valores da [Figura 15](#) mostram que a quantidade de vapor emitido para a atmosfera varia ao longo dos meses, contabilizando a quantia de 67.473,9292t/ano, o que acarreta num desperdício de US\$1.079.563,72/ano, que convertido para reais, levando em consideração a cotação do dólar ao longo do ano, chega-se ao valor de R\$3.499.425,17/ano, considerando o custo da geração de vapor com utilização de Gás Natural conforme premissa da empresa.

4.2 Excedente de Gás Combustível Queimado no Flare

Além do vapor emitido para a atmosfera, existe o gás excedente queimado no flare e que poderia estar sendo usado para gerar vapor, caso houvesse um aproveitamento do vapor excedente, ocasionando mais um desperdício como é possível verificar na [Figura 16](#), que expõe a quantidade em toneladas de gás queimado no flare ao longo dos meses durante o ano.

Figura 16: Quantidade de gás combustível queimado no flare em toneladas ao longo dos meses durante um ano.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A [Figura 16](#) mostra que, assim como ocorre com o vapor emitido para a atmosfera, a quantidade de gás queimado no flare ao longo dos meses de um ano não é estável e acarreta numa perda financeira para a empresa, onde a quantidade total de gás queimado ao longo de um ano chega a 2.548,16t/ano e contabiliza uma perda financeira de US\$729.294,10/ano, considerando o custo do Gás Natural conforme premissa da empresa, haja vista que não há como saber a composição exata a todo momento do gás combustível emitidos para flare, devido à variação de composição que ocorre a todo o momento. Convertendo o valor de dólares para reais, tendo como base o valor do câmbio no decorrer do período, chega-se ao valor de R\$2.347.762,65/ano.

Perante esta análise, somando as perdas financeiras do vapor liberado para a atmosfera e o gás queimado no flare, a empresa tem uma perda financeira de R\$5.847.187,82/ano, o que é uma quantidade considerável, tornando justificável analisar uma medida para amenizar este impacto negativo.

4.3 Custo de Geração e Venda da Energia Elétrica

Outro parâmetro importante para a avaliação do cenário como um todo é a quantidade de combustível necessário para a geração de 1MWh de energia elétrica, que pode

ser visto na Tabela 4.

Tabela 4: Quantidade de combustível e custo para gerar 1MWh de energia elétrica em 13,8kV.

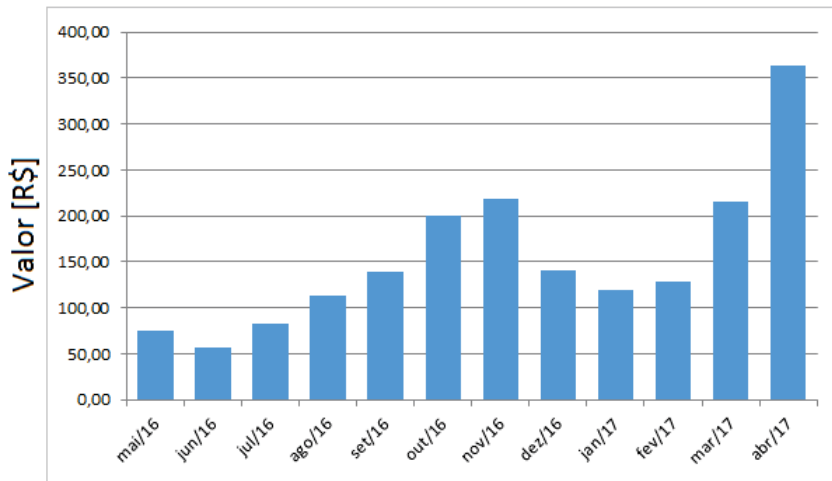
Combustível	Quantidade [t/h]
Óleo Combustível	0,29700
Gás Combustível	0,22948
Gás Natural	0,21425

Fonte: Elaborado pelo autor.

Apesar de ter sido exposto o custo do MWh com os combustíveis disponíveis para a geração de vapor e posterior utilização deste vapor para geração de energia elétrica, considera-se o custo do Gás Natural para efeito de viabilidade, assim como tem sido feito ao longo deste estudo.

Os valores de venda da energia elétrica para a concessionária ao longo do período de estudo também é um dado importante que deve ser levado em consideração para uma possível tomada de decisões no modo de operação do sistema, sendo estes valores mostrados na Figura 17.

Figura 17: PLD em reais ao longo dos meses de um ano.



Fonte: Elaborado pelo autor.

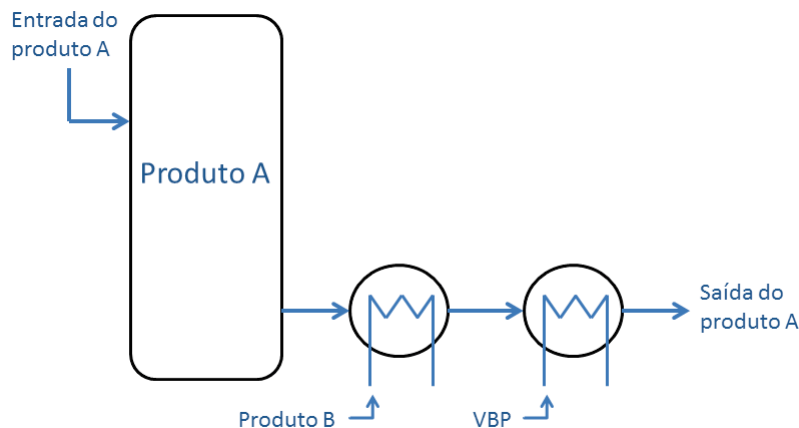
Na Figura 17 verifica-se que o valor de venda da energia elétrica para a a concessionária variou ao longo de um ano, desde valores próximos a R\$50,00, até valores pouco maiores de R\$350,00. Essa variação ocorre devido a oscilação do preço da energia elétrica no mercado de curto prazo. Portanto, isso remete à necessidade de avaliar em conjunto os dados referentes ao custo de geração do MW e o valor de PLD, pois no caso de implantação

de um turbogerador para aproveitamento do excedente de vapor para geração de energia elétrica, isso tem influência direta para optar entre: cortar carga dos turbogeradores de energia elétrica existentes na empresa, caso o custo de geração esteja maior que o ganho obtido com a venda para a concessionária, ou maximizar a venda de energia elétrica caso ocorra o oposto.

4.4 Vapor para Aquecimento de Produto A

Em uma das plantas petroquímicas da empresa existe um vaso de armazenamento intermediário de um produto, que será denominado como Produto A, que para atender os parâmetros de especificação necessários para ser comercializado deve ser aquecido até uma determinada temperatura em certa etapa do processo industrial. Esse Produto A pode ser aquecido trocando calor com VBP, ou com o que será denominado como Produto B, ou então com ambos conforme ilustrado na Figura 18, reiterando que não deve ultrapassar a temperatura específica para esta etapa do processo.

Figura 18: Ilustração de etapa de troca de calor para especificação do produto A.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como a troca de calor do Produto A com o B e o VBP devem ser dosados para manter uma referência de temperatura de saída do Produto A, atualmente vem sendo utilizado apenas o VBP para promover o este aquecimento, visando minimizar o excedente de VBP expelido para a atmosfera.

A condição ideal seria a utilização da troca de calor do Produto A com o B e apenas a complementação do aquecimento do Produto A com VBP, haja vista que a troca de calor com o Produto B está contida no projeto deste sistema porque este produto necessita sofrer um resfriamento, ou seja, cederia temperatura ao Produto A aquecendo-o e ao mesmo tempo sendo resfriado, tendo o melhor aproveitamento do sistema. No entanto, atualmente vem sendo resfriado com a utilização da água da torre de resfriamento, ou

seja, um desperdício de energia que se faz necessário nas condições atuais para minimizar a geração de vapor de baixa pressão.

Estima-se que para manter uma operação que garanta o aquecimento necessário do Produto A, atendendo os seus parâmetros de especificação, deve-se manter uma quantia mínima de 25t/h de VBP dedicada ao aquecimento deste produto. Com base nisso foi feito o levantamento da quantia que de VBP que excedeu esta quantia mínima e quantificado através de uma análise estatística cujos dados estão na ??.

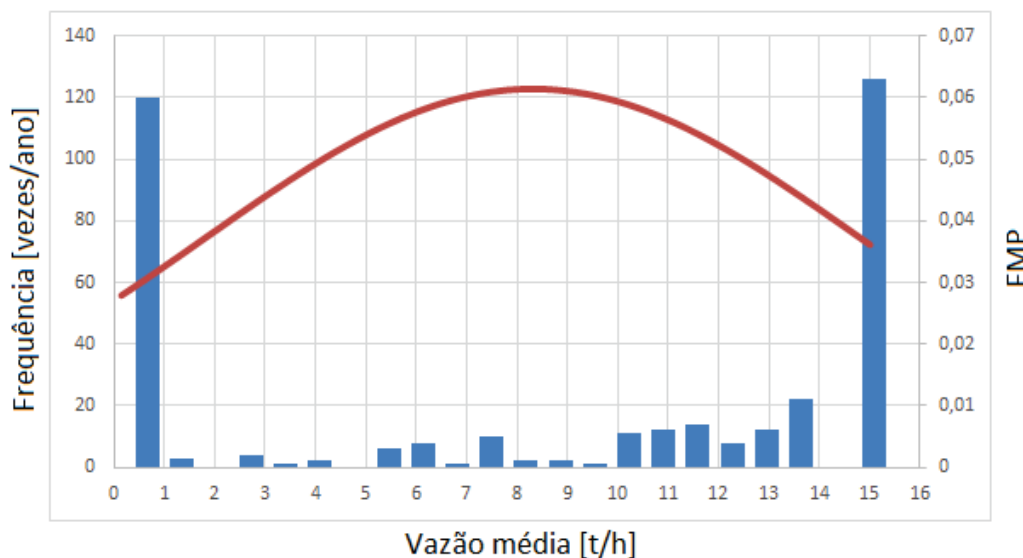
Tabela 5: Análise estatística da quantidade de VBP em toneladas por hora que excede a quantia mínima de 25t/h para aquecimento do produto A

Média [t/h]	Valor Mínimo [t/h]	Valor Máximo [t/h]	Desvio Padrão [t/h]	Número de Amostras	Classes
8,3123	0	15,0055	6,4960	365	22

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise estatística fornece os dados para a construção do histograma com curva de distribuição normal exposto na [Figura 19](#).

Figura 19: Histograma e curva de distribuição normal da vazão de VBP que excede a quantia mínima de 25t/h para aquecimento do produto A com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A [Figura 19](#) evidencia a ocorrência de uma frequência alta de valores próximos a zero, pois este sistema esteve fora de operação durante 70 dias e o suprimento de vapor

para ele esteve bloqueado durante este período. Por outro lado, quando o sistema estava normalmente em operação ocorreu um número ainda maior de valores no outro extremo do gráfico, no entorno de 15t/h. Isto posto, há uma vazão de 15t/h de VBP disponível para utilização em um sistema de geração de energia elétrica quando o sistema da [Figura 19](#) está em operação.

5 Hipóteses de Soluções do Problema

Após a descrição e análise do problema, são analisadas três possíveis alternativas para solucionar o problema a ser resolvido e verificadas a viabilidade cada uma das alternativas, sendo elas: Condensação do VBP para reaproveitamento da água; geração de energia elétrica com excedente de vapor de baixa pressão com modificações no Sistema para uma vazão fixa de 25t/h ou vazão modulada entre 4t/h e 25t/h; geração de energia elétrica com excedente de vapor de baixa pressão com modificações no Sistema para uma vazão fixa de 50t/h ou vazão modulada entre 8t/h e 50t/h; sendo as possibilidades de geração de energia analisadas com e sem o aproveitamento de parte do vapor de aquecimento do Produto A.

A instalação de algum equipamento deve considerar uma TMA que foi estipulada em 9,6% ao ano (valor praticado por empresas do ramo na atualidade) para efeitos de avaliar a viabilidade de implantação, ou seja, o sistema implantado deve proporcionar um retorno superior a essa taxa, com relação o valor investido para tal.

Visando modificar o sistema de forma a provocar a geração de uma quantidade maior de VBP, pode ser promovido a substituição de motores elétricos por turbinas, que podem ser elas do tipo que admitem VAP e liberam VBP no seu escape, ou então que admitem VMP e liberam VBP no escape, já que a empresa possui uma gama de turbinas das mais diversas vazões e isso possibilita uma variedade grande de combinações que possibilitam atender o valor necessário de VBP para complementar o montante existente em determinada situação. Isto posto, efetuou-se um levantamento da quantia de MWh por tonelada correspondente à substituição de diversos motores pela sua respectiva turbina reserva e se chegou num valor médio de 0,83MWh/t para turbinas de VAP e 0,027MWh/t para turbinas de VMP.

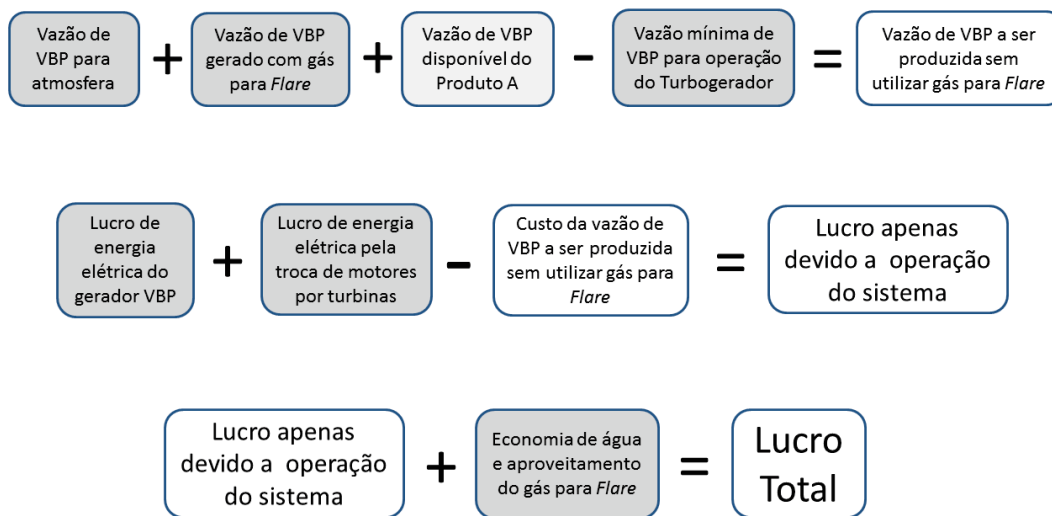
Para obter um valor médio de energia elétrica poupada por tonelada de vapor no caso de substituição de motores por turbinas, estudou-se diversas combinações de equipamentos, visando promover uma gama de possibilidades de vazões de vapor que pudessem ser requeridas para suprir a vazão nominal de VBP no caso da instalação de um turbogerador. Essas modificações foram concebidas para priorizar a substituição de motores cujas turbinas reserva correspondentes operassem com VAP, já que a redução de energia elétrica com o desligamento deste motores seria maior e com isso o lucro aumentaria em caso de substituição. Desta forma resulta o valor médio de 0,058MW poupado por tonelada de vapor, originado da substituição de motores por turbinas. Este é um dado facilitador nos cálculos do lucro do sistema, já que é possível calcular facilmente a quantia total de energia elétrica poupada, apenas multiplicando 0,058MW pela quantia

de vapor produzida pelas turbinas colocadas em operação no lugar de motores.

Se não fosse encontrado esse valor médio de energia elétrica poupada pela substituição de motores por turbinas, seria necessário analisar as condições operacionais de cada dia e avaliar as trocas de equipamentos e ganhos de energia elétrica individualmente, ou então simular alguns valores de trocas de equipamentos com diferentes vazões e aplicar uma média ponderada levando em consideração quantas vezes estes valores aparecem.

Para o cálculo de lucro no estudo a respeito da utilização do excedente de VBP para geração de energia elétrica, foi ministrado conforme o diagrama de blocos da Figura 20, que contém na primeira linha a maneira para verificar se existe a necessidade de geração de uma quantia maior de VPB com custo adicional (sem utilização de gás combustível que seria queimado no *Flare*), sendo que na segunda linha contém a metodologia para o lucro obtido apenas pela operação do equipamento e na terceira linha o que foi denominado como Lucro Total que leva em consideração o que deixou de ser desperdiçado.

Figura 20: Diagrama de blocos com representação da metodologia para cálculo do lucro do sistema de geração de energia elétrica com aproveitamento do VBP.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.1 Condensação do Vapor de Baixa Pressão para Economizar com Reaproveitamento da Água

A quantia de vapor liberada para a atmosfera não é constante, sofrendo variações decorrentes de oscilações no processo industrial. Desta forma se torna interessante efetuar uma análise estatística para quantificar os dados referentes à quantidade de vapor liberado na atmosfera, cujos dados estão contidos na Tabela 6.

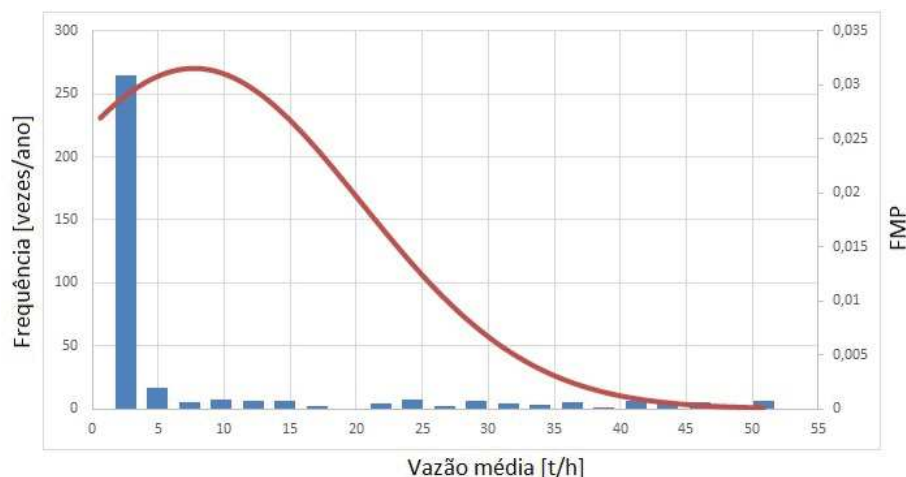
Tabela 6: Análise estatística da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano.

Média [t/h]	Valor Mínimo [t/h]	Valor Máximo [t/h]	Desvio Padrão [t/h]	Número de Amostras	Classes
7,7025	0	50,8465	12,6536	365	21

Fonte: Elaborado pelo autor.

Através desta análise estatística é ilustrado na [Figura 21](#), através de um histograma com curva de distribuição normal, a quantidade de vapor liberado para a atmosfera e a frequência com que ocorrem estes valores durante um ano.

Figura 21: Histograma com distribuição normal da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como se pode ver na [Figura 21](#), a grande maioria dos valores giram em torno de 2,5t/h, esse valor aparece 265 vezes num total de 365 amostras, e isso faz com que para instalar algum sistema que atenda uma vazão nominal próximo deste valor, porém não se pode deixar de lado a quantia de gás combustível que foi queimado no *Flare*, já que este poderia ter sido utilizado para gerar vapor. Levando isso em consideração, efetuou-se uma análise estatística com relação a quantidade de gás queimado no *Flare*, originando a [Tabela 7](#).

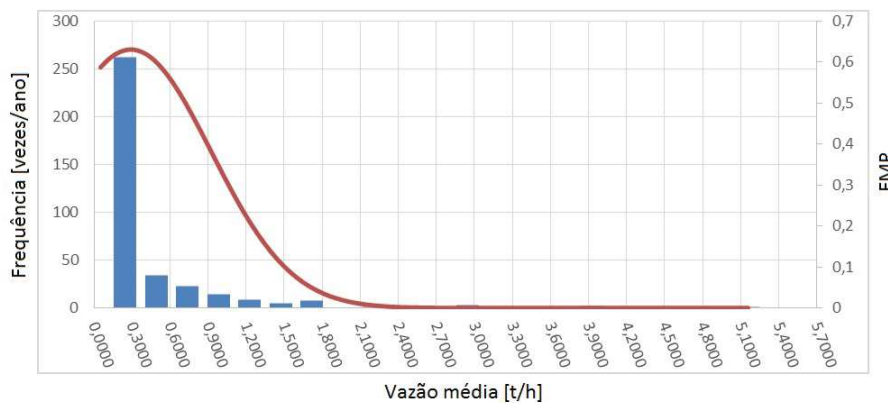
Com a análise estatística da quantidade de gás combustível queimada no *Flare* e a frequência que estes valores ocorrem durante o ano, surge a [Figura 22](#), assim como foi feito com a de vapor.

Tabela 7: Análise estatística da vazão de gás combustível queimado no *Flare* durante um ano.

Média [t/h]	Valor Mínimo [t/h]	Valor Máximo [t/h]	Desvio Padrão [t/h]	Número de Amostras	Classes
0,29088	0	5,15806	0,63234	365	21

Fonte: Elaborado pelo autor.

Figura 22: Histograma com distribuição normal da vazão de gás combustível queimado no flare durante um ano com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Na [Figura 22](#) é possível verificar que a vazão que predomina ocorre próximo à 0,245t/h, com maior precisão, surgindo 262 vezes em 365 amostras. Essa quantia pode gerar em torno de 4,57t/h de vapor.

Levando em consideração a utilização do gás combustível e somando a quantia que ele geraria de vapor à quantia de vapor que geralmente é lançada para a atmosfera, chega-se à conclusão de que para a instalação de um sistema que operasse com a maior frequência possível, seria um que utilizasse a vazão nominal de 7t/h de vapor de baixa pressão.

Para esta vazão de vapor de baixa pressão, que é uma vazão considerada baixa devido a pequena entalpia contida, pode ser instalado um sistema apenas para condensação do vapor e reaproveitamento da água, haja vista que com isso a empresa seria capaz de reaproveitar 61.320 toneladas de água, gerando uma economia de R\$214.620,00/ano (custo do tratamento da água é calculado em reais), levando em conta o custo médio de R\$3,5/t, além do benefício que a economia de água traria ao meio ambiente.

Fazendo uma análise mais superficial da implementação de um sistema como esse,

já que esse não é o foco deste estudo, o sistema deve ter o custo de instalação inferior a R\$2.235.625,00, levando em consideração a taxa de retorno de investimento de 9,6% ao ano tomada como base neste estudo.

5.2 Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão Fixa de 25t/h de Vapor de Baixa Pressão

O vapor excedente liberado na atmosfera pode ser utilizado para a geração de energia elétrica, através da instalação de uma turbina a vapor acoplada a um gerador de energia elétrica, sendo o escape da turbina com sistema de condensação total, diminuindo a quantidade de água desmineralizada tratada na Estação de Tratamento de Água com este reaproveitamento, além do ganho em energia elétrica que podemos ter com a retirada de operação de um motor elétrico em função da colocação de alguma turbina para suprir a vazão mínima de vapor adotada para o equipamento a ser instalado.

Geralmente as turbinas com vazão nominal de vapor fixa tem um menor custo de instalação, haja vista que o sistema de admissão de vapor é mais simples. Para a instalação de um turbogerador com a vazão nominal fixa de 25t/h, se faz necessário a modificação do processo, que pode ser feita através do aproveitamento de parte do vapor utilizado no aquecimento do Produto A ou então através da substituição de motores elétricos por suas respectivas turbinas reserva, complementando a vazão de vapor de forma que tenhamos 25t/h. Com essa possibilidade de ser substituído a operação de motores por turbinas, é possível ter uma vazão de vapor mais estável em torno das 25t/h, e a [Tabela 8](#) expõe os dados referentes à análise estatística empírica com esta nova condição.

Tabela 8: Análise estatística empírica da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente de 25t/h.

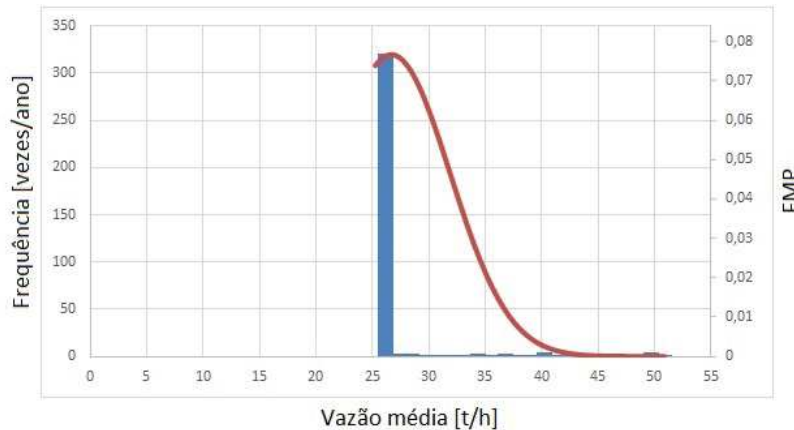
Média [t/h]	Valor Mínimo [t/h]	Valor Máximo [t/h]	Desvio Padrão [t/h]	Número de Amostras	Classes
26,6790	25	50,8465	5,2022	365	22

Fonte: Elaborado pelo autor.

Na [Figura 23](#) está o histograma com a curva de distribuição normal a partir da análise estatística empírica que expõe os valores referentes à condição do processo industrial mediante à modificação no sistema.

Com a modificação no sistema ocorreu o surgimento da vazão em torno de 25t/h em 320 amostras no total de 365, sendo que nas demais amostras esse valor nunca é menor, o que nos leva a uma confiabilidade de que o sistema, se for implementado, terá suprimento de vapor suficiente para operar ininterruptamente, conforme as amostras adquiridas em um ano.

Figura 23: Histograma com distribuição normal da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente de 25t/h com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.2.1 Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão Fixa de 25t/h de Vapor de Baixa Pressão sem Utilização de Parte do Vapor de Aquecimento do Produto A

A avaliação dos ganhos financeiros da implementação do projeto foi feita mediante a substituição de motores elétricos por turbinas, cuja a troca atende a relação média de economia de 0,058MWh/t. Essa alteração faz com que sejam geradas as 25t/h que são necessárias, ou seja, é possível atingir o vazão de vapor necessária devida à grande variedade de turbinas com diferentes vazões de operação, podendo efetuar o ajuste minucioso e estável através das válvulas redutores de pressão, que reduzem a pressão de VMP para VBP, que são as válvulas “B” na [Figura 13](#).

Analisando todos os dados referentes à vazão de vapor emitido para a atmosfera, aproveitamento do gás combustível queimado no *Flare* e fazendo as substituições de motores elétricos por turbina quando necessário (em alguns momentos do ano a vazão de vapor para a atmosfera supera as 25t/h sem que necessite a substituição de motor elétrico por turbina), obtem-se um ganho financeiro de R\$2.713.309,60/ano, que apenas contabiliza os ganhos obtidos com a operação do equipamento, já que ao contabilizar

como lucro a quantidade de vapor e o gás combustível que deixaram de ser desperdiçados, temos um lucro total de R\$6.978.749,50/ano.

5.2.2 Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão Fixa de 25t/h de Vapor de Baixa Pressão com Utilização de Parte do Vapor de Aquecimento do Produto A

Com a utilização da parcela de VBP que excede as 25t/h mínimas necessárias para o sistema de aquecimento do Produto A, não irá mudar a curva da [Figura 23](#), pois a diferença neste caso é que a quantidade de vapor que seria fornecida com a colocação de turbinas em operação será suprida com este excedente.

Ao desviar essa parcela de vapor do aquecimento do Produto A para aproveitamento no turbogerador em avaliação, ocorre um ganho financeiro significativo, haja vista que é necessário gerar menos VBP para suprir a vazão nominal de 25t/h exigida pelo turbogerador, ou seja, na maioria das vezes será necessário prover apenas 8t/h de VBP, já que o sistema de aquecimento do produto “A” teria em torno de 15t/h excedentes quando está em operação conforme [Figura 19](#), somadas às 2,5t/h de vapor expelido para a atmosfera conforme [Figura 21](#).

Mediante esta análise empírica obtém-se um ganho financeiro de R\$3.679,725,07/ano, que apenas contabiliza os ganhos financeiros obtidos com a operação do equipamento e o lucro total de R\$7.947.328,91/ano quando contabilizamos o vapor e o gás combustível que deixaram de ser desperdiçados. Isso demonstra um aumento do lucro total em 13,88% ao ano, se for comparado com o ganho obtido na análise da [subseção 5.2.1](#). Não obstante, há outro ganho já mencionado na [seção 4.4](#), que se trata da energia térmica poupada pela torre de água de resfriamento para resfriar o Produto B. Isso implica uma diminuição da quantidade de água necessária para reposição do nível da torre, já que grande parte do resfriamento desta água é proveniente da sua vaporização, além de disponibilizar a torre para utilização em outros equipamentos, como por exemplo o condensador de vapor do turbogerador cuja a instalação está sendo avaliada.

5.3 Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão de Vapor de Baixa Pressão entre 4t/h e 25t/h

A instalação de um turbogerador com a vazão de entrada variável é uma alternativa interessante, já que o vapor oriundo do processo industrial não possui uma vazão estável.

Isso faz com que o equipamento opere sem necessitar constantemente da manipulações do sistema para manter o valor de vazão desejada. Neste sentido, foi encontrado no mercado o turbogerador Siemens, sendo a turbina do modelo SST-300 e gerador síncrono com excitatriz Brushless, cujas características constam na [Tabela 9](#).

Tabela 9: Especificações técnicas do turbogerador Siemens SST-300.

Vazão Mínima de Admissão	4t/h
Vazão Máxima de Admissão	25t/h
Pressão de Admissão	3,5kgf/cm ²
Pressão de Exaustão	0,1kgf/cm ²
Capacidade de Geração	7MVA/60Hz/13,8kV
Custo Total do Conjunto	R\$11,5 milhões

Fonte: Elaborado pelo autor.

Este equipamento possui a vazão de entrada de vapor que pode variar entre 4t/h e 25t/h, sendo que a vazão mínima está relacionada à quantidade mínima de vapor necessária para garantir o resfriamento no escape da turbina e o custo do equipamento engloba todos os equipamentos auxiliares envolvidos. No entanto, utiliza-se o fator multiplicador de *Hand* correspondente à “Bombas e Motores” igual a 4, onde é obtido o custo total de R\$46 milhões para o equipamento já instalado, uma vez que o custo contido na [Tabela 9](#) não contempla a instalação do equipamento.

A possibilidade de modular a vazão de entrada de vapor, acaba implicando na modulação da energia elétrica disponível no gerador, que ocorre praticamente de forma linear, conforme mostrado nos dados da [Tabela 10](#) fornecida pelo fabricante do equipamento.

Tabela 10: Energia elétrica gerada pelo gerador conforme a vazão de admissão.

		100%	75%	50%	15%
Admissão de Vapor	Vazão de Vapor [t/h]	25	18,75	12	3,75
Bornes do Gerador	Potência Elétrica [MW]	2,7	2,1	1,4	0,3

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.1 Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão de Vapor de Baixa Pressão entre 4t/h e 25t/h sem a Utilização de Parte do Vapor de Aquecimento do Produto A

Com base nos parâmetros técnicos contidos na [Tabela 9](#), foram feitas alterações no processo industrial, através da troca de motores pelas respectivas turbinas reserva, para que fosse obtido a vazão mínima necessária para a operação do equipamento citado na [Tabela 9](#). Isto posto, foi feita uma análise estatística empírica de operação do sistema, cujos dados estão contidos na [Tabela 11](#).

Tabela 11: Análise estatística empírica da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente acima de 4t/h sem a utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A.

Média [t/h]	Valor Mínimo [t/h]	Valor Máximo [t/h]	Desvio Padrão [t/h]	Número de Amostras	Classes
9,6360	4	50,8465	11,9995	365	22

Fonte: Elaborado pelo autor.

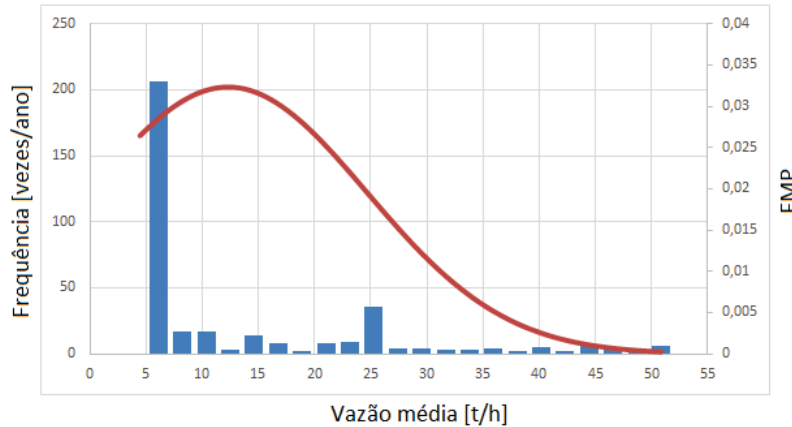
Mediante a análise estatística empírica foi originada a [Figura 24](#) que contém o histograma e curva de distribuição normal com os dados obtidos mediante este estudo, onde é possível verificar que a maior frequência de valores de vazão ocorre em torno de 5t/h (281 vezes para ser exato), porém existem valores em pequenas quantidades até 25t/h que podem ser utilizados para a geração de energia, ou seja, de 4t/h até 25t/h temos 320 amostras do total de 365, que se trata da mesma quantidade encontrada na análise feita na [seção 5.2](#).

A grande vantagem de um equipamento como este que permite uma alteração na vazão de entrada, é que para colocá-lo em operação não é necessário produzir muito vapor além do que já é produzido pelo sistema, além de ser possível aproveitar o excedente de vapor produzido de forma indesejada entre 4t/h e 25t/h.

A partir da análise feita com o turbogerador operando com vazão de entrada entre 4t/h e 25t/h, obtemos um lucro de R\$2.971.11,42/ano, que apenas contabiliza os ganhos financeiros obtidos com a operação do sistema e o lucro total de R\$7.236.551,32/ano quando se contabiliza o vapor e o gás combustível que deixaram de ser desperdiçados, o que implica em um aumento de 3,69% em relação a operar com um equipamento de vazão de entrada fixa em 25t/h como consta na análise da [subseção 5.2.1](#).

Mediante o retorno financeiro obtido com a implementação deste projeto, foi ob-

Figura 24: Histograma com distribuição normal da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente acima de 4t/h sem a utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).



Fonte: Elaborado pelo autor.

tido uma taxa de retorno de investimento de 15,73%/ano, evidenciando a viabilidade da implementação se comparada à taxa de 9,6% adotada no estudo e com base na Equação (20), após aproximadamente 13,1 anos será recuperado totalmente o valor investido, supondo que o equipamento fique disponível para operar 1 ano após a compra.

5.3.2 Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão de Vapor de Baixa Pressão entre 4t/h e 25t/h com a Utilização de Parte do Vapor de Aquecimento do Produto A

Utilizando para gerar energia elétrica parte do vapor que antes era destinado para aquecimento do Produto A, obtém-se novos dados referentes à análise estatística que constam na Tabela 12.

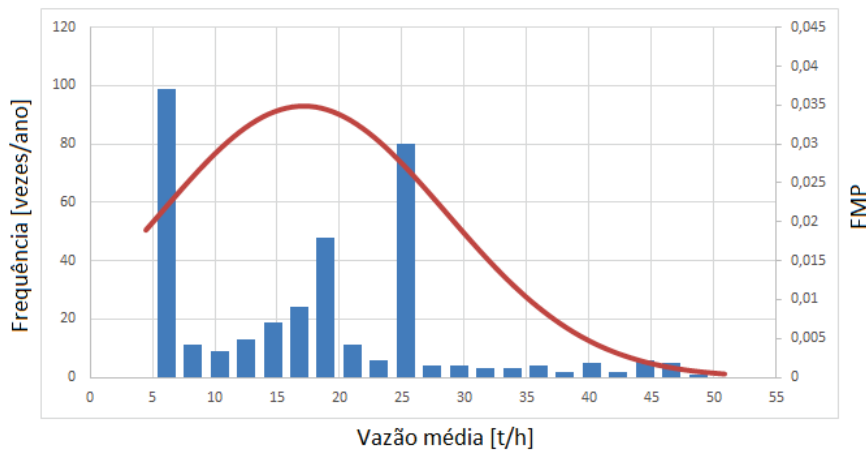
Tabela 12: Análise estatística empírica da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente acima de 4t/h com a utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A.

Média [t/h]	Valor Mínimo [t/h]	Valor Máximo [t/h]	Desvio Padrão [t/h]	Número de Amostras	Classes
16,9014	4	50,8465	11,5839	365	22

Fonte: Elaborado pelo autor.

A vazão de vapor desviada do aquecimento do Produto A reduz a quantia de vapor que seria necessária produzir para atingir a vazão mínima de vapor de operação da turbina cujos dados estão na [Tabela 9](#), além de aumentar a frequência de valores de vazão de vapor acima de 4t/h como pode ser visto no histograma com curva de distribuição normal da [Figura 25](#).

Figura 25: Histograma com distribuição normal da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente acima de 4t/h com a utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A [Figura 25](#) mostra uma melhor distribuição de valores de vazão se comparado com a [Figura 24](#), onde as três maiores frequências de valores ocorrem de forma decrescente em termos da frequência em torno de 5t/h (99 vezes), 25t/h (80 vezes) e 19t/h (48 vezes).

Como o vapor que é desviado do aquecimento do Produto A só é utilizado para complementar a quantia de vapor que seria liberado na atmosfera, a quantia total de valores que podem ser utilizados para a geração de energia elétrica segue a mesma, 320 valores, no entanto como ocorre um aumento na frequência de vazões de acima de 4t/h, ocorre também um aumento na geração de energia elétrica e por conseguinte um aumento no lucro obtido. Isto posto, verifica-se que o lucro obtido é de R\$4.210.703,94/ano, contabilizando apenas os ganhos financeiros obtidos com a operação do equipamento e o lucro total de R\$8.478.307,78/ano quando se contabiliza o vapor e o gás combustível que deixaram de ser desperdiçados, ou seja, é 6,68% superior a análise feita no [subseção 5.2.2](#) referente a utilização de um equipamento de vazão fixa de vapor em 25t/h que também utilizava parte do vapor de aquecimento do Produto A e 17,15% superior a que foi feita na [subseção 5.3.1](#).

Ao comparar com o custo de instalação do turbogerador, resulta em uma taxa de retorno de investimento de 18,43%/ano e com base na Equação (20), após aproximada-

mente 10,3 anos recupera-se totalmente o valor investido, supondo que o equipamento fique disponível para operar 1 ano após a compra. Não obstante, tem-se outro ganho já mencionado na [seção 4.4](#) que se trata da energia térmica poupada pela torre de água de resfriamento para resfriar o Produto B.

5.4 Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão Fixa de 50t/h

Na mesma linha de raciocínio da [seção 5.2](#), existe a possibilidade de alterar o modo de operação dos equipamentos para que haja um excedente fixo de 50t/h de vapor de baixa pressão. Isso é possível com a substituição de motores cujas turbinas reservas operam com admissão de VAP, o que é benéfico, já que foi visto anteriormente que a relação de energia elétrica por tonelada de vapor é maior.

Com a modificação no sistema obtém-se os dados da [Tabela 13](#) referentes à análise estatística empírica dessa nova condição operacional.

Tabela 13: Análise estatística empírica da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente de 50t/h.

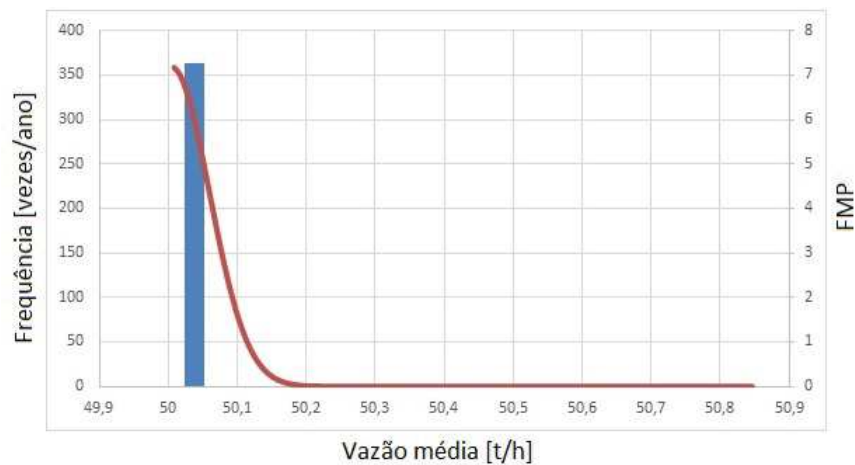
Média [t/h]	Valor		Desvio Padrão [t/h]	Número de Amostras	Número de Classes
	Mínimo [t/h]	Máximo [t/h]			
50,0040	50	50,8465	0,0554	365	22

Fonte: Elaborado pelo autor.

Mediante aos dados da [Tabela 13](#) e com base nos dados levantados no período de 1 ano, constrói-se o histograma com curva de distribuição normal da [Figura 26](#), onde pode se verificado que os valores de vazão ocorrem praticamente 100% em torno de 50t/h, já que o intervalo entre os valores de máximo e mínimo de vapor é diminuto, ou seja, os valores de VBP ficam praticamente na totalidade no valor ideal de operação do equipamento a ser instalado. Isso remete a uma operação ideal, onde praticamente não teria desperdício de vapor de baixa pressão para a atmosfera.

Para o estudo de implementação de um equipamento utilizando o excedente fixo de 50t/h, foram feitas as modificações no sistema para obter o excedente de vapor de baixa pressão necessário para a operação de um turbogerador com essa vazão nominal de entrada. Com isso, a energia elétrica gerada será de 5,5MW e além disso terá o surgimento

Figura 26: Histograma com distribuição normal da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente de 50t/h com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).



Fonte: Elaborado pelo autor.

da energia poupada devido a retirada dos motores caso seja necessário para suprir a vazão nominal de VBP para a sua operação.

5.4.1 Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão Fixa de 50t/h sem Utilização de Parte do Vapor de Aquecimento do Produto A

Para a operação considerando apenas a troca de equipamentos é possível gerar com facilidade um excedente de 48t/h, que juntamente com a média 2,5t/h de vapor expelido na atmosfera mostrado na [Figura 15](#), totalizam o mínimo de 50t/h necessárias para colocar o turbogerador com 100% de probabilidade de ocorrência como mostra a [Figura 26](#). Lembrando que uma pequena diferença do valor necessário para a máquina operar pode ser suprida com válvulas redutoras de VMP para VBP, caso tenha um déficit, ou então válvulas de alívio pra atmosfera caso tenha um excedente.

Fazendo todo o balanço durante o intervalo de 1 ano, com as alterações necessárias para gerar o excedente de 50t/h de vapor de baixa pressão e avaliando os seus devidos ganhos financeiros baseados nos dados amostrados, tem-se um lucro de R\$3.581.953,99/ano, contabilizando apenas os ganhos financeiros obtidos com a operação do equipamento e ao contabilizar a quantidade de vapor e o gás combustível que deixaram de ser desperdiçados como lucro, temos um lucro total de R\$9.229.819,58/ano.

5.4.2 Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão Fixa de 50t/h com Utilização de Parte do Vapor de Aquecimento do Produto A

Seguindo a mesma linha de raciocínio feito na [subseção 5.2.2](#) verifica-se que utilizando o vapor descrito na [Figura 19](#) não ocorrerá modificação na [Figura 26](#), uma vez que a parcela do VBP desviado do aquecimento do Produto A servirá na grande maioria das vezes como complemento da quantia que resta para obter a vazão nominal de 50t/h exigida pelo turbogerador que está em avaliação, ou seja, quando a quantia de VBP somada com a quantia de VBP desviado do aquecimento do Produto A for superior a 50t/h temos o recurso de desviar uma parcela menor ou até mesmo não desviar nada do vapor de aquecimento do Produto A.

Como a utilização do vapor desviado do aquecimento do Produto A, o ganho financeiro para o turbogerador de 50t/h de vazão nominal atingiu o valor de R\$4.564.422,63/ano, que apenas contabiliza os ganhos obtidos com a operação do equipamento e o lucro total de R\$10.210.001,50/ano quando se contabiliza o vapor e o gás combustível que deixaram de ser desperdiçados, ou seja, um aumento de 10,62% referente ao ganho obtido sem a utilização do vapor desviado do aquecimento do Produto A.

5.5 Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão de Vapor de Baixa Pressão entre 8t/h e 50t/h

Assim como foi apresentado na [seção 5.3](#), estuda-se a implantação de um turbogerador com vazão de entrada de vapor variável que atenda vazões de maior magnitude e para isso foi encontrado no mercado o turbogerador Siemens, sendo a turbina do modelo SST-600 e gerador síncrono com excitatriz Brushless, com as principais características ilustradas na [Tabela 14](#).

Assim como no equipamento orçado na [seção 5.3](#), neste da [Tabela 14](#) não contempla o seu custo de instalação e portanto, utilizando o fator multiplicador de *Hand* correspondente à “Bombas e Motores” igual a 4, chega-se ao custo de R\$50 milhões, que seria o custo da compra do equipamento somado com a instalação.

O equipamento citado na [Tabela 14](#) possui a vazão mínima de 8t/h que se trata de vazão mínima necessária para refrigeração do escape da turbina e a modulação da entrada de vapor da turbina acarreta na modulação da carga energia elétrica gerada no gerador conforme a [Tabela 15](#) fornecida pelo fabricante.

Tabela 14: Especificações técnicas do turbogerador Siemens SST-600.

Vazão Mínima de Admissão	8t/h
Vazão Máxima de Admissão	50t/h
Pressão de Admissão	3,5kgf/cm ²
Pressão de Exaustão	0,1kgf/cm ²
Capacidade de Geração	7MVA/60Hz/13,8kV
Custo de Todo o Conjunto	R\$12,5 milhões

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 15: Energia elétrica gerada pelo gerador conforme a vazão de admissão.

		100%	75%	50%	15%
Admissão de Vapor	Vazão de Vapor [t/h]	50	37,5	25	7,5
Bornes do Gerador	Potência Elétrica [MW]	5,5	4,2	2,8	0,6

Fonte: Elaborado pelo autor.

5.5.1 Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão de Vapor de Baixa Pressão entre 8t/h e 50t/h sem Utilização de Parte do Vapor de Aquecimento do Produto A

Procedendo da mesma forma que nos casos anteriores, foram feitas as devidas trocas de motores por turbinas, quando necessário, para suprir a vazão mínima de 8t/h de entrada de VBP, conforme informado na [Tabela 15](#), e a partir disso foi efetuada a análise estatística empírica da operação do sistema nessa nova condição, originando os dados da [Tabela 16](#).

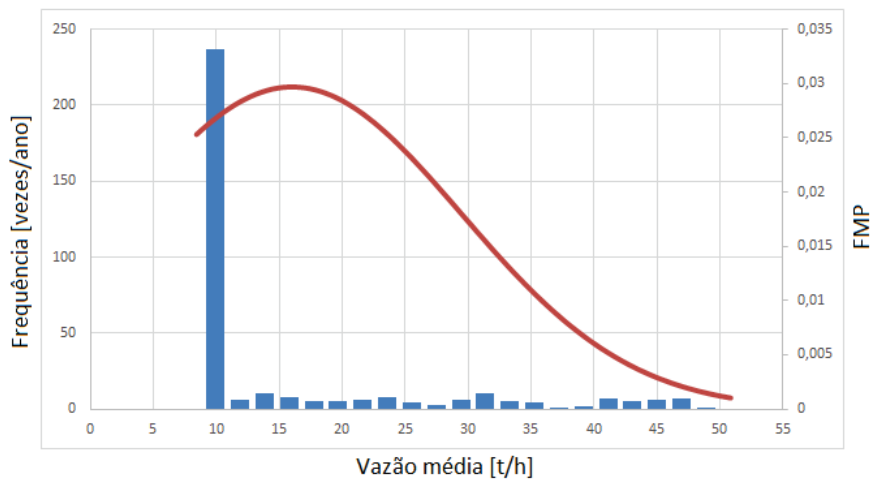
Tabela 16: Análise estatística empírica da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente acima de 8t/h sem utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A.

Média [t/h]	Valor Mínimo [t/h]	Valor Máximo [t/h]	Desvio Padrão [t/h]	Número de Amostras	Classes
13,2999	8	50,8465	11,6221	365	22

Fonte: Elaborado pelo autor.

A análise feita originou a [Figura 27](#) que é o histograma com curva de distribuição normal referente a esta nova condição operacional, onde é possível verificar que a maior frequência de valores gira em torno da vazão mínima de vapor em torno de 10t/h (289 vezes), mas a turbina tem a capacidade de operar em 100% das vazões que aparecem na [Figura 27](#), já que a sua vazão máxima é 50t/h.

Figura 27: Histograma com distribuição normal da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente acima de 8t/h sem utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A possibilidade de modular a vazão de entrada faz com que seja necessário gerar pouco vapor para atingir a vazão mínima de operação da turbina e que ela possa operar com qualquer vazão que venha a surgir de forma indesejada, haja vista que o limite máximo de vazão de vapor que surgiu em 1 ano de análise é também o limite máximo de vazão da turbina.

Com a análise financeira se atinge um lucro de R\$3.890.393,93/ano apenas com os ganhos obtidos pela operação do equipamento e um lucro total de R\$9.536.513,23/ano quando são somados o que foi deixado de ser desperdiçado, que se trata de uma taxa de recuperação do investimento aplicado de 19,07%/ano. Com base na Equação (20), após aproximadamente 9,8 anos ocorre a recuperado totalmente o valor investido, supondo que o equipamento fique disponível para operar 1 ano após a compra.

5.5.2 Geração de Energia Elétrica com Excedente de Vapor de Baixa Pressão com Modificações no Sistema para Vazão de Vapor de Baixa Pressão entre 8t/h e 50t/h com Utilização de Parte do Vapor de Aquecimento do Produto A

Com a utilização de parcela de VBP excedente do aquecimento do Produto A, temos o benefício de necessitar poucas vezes de gerar a quantia mínima de vapor para a operação do turbogerador. Com isso, efetuou-se uma nova análise estatística empírica, cujos dados estão ilustrados na [Tabela 17](#).

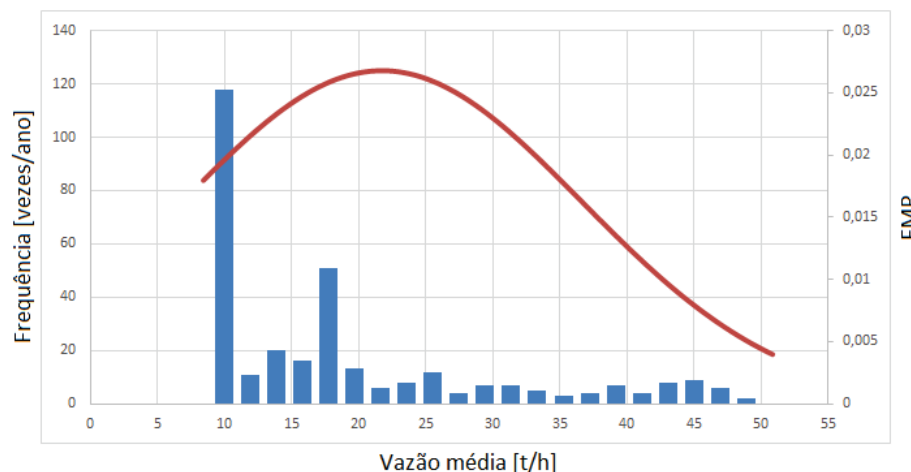
Tabela 17: Análise estatística empírica da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente acima de 8t/h com utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A.

Média [t/h]	Valor Mínimo [t/h]	Valor Máximo [t/h]	Desvio Padrão [t/h]	Número de Amostras	Classes
21,2206	8	50,8465	15,0453	365	22

Fonte: Elaborado pelo autor.

Mediante os dados da [Tabela 17](#) e a análise do período de 1 ano, constrói-se a [Figura 28](#) que se trata do histograma com curva de distribuição normal do período analisado.

Figura 28: Histograma com distribuição normal da vazão de vapor de baixa pressão liberado para a atmosfera durante um ano com alteração no processo para excedente acima de 8t/h com utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A com a frequência que ocorre determinado valor, Vazão em toneladas por hora e função massa de probabilidade (FMP).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Verifica-se que na [Figura 28](#) ocorre o surgimento de outros valores acima de 10t/h que é resultado da utilização do vapor de aquecimento do Produto A, que pode ser utilizado para gerar energia elétrica sem que tenha um custo adicional. Com estas considerações, chega-se a um lucro de R\$5.673.490,97/ano referente apenas à operação do equipamento a ser instalado e um lucro total de R\$11.319.069,83/ano se for somado a quantia de vapor de deixou de ser desperdiçada. Assim sendo, ao analisar o lucro referente ao valor investido para a instalação do turbogerador, tem-se uma taxa de retorno de investimento de 22,64%/ano. Com base na Equação (20), após aproximadamente 7,8 anos ocorre a recuperação total do valor investido, supondo que o equipamento fique disponível para operar 1 ano após a compra.

6 Conclusões

Em uma empresa do ramo petroquímico tudo “parece” estar interligado, já que pequenas mudanças no processo industrial podem ter grandes impactos, tanto positivos quanto negativos, no sistema como um todo e como os processos industriais envolvem grandes quantias financeiras, verifica-se ao longo do estudo efetuado que algumas alterações podem ter um reflexo de milhões de reais.

Mediante os resultados das análises feitas com as hipóteses adotadas, fica evidenciado que em todas elas a lucratividade foi maior quando utilizado a parcela de vapor que pode ser retirada do aquecimento do Produto A e poderia ser ainda maior se esse sistema não estivesse ficado 70 dias fora de operação. Isso é bastante compreensível, já que este vapor seria destinado à geração de energia elétrica sem nenhum custo adicional, além de trazer o benefício de diminuir a carga térmica da torre de resfriamento.

Outro fato interessante é que a lucratividade foi maior nos casos onde utiliza-se um equipamento com vazão variável de entrada de vapor, quando comparado com seus respectivos estudos com a vazão fixa de entrada de vapor. Neste caso, é possível ter o aproveitamento do vapor gerado em excesso a partir de vazões mais baixas, sem haver a necessidade de gerar grandes quantias para atingir a vazão nominal de vapor necessário para a operação contínua de um turbogerador. Além da vantagem financeira, também existe a vantagem operacional deste equipamento, que está relacionada à capacidade de absorver uma faixa de variação de vazão de vapor considerada grande se comparada com a vazão total de vapor produzida pela empresa. Este benefício é útil, já que a vazão de vapor de baixa pressão produzida sofre oscilações no decorrer do tempo.

Além dos aspectos relacionados à parte financeira, existem os da parte ecológica que não ser deixada de lado, já que a implantação do sistema para aproveitamento do excedente de VBP traria uma grande economia de água, recurso extremamente valioso hoje em dia, e o aproveitamento de grande parte do gás que é queimado no *Flare*.

Para determinar a hipótese mais rentável, foram analisadas apenas as hipóteses com vazão variável de vapor de admissão, já que nas hipóteses com vazão de vapor fixa não há o custo de instalação de um equipamento e isso seria fundamental para este tipo de conclusão. Não obstante, a hipótese que se mostrou mais lucrativa foi a da [subseção 5.5.2](#), com vazão de admissão entre 8t/h e 50t/h e utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A. Neste caso, o equipamento apresentou uma taxa de retorno de investimento de 22,64% e um retorno total do valor investido após aproximadamente 7,8 anos, superando em 33,51% a hipótese da [subseção 5.3.2](#) que operava com utilização de parte do vapor de aquecimento do Produto A, porém entre 4t/h e 25t/h. Isso pode ser atribuído a uma

pequena diferença entre o custo total deste equipamento e do que possui vazão variável entre 4t/h e 25t/h, se for considerado que este segundo tem a metade da capacidade de geração de energia elétrica.

Outro aspecto importante que a instalação de um turbogerador para aproveitamento do VBP pode trazer, é a melhoria com relação à utilização do mínimo de vapor necessário para aquecimento do Produto A, que proporciona a diminuição da carga térmica de uma das torres de água de resfriamento. Além do aumento de confiabilidade na operação das plantas petroquímicas, devido a possibilidade de trabalhar com turbinas em detrimento de motores elétricos, sendo que a priorização da confiabilidade em relação aos lucros é algo que depende da política de trabalho adotada pela gerência da empresa.

Referências

- ANEEL, A. N. de E. E. *Energia no Brasil e no Mundo*. 2017. http://www2.aneel.gov.br/arquivos/pdf/atlas_par1_cap2.pdf. Acesso em: 21 jun. 2017. Citado na página 28.
- BERNARDO, L. D.; DANTAS, Â. D. B. Metodos e tecnicas de tratamento de agua. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, SciELO Brasil, v. 11, n. 2, p. 107–107, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 32 e 33.
- BERTOLO, L. A. *Distribuições de Probabilidade*. 2008. <http://www.bertolo.pro.br/FinEst/Estatistica/DistribuicaoContinua.pdf>. Acesso em: 13 jun. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 46.
- BITTENCOURT, H. R.; VIALI, L. Contribuições para o ensino da distribuição normal ou curva de gauss em cursos de graduação. *III Simpósio Internacional de Pesquisa em Educação Matemática*, 2006. Citado 2 vezes nas páginas 45 e 46.
- BIZZO, W. 722–geração, distribuição e utilização de vapor. *Notas de Aula: Capítulo 2-Combustíveis*, 2012. Citado 2 vezes nas páginas 36 e 37.
- CHAPMAN, S. J. *Fundamentos de máquinas elétricas*. [S.l.]: AMGH Editora, 2013. Citado 3 vezes nas páginas 38, 39 e 43.
- COMUSA. *Tratamento de Água*. 2017. <http://www.comusa.rs.gov.br/index.php/saneamento/tratamentoagua>. Acesso em: 14 jun. 2017. Citado na página 32.
- DEVORE, J. L.; SILVA, J. P. N. da. *Probabilidade e estatística: para engenharia e ciências*. [S.l.]: Pioneira Thomson Learning, 2006. Citado na página 46.
- FARIAS, L. M.; SELKITTO, M. A. Uso da energia ao longo da história: evolução e perspectivas futuras. *Revista Liberato*, v. 12, n. 17, p. 01–106, 2011. Citado na página 28.
- FILHO, N. C.; KOPITTKKE, B. H. *Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial*. 11th. ed. [S.l.]: São Paulo: Atlas S/A, 2010. ISBN 852241114X. Citado na página 48.
- FITZGERALD, A. *Electric machinery*. 6th. ed. United States of America: McGraw-Hill, 2003. (electrical engineering. Power and energy). ISBN 0-07-366009-4. Citado 6 vezes nas páginas 38, 39, 40, 41, 42 e 43.
- GOURISHANKAR, V. *Electromechanical energy conversion*. [S.l.]: International Textbook Co., 1965. Citado na página 39.
- HAAR, L. *NBS/NRC steam tables*. [S.l.]: CRC Press, 1984. Citado na página 38.
- IENO, G.; NEGRO, L. *Termodinâmica*. [S.l.]: Pearson Prentice, 2004. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

- LEOTTI, V. B.; COSTER, R.; RIBOLDI, J. Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. *Revista HCPA. Porto Alegre. Vol. 32, no. 2 (2012), p. 227-234*, 2012. Citado na página 45.
- MATTOS, A. D. *Fatores de Lang e Hand*. 2014. <http://blogs.pini.com.br/posts/Engenharia-custos/fatores-de-lang-e-hand-312934-1.aspx>. Acesso em: 04 jul. 2017. Citado 2 vezes nas páginas 47 e 48.
- MIERZWA, J. C.; HESPANHOL, I. *Água na indústria: uso racional e reuso*. [S.l.]: Oficina de Textos, 2005. Citado na página 27.
- OLIVEIRA, D. R. de. *Pré-tratamento do processo de osmose inversa utilizando microfiltração e investigação de técnicas de limpeza e recuperação de membranas*. Tese (Doutorado) — UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2007. Citado na página 35.
- PETROQUÍMICA, I. *onde o estudo foi feito*. 2017. Citado 5 vezes nas páginas 31, 32, 33, 34 e 35.
- REIS, C. G. *Análise dos processos de clarificação e filtração da água para consumo humano estações de tratamento de água do rio grande do sul*. 2016. Citado na página 32.