



**UNISUL**

**UNIVERSIDADE DO SUL DE SANTA CATARINA**

**GABRIEL MICHELS SCHMIDT**

**JONAS WANDERLIND BIANCO**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA COGERAÇÃO EM  
INDÚSTRIAS DA REGIÃO DA AMUREL**

Tubarão

2019

**GABRIEL MICHELS SCHMIDT**  
**JONAS WANDERLIND BIANCO**

**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA COGERAÇÃO EM  
INDÚSTRIAS DA REGIÃO DA AMUREL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina como requisito parcial à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Jorge Alberto Lewis Esswein Junior /Ms.

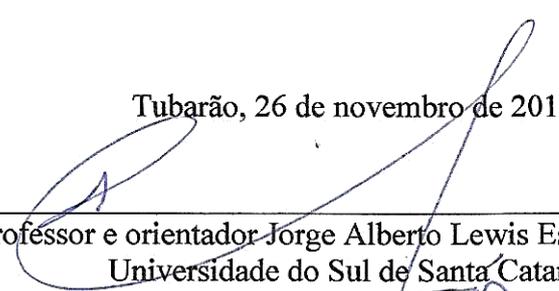
Tubarão  
2019

**GABRIEL MICHELS SCHMIDT**  
**JONAS WANDERLIND BIANCO**

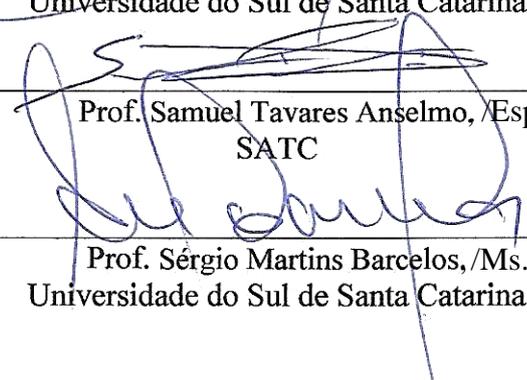
**ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA COGERAÇÃO EM  
INDÚSTRIAS DA REGIÃO DA AMUREL**

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado à obtenção do título de Engenheiro Eletricista e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica da Universidade do Sul de Santa Catarina.

Tubarão, 26 de novembro de 2019.

  
\_\_\_\_\_  
Professor e orientador Jorge Alberto Lewis Esswein Junior, /Ms.  
Universidade do Sul de Santa Catarina

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Samuel Tavares Anselmo, /Esp.  
SATC

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Sérgio Martins Barcelos, /Ms.  
Universidade do Sul de Santa Catarina

Dedicamos este trabalho a Deus, que em nenhum momento nos deixou fraquejar ou desistir desse trabalho, assim como as nossas famílias, que sempre contribuíram pela maior herança da nossa vida: os estudos. Aos amigos e colegas, pelo incentivo e pelo apoio constante.

## AGRADECIMENTOS

Agradecemos a todos os professores por nos proporcionarem o conhecimento não apenas racional, mas manifestando o caráter no processo de formação profissional, pelo quanto que se dedicaram a nós, não somente por terem nos ensinado, mas por terem feito aprender.

Nossos sinceros agradecimentos à instituição e em especial ao nosso orientador Prof. Jorge Alberto Lewis Esswein Junior por todo apoio e paciência dedicado desde o primeiro momento para o desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso.

Gabriel agradece:

Agradeço primeiramente a Deus por ter me colocado no ramo da Engenharia Elétrica e me dado forças para conseguir evoluir cada etapa sempre com o pensamento de que existe alguém melhor do que eu, mas também pior do que eu, além de que muitas pessoas queriam poder estar fazendo uma graduação, mas não possuem condições.

A toda a minha família, em especial minha mãe Miriam Oenning Michels e meu pai Januario Margoti Schmidt, que sempre estiveram ao meu lado durante esta jornada com grande empenho e companheirismo possibilitando a busca de conhecimento.

Também gostaria de agradecer a todos os meus colegas e amigos, tanto dentro quanto fora da universidade, por compreenderem os momentos de ausência da minha pessoa. Gratidão ao Jonas Wanderlind Bianco, por ter aceitado esse desafio, empenhando-se ao máximo para que este trabalho ficasse bem desenvolvido.

Jonas agradece:

Quero agradecer aos meus pais, Gilmar Nicoladelli Bianco e Nazarete Wanderlind Bianco, que apesar de todas as dificuldades, sempre me apoiaram a completar esta etapa da minha vida. A minha namorada Leandra Boing Boeger, que me apoiou muito e foi compreensiva com os momentos em que permaneci distante.

Aos meus amigos de trabalho e parceiros de pesquisa, por toda a ajuda e apoio durante este período tão importante da minha formação acadêmica. Em especial ao meu amigo e colega de TCC Gabriel Michels Schmidt, por todo empenho conjunto na elaboração deste trabalho. A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização da minha pesquisa.

“Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim” (NIKOLA TESLA).

## RESUMO

O consumo energético está em crescimento, e para suprir a essa demanda é necessário explorar fontes renováveis para geração de energia elétrica, buscando um desenvolvimento sustentável. Tendo em vista que a região da Amurel tem uma grande produção madeireira, possibilitando um alto potencial para a produção energética, a utilização de usinas de biomassa seria uma opção interessante, porém, este tipo de geração tem certas dificuldades. Os sistemas de cogeração se tornam mais atraentes, isso pelo fato de gerar a energia elétrica junto ao processo produtivo, aproveitando de um recurso já existente na indústria. Este tipo de geração pode se enquadrar em geração distribuída, permitindo ser conectada à rede da distribuidora desde que atenda as normas específicas e os padrões de conexão. Este sistema permite também que empresas consumidoras de energia elétrica tenham sua própria geração e diminuam os custos com esse insumo. O trabalho apresenta os tipos de empresas e suas disponibilidades para que possa ser implantado um sistema de cogeração junto ao seu processo. É apresentado dois casos com ramos produtivos diferentes, onde é analisada a viabilidade técnica para implantação do sistema, além de demonstrar se a cogeração aplicada a indústria é economicamente viável. Ambos os casos se enquadram em geração distribuída por se tratarem de uma fonte de energia renovável instalada junto a carga, sendo que em uma das empresas não foi possível encontrar um sistema que se enquadrasse com as disponibilidades do processo produtivo, já na outra, foi verificada a viabilidade técnica, possibilitando a elaboração de um projeto de cogeração para a indústria e permitindo realizar a análise econômica deste sistema.

Palavras-chave: Cogeração. Geração distribuída. Indústria.

## **ABSTRACT**

Energy consumption is growing and to meet this demand it is necessary to explore renewable sources for electricity generation, seeking sustainable development. Given that the Amurel region has a large timber production, allowing a high potential for energy production, the use of biomass plants would be an interesting option, but this type of generation has certain difficulties. Cogeneration systems become more attractive, because they generate electricity from the production process, taking advantage of an existing resource in the industry. This type of generation can fit into distributed generation, allowing it to be connected to the distributor's network as long as it meets specific norms and connection standards. This system also allows companies that consume electricity to have their own generation and reduce costs with this input. This paper presents the types of companies and their availability so that a cogeneration system can be implemented along with their process. Two cases are presented with different productive branches, where the technical feasibility for the system implantation will be analyzed, besides demonstrating if the cogeneration applied to the industry is economically viable. Both cases fall into distributed generation because they are a renewable energy source installed near the load, and in one company it was not possible to find a system that met the availability of the production process, while in the other, it was verified. the technical feasibility, enabling the elaboration of a cogeneration project for the industry and allowing the economic analysis of this system.

**Keywords:** Cogeneration. Distributed generation. Industry.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Conceito de cogeração .....	20
Figura 2 – Opção de sistemas de cogeração .....	21
Figura 3 – Esquema básico de um ciclo de Rankine .....	26
Figura 4 – Diagrama de temperatura por entropia para um ciclo Rankine convencional .....	27
Figura 5 – Diagrama T-s de um ciclo Rankine com superaquecimento.....	28
Figura 6 – Esquema de uma caldeira aquatubular .....	32
Figura 7 – Esquema de uma caldeira flamotubular .....	34
Figura 8 – Formato interno de uma turbina a vapor (a) contrapressão (b) condensação .....	37
Figura 9 – Vista esquemática de um gerador síncrono, monofásico de quatro polos .....	40
Figura 10 – Fluxograma típico de graxaria – produção de sebo e de farinhas de ossos.....	58
Figura 11 – Topologia com sistema de contrapressão.....	60
Figura 12 – Topologia com sistema de condensação com extração.....	61
Figura 13 – Turbina de condensação (a) Turbimaq (b) Solidda.....	62
Figura 14 – Diagrama simplificado de conexão à rede da CEGERO .....	71

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Diagrama de fluxo de caixa .....	51
Tabela 2 – Payback simples.....	52
Tabela 3 – Payback descontado.....	53
Tabela 4 – Método do VPL .....	54
Tabela 5 – Consumo de energia elétrica da Niehues Nutrimentos.....	59
Tabela 6 – PCI de diferentes combustíveis .....	67
Tabela 7 – Custos de aquisição e instalação do sistema.....	77
Tabela 8 – Diagrama de fluxo de caixa .....	78
Tabela 9 – Payback descontado.....	79
Tabela 10 – Payback descontado com preço da CELESC .....	79
Tabela 11 – Preço médio da energia elétrica para região Sul.....	81
Tabela 12 – Payback descontado com reajuste tarifário.....	81
Tabela 13 – Payback descontado com reajuste tarifário para 20 anos .....	82
Tabela 14 – Payback descontado com financiamento e com reajuste tarifário para 20 anos...	83
Tabela 15 – Payback para a consorciada com reajuste tarifário para 20 anos.....	85

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Equipamentos necessários para conexão em função da potência instalada.....	46
Quadro 2 – Parâmetros do sistema de geração .....	63
Quadro 3 – Consumo total de cavaco .....	68
Quadro 4 – Consumo descontado de cavaco .....	68
Quadro 5 – Geração diária por modelo de operação .....	69
Quadro 6 – Geração mensal.....	70

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>13</b>
1.1	JUSTIFICATIVA .....	15
1.2	DEFINIÇÃO DO PROBLEMA .....	15
1.3	OBJETIVOS .....	16
<b>1.3.1</b>	<b>Objetivo Geral .....</b>	<b>16</b>
<b>1.3.2</b>	<b>Objetivos Específicos.....</b>	<b>16</b>
1.4	DELIMITAÇÕES .....	17
1.5	METODOLOGIA .....	17
1.6	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	18
<b>2</b>	<b>COGERAÇÃO.....</b>	<b>20</b>
2.1	BIOMASSA.....	22
<b>2.1.1</b>	<b>Biomassas disponíveis .....</b>	<b>23</b>
<b>2.1.2</b>	<b>Formas de geração de energia elétrica através da Biomassa .....</b>	<b>24</b>
2.2	CICLO DE RANKINE .....	25
<b>2.2.1</b>	<b>Geração de vapor .....</b>	<b>31</b>
2.2.1.1	Caldeiras aquatubulares.....	32
2.2.1.2	Caldeiras flamotubulares .....	33
2.2.1.3	Eficiência energética na produção de vapor.....	35
2.2.1.4	Superaquecedores .....	36
<b>2.2.2</b>	<b>Turbinas .....</b>	<b>37</b>
2.2.2.1	Turbina de condensação .....	38
2.2.2.2	Turbinas de contrapressão .....	38
<b>2.2.3</b>	<b>Condensador.....</b>	<b>38</b>
<b>2.2.4</b>	<b>Gerador .....</b>	<b>39</b>
2.2.4.1	Princípios de funcionamento .....	39
2.2.4.2	Gerador Síncrono.....	39
2.2.4.3	Gerador de Indução .....	41
2.3	REQUISITOS LEGAIS PARA CONEXÃO DE MICRO E MINIGERADORAS .....	41
<b>2.3.1</b>	<b>Resolução normativa N° 482, de 17 de abril de 2012 .....</b>	<b>41</b>
<b>2.3.2</b>	<b>Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica - PRODIST .....</b>	<b>43</b>
2.4	REQUISITOS PARA CONEXÃO A REDE.....	44
<b>2.4.1</b>	<b>Sistema de proteção.....</b>	<b>45</b>

2.4.1.1	Sistema de medição .....	46
2.4.1.2	Sistema anti-ilhamento .....	47
2.4.1.3	Relé de sincronismo .....	48
2.4.1.4	Proteção de sub e sobrefrequência .....	48
2.4.1.5	Proteção de sub e sobretensão .....	48
2.4.1.6	Elemento de interrupção.....	49
2.4.1.7	Elemento de desconexão .....	49
2.4.1.8	Proteções extras .....	49
2.5	<b>ANÁLISE ECONÔMICA .....</b>	<b>50</b>
2.5.1	<b>Fluxo de caixa .....</b>	<b>50</b>
2.5.2	<b>Taxa de juros .....</b>	<b>51</b>
2.5.3	<b>Métodos de avaliação de investimentos.....</b>	<b>51</b>
2.5.3.1	Payback simples (PBS).....	52
2.5.3.2	Payback descontado (PBD) .....	52
2.5.3.3	Valor Presente Líquido (VPL).....	53
2.5.3.4	Taxa Interna de Retorno (TIR) .....	54
3	<b>ANÁLISE TÉCNICA DE UM PROJETO DE COGERAÇÃO.....</b>	<b>55</b>
3.1	TERMOMAD COMÉRCIO DE MADEIRA .....	55
3.1.1	<b>Escolha da turbina .....</b>	<b>55</b>
3.2	NIEHUES NUTRIMENTOS .....	57
3.2.1	<b>Escolha da turbina .....</b>	<b>59</b>
3.2.2	<b>Cálculo de potência pelo ciclo de Rankine.....</b>	<b>62</b>
3.2.3	<b>Consumo de combustível .....</b>	<b>66</b>
3.2.4	<b>Geração de energia elétrica .....</b>	<b>69</b>
3.2.4.1	Consórcio de geração distribuída .....	70
3.2.5	<b>Conexão do sistema de geração a rede .....</b>	<b>71</b>
4	<b>ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA .....</b>	<b>76</b>
4.1	ANÁLISE ECONÔMICA PARA O CONSORCIADO.....	84
5	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>86</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>89</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O consumo de energia elétrica no mundo vem crescendo cada vez mais, e junto com esse crescimento surge uma preocupação com a matriz energética, isso pelo fato da necessidade de suprir esse consumo com fontes de menor impacto ambiental. Segundo o MME (2019) no mundo 83,3% da matriz energética é proveniente de fontes não renováveis.

As fontes não renováveis podem ser definidas como aquelas em que seu consumo pode acabar com suas reservas antes que a mesmas se recomponham, como por exemplo, as reservas de carvão e petróleo (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Devido ao fato de estes recursos serem finitos, as autoridades governamentais percebem a necessidade de mudar esse cenário explorando fontes alternativas de energia elétrica, as chamadas fontes renováveis.

Estas fontes renováveis são definidas como aquelas em que o consumo não acaba com suas reservas ou então são recursos inesgotáveis, como exemplo, temos a energia solar, eólica, hídrica e biomassa (GOLDEMBERG; LUCON, 2007). Tendo em vista que o consumo de energia elétrica só cresce, nota-se a obrigação de expandir a sua produção, e para isso é indispensável que sejam realizadas pesquisas com relação a fontes renováveis para um bom aproveitamento destes recursos.

Todas as fontes renováveis são interessantes para a produção de energia elétrica, e ainda mais para o Brasil, que possui extensão territorial e diversidade climática favorável que possibilita a produção de energia através dessas fontes. Justamente querendo aproveitar essa característica do território brasileiro, bem como sua grande produção no setor agrícola, pode-se dizer que a biomassa, pela sua abundância, se torna atraente para a geração de energia elétrica.

Para produzir energia elétrica através da biomassa existem várias rotas tecnológicas. Todas preveem a conversão da biomassa em um produto intermediário que será utilizado em uma máquina motriz. Nesta máquina será produzida energia mecânica que acionará um gerador de energia elétrica (ANEEL, 2008). Dentre essas rotas, as mais populares são as que utilizam da queima direta em um ciclo de Rankine, que é o mesmo ciclo utilizado nas termoelétricas movidas a combustíveis fósseis, e também, por meio da conversão do resíduo em gás, para a queima em motores ou turbinas de combustão interna.

Sabendo que a quantidade de biomassa é superior à de combustíveis fósseis para produzir a mesma quantidade de energia térmica, ainda assim vem se tornando uma alternativa atraente em geração, principalmente pelo fato de se tratar da queima de um produto que se renova com o tempo e que de certa forma existe em abundância. Segundo

Ramage e Scurlock (1996), a quantidade de biomassa existente na terra é de aproximadamente dois trilhões de toneladas, suficiente para gerar oito vezes o consumo mundial de energia primária.

A obtenção de energia elétrica através da queima de biomassa, como os resíduos agrícolas e florestais, é algo interessante, porém por utilizar o ciclo térmico e por mais eficiente que seja um gerador termelétrico, a maior parte da energia em que o combustível usado dispõe para produção é transformada em calor e perdida para o meio ambiente. Segundo o INEE (2007) devido às perdas térmicas, o aproveitamento de energia útil varia entre 30% e 40% da energia. Para melhorar o sistema foi desenvolvido a cogeração, onde o calor produzido na geração elétrica é usado no processo produtivo sob a forma de vapor ou água aquecida. A utilização desta energia térmica em conjunto com a energia elétrica disponibilizada no processo pode trazer uma eficiência próxima a 85% para o sistema de geração.

Visando essa eficiência elevada, cada vez mais empresas que necessitam da produção de calor para seu processo produtivo estão adaptando seu sistema para também gerarem energia elétrica. Para cada tipo de processo existe uma forma adequada de obtenção dessa energia a qual necessita de pesquisas e estudos avançados para que haja um aproveitamento eficaz de energia elétrica sem prejudicar a qualidade da produção que utiliza vapor, além de analisar se o consumo de combustível excedente necessário para a produção de energia elétrica torna o sistema viável tecnicamente e apresenta resultado econômico promissor. A implantação destes sistemas se tornou ainda mais interessante para as indústrias depois que a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou uma resolução garantindo a possibilidade de micro e minigeradoras se conectarem a rede de distribuição de energia elétrica.

A ANEEL aprovou em 2012 a Resolução Normativa Nº 482/2012 que estabelece as condições para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica possibilitando ao consumidor gerar sua própria energia. Atualizada em audiência pública em 2015, a minigeração distribuída passa a ser central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW e que utilize cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia elétrica conectadas na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2012). Quando a quantidade de energia gerada em determinado mês for superior à energia consumida naquele período, o consumidor fica com créditos que podem ser utilizados para diminuir a fatura dos meses seguintes. O prazo de validade dos créditos é de 60 meses, e podem ser

usados também para abater o consumo de unidades consumidoras do mesmo titular situadas em outro local, desde que na mesma área de concessão da distribuidora (ANEEL, 2012). Há ainda a possibilidade que diversos interessados se unam em um consórcio ou em uma cooperativa, instalem uma microgeração ou minigeração distribuída e utilizem a energia gerada para redução de suas faturas (ANEEL, 2012).

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista que a Amurel (Associação de Municípios da Região de Laguna) possui um grande número de indústrias madeireiras, a produção de energia elétrica através da biomassa disponível na região provenientes do processo produtivo dessas indústrias, pode se tornar uma alternativa atraente, pois estes resíduos muitas vezes se tornam um empecilho ou então acabam tendo um descarte incorreto. Aproveitar a biomassa produzida na região, utilizando-a na geração de vapor para processos industriais e ainda aproveitá-lo para gerar energia elétrica traz, um alto índice de eficiência energética nas indústrias.

Em um ponto de vista administrativo o sistema de cogeração pode trazer mais competitividade à empresa no mercado em que está inserida, isso se deve, ao fato de uma empresa que utiliza tal sistema diminuir os custos com energia elétrica, produzindo parte e até todo o seu consumo ou ainda estar vendendo o excedente que produz, diminuindo os custos de operação e conseqüentemente impactando no preço final de seus produtos.

A cogeração permite altos índices de eficiência energética, através do dimensionamento da caldeira ou da utilização de uma já existente, é possível implantar uma turbina para que haja geração de energia elétrica em conjunto com o processo produtivo da empresa.

O intuito de desenvolver este trabalho relacionado à geração de energia elétrica através da cogeração é também disseminar esta ideia para pessoas ligadas diretamente como empresários e operadores, bem como pessoas ligadas indiretamente à área.

## 1.2 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Tendo em vista a grande produção de madeira na região da Amurel, o rejeito produzido pode se tornar um empecilho, os rejeitos provenientes da produção mais comum são os tocos e galhos de madeira derivados do corte triturados em cavacos, o pó de serra

resultante da serragem, e o cepilho proveniente da usinagem e beneficiamento da madeira, cada um com poder de queima variando de acordo com a espécie e o grau de umidade.

As empresas que produzem e consomem vapor, utilizam também energia elétrica no seu processo fabril, sendo que algumas necessitam de uma alta demanda enquanto outras nem tanto. No decorrer dos anos o preço da energia elétrica vem sofrendo reajustes e conseqüentemente vem impactando cada vez mais na receita da empresa. Portanto, a busca por geração própria vem se tornando cada vez mais comum a fim de reduzir este gasto.

Empresas que utilizam caldeiras para seu processo tem grande oportunidade de instalar sistemas de cogeração, pois podem estar aproveitando o vapor utilizado na produção para gerar eletricidade, diminuindo os custos com energia elétrica.

Analisar se a implantação de um sistema de cogeração atendendo os padrões exigidos em normas, em uma indústria de pequeno/médio porte que utilize vapor em seu processo produtivo é possível, e se tal empreendimento traria algum benefício econômico para essa empresa, mostrando assim, a atratividade deste modelo de geração.

### 1.3 OBJETIVOS

Este tópico tem por natureza apresentar as metas a serem alcançadas, dividindo-se em objetivo geral, que tem por finalidade apresentar a ideia central do trabalho e os objetivos específicos, que descrevem os passos utilizados para o desenvolvimento deste estudo.

#### 1.3.1 Objetivo Geral

Analisar tecnicamente e economicamente a possibilidade de implantação de um sistema de cogeração aplicado a indústrias de diferentes setores.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Escolher a empresa abordada para aplicação;
- b) Definir o sistema de cogeração mais compatível com a empresa;
- c) Propor uma central termelétrica para a empresa que atenda às necessidades de energia elétrica e térmica;
- d) Verificar se o sistema proposto se enquadra nas regras necessárias para seu funcionamento;

- e) Projetar o sistema de geração de energia, medição e proteção;
- f) Analisar a viabilidade econômica do sistema de cogeração.

#### 1.4 DELIMITAÇÕES

Serão analisados dois cenários diferentes, de duas empresas da região da Amurel, uma que trabalha principalmente com secagem de madeira por meio de vapor aquecido em estufas, além de dispor de resíduos de madeira que podem ser utilizados para a queima. A empresa utiliza uma caldeira antiga de pequeno porte com apenas 10 kgf/cm<sup>2</sup> de pressão na saída. Ela está localizada no município de Gravatal – SC e está conectada à rede da Cooperativa de Eletricidade de Gravatal (CERGRAL). A outra empresa atua no ramo de preparação de subprodutos do abate, utilizando o vapor principalmente para abastecer digestores que necessitam de 8 kgf/cm<sup>2</sup>. A empresa dispõe de uma caldeira que atende essa necessidade, mas visa um crescimento e pretende investir em outra caldeira para atender a produção futura, sendo assim, é possível dimensioná-la para a implantação de um sistema de geração elétrica em conjunto com o seu processo. Ela está localizada no município de São Ludgero – SC, conectada à rede da Cooperativa de Eletricidade de São Ludgero (CEGERO).

#### 1.5 METODOLOGIA

Este trabalho é por natureza uma pesquisa aplicada com objetivos em sua maior parte exploratórios e pouco descritivos. Utilizando procedimentos baseados em pesquisas documentais, bibliográficas além de entrevistas e estudo de caso.

O início do projeto utilizará de livros e trabalhos acadêmicos que estejam relacionados ao tema agregando conhecimento e fortalecendo a base para seu desenvolvimento. A pesquisa bibliográfica e documental tem como fonte o resultado de estudos precedentes, publicados, especialmente em livros, artigos científicos, trabalhos de cursos, dissertações e teses, (ZWIEREWICZ, 2014, p. 34). A busca será sempre por documentos com assuntos semelhantes ao deste trabalho, visando acrescentar informações coerentes e centralizadas.

O processo de levantamento de dados será feito através de diálogo com o dono da empresa em questão para obtermos informações de como é o funcionamento da empresa, suas disponibilidades de equipamentos e combustíveis para uma possível implantação de um sistema de cogeração além do consumo de energia elétrica e térmica.

Haverá também a necessidade do contato com empresas fornecedoras de mini turbinas a vapor e superaquecedores para ver qual melhor se adapta ao processo em questão bem como as mudanças requeridas por tais mecanismos. Para um melhor entendimento do funcionamento técnico dos equipamentos, serão analisados seus respectivos manuais, contatado os técnicos de cada um e conversado com o operador da caldeira.

Segundo Gil (2002) em sua publicação Como elaborar projeto de pesquisa, cita que um dos propósitos do estudo de caso é descrever a situação do contexto em que está sendo feita determinada investigação.

Para analisar a viabilidade de uma possível implantação utilizaremos de cálculos matemáticos disponibilizados no livro Princípios de Termodinâmica para Engenharia (MICHAEL J. MORAN / HOWARD N. SHAPIRO – 2002) baseados no ciclo de Rankine.

O dimensionamento do gerador será de acordo com o consumo de energia elétrica da empresa bem como da potência disponibilizada no eixo da turbina, com isso será realizada uma pesquisa em catálogo de fabricantes de alternadores e geradores que disponibilizam de equipamentos compatíveis com o sistema, visando uma melhor relação custo-benefício.

A proteção e a conexão do sistema a rede elétrica deverá atender aos requisitos estabelecidos em documentos referentes a sistemas de micro ou minigeração disponibilizados pela concessionária local, além de estudar sobre outros dispositivos de proteção elétrica que aumentem a confiabilidade do conjunto.

Para o estudo da viabilidade econômica será utilizado de métodos apresentados no livro Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica e tomada de decisão (CASAROTTO FILHO, Nelson – 2007), indicando a Matemática Financeira como ciência básica e a Engenharia Econômica como técnica.

## 1.6 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho apresenta-se dividido em três etapas, a primeira parte que se refere ao capítulo 2 é feita uma apresentação sobre cogeração, utilizando biomassa como combustível para o ciclo de Rankine, além de apresentar seus principais componentes e como funciona. Ainda no capítulo 2, é abordado como conectar um sistema de cogeração a rede de energia elétrica por meio de geração distribuída. É apresentado também métodos de análise econômica para posteriormente analisar a atratividade do investimento.

No capítulo 3 são tratados dois casos diferentes, buscando a viabilidade técnica para implantação de um sistema de cogeração na indústria, de acordo com os parâmetros disponíveis em suas respectivas produções.

A primeira empresa citada é do seguimento madeireiro, onde trabalha principalmente com secagem de madeira de pinus e eucalipto, e a segunda empresa abordada atua no ramo de graxarias, trabalhando principalmente com preparação de subprodutos do abate.

Tendo em vista a viabilidade técnica dos parâmetros encontrados na segunda empresa, foi proposto um sistema de cogeração, apresentando a topologia, bem como os cálculos referente à geração de energia.

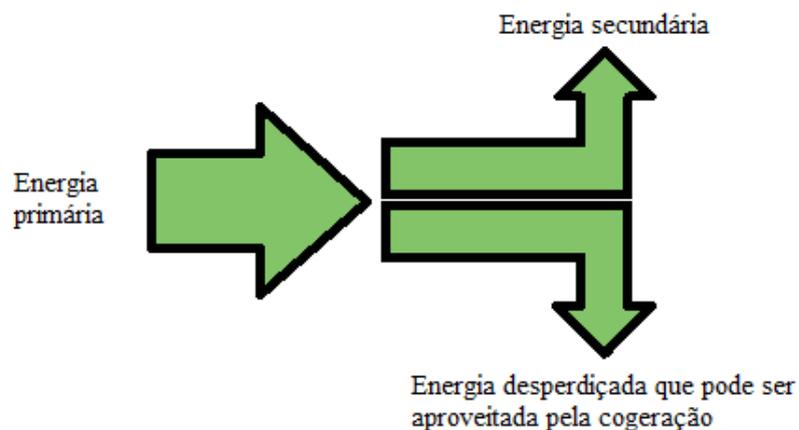
O modelo de geração se enquadra em geração distribuída, portanto, foram apresentados os requisitos para conexão do sistema de geração a rede da concessionária local, além de expor a possibilidade de realização de um consórcio de geração de energia elétrica.

Já no capítulo 4 é feita a avaliação econômica, utilizando diferentes métodos de análise do possível investimento da empresa neste sistema de geração, com formas diferenciadas de investir e de obter o retorno, mostrando a atratividade do projeto.

## 2 COGERAÇÃO

Cogeração é produzir duas ou mais formas de energia a partir do aproveitamento de uma única fonte primária de energia. Geralmente a fonte primária de energia é transformada em uma forma secundária de energia. Ao longo desse processo ocorrem perdas, mas na cogeração essas perdas são aproveitadas conforme mostra a Figura 1 e podem ser transformadas novamente em outra forma de energia (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2015).

Figura 1 – Conceito de cogeração



Fonte: Os autores, 2019.

Para obter o melhor aproveitamento energético, os projetos de cogeração podem adotar duas formas de posicionar o aproveitamento de calor e a geração de energia elétrica.

Quando a energia primária (combustível) primeiramente é aproveitada para a geração de energia elétrica e os gases ou vapores resultantes são reaproveitados no processo, define-se como sendo ciclo *topping* (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2015). Também é possível utilizar o combustível inicialmente para a produção de calor para o processo e posteriormente gerar energia elétrica com os gases ou vapor resultante. Esse tipo de processo é denominado ciclo *bottoming* (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2015).

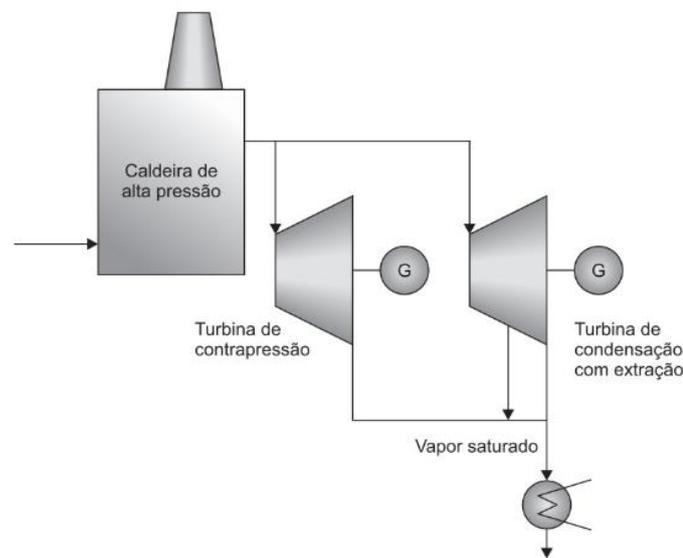
O ciclo do tipo *topping* é o mais utilizado, mas a escolha do ciclo a ser utilizado deve ser adotada após um estudo, buscando o maior aproveitamento da energia primária consumida (BARROS; BORELLI; GEDRA, 2015).

A implantação de sistemas de cogeração apresenta as seguintes vantagens, entre elas se destacam a redução da dependência de energia elétrica da concessionária, a redução da emissão de gases causadores do efeito estufa, o aumento da eficiência energética de toda a

instalação, a redução no impacto ambiental das operações da instalação, assim como a possibilidade de aumento da receita com venda de energia elétrica excedente (PEREIRA, 2009).

A cogeração utilizando turbinas a vapor é possível de ser implantada em situações onde a caldeira possa produzir vapor em alta pressão, apresentando condições favoráveis à geração de energia elétrica, utilizando turbinas de contrapressão ou de condensação, como representado na Figura 2.

Figura 2 – Opção de sistemas de cogeração



Fonte: Barros; Borelli; Gedra, (2015, p. 106).

Este tipo de geração apresenta a vantagem de permitir a utilização de diversos tipos de fontes primárias de energia a ser queimada na caldeira, tais como bagaço de cana, casca de arroz, maravalha (pó de serra, cavaco, cepilho...), óleo combustível entre outros. O emprego de mais de um tipo de fonte primária de energia torna o processo de geração mais flexível.

Para abordar a cogeração em si é necessário apresentar temas relacionados. A cogeração se torna mais interessante utilizando a biomassa por ser um recurso renovável, geralmente utiliza o ciclo de Rankine como método de geração igual às termoelétricas convencionais, onde apresenta cálculos para o balanço de energia, necessita estar dentro de determinadas normas para se conectar a rede de distribuição e sempre é interessante analisar se investir em um sistema desses é uma boa opção através de métodos de análise econômica.

## 2.1 BIOMASSA

A biomassa é considerada uma fonte renovável para a produção de energia, com potencial expressivo no desenvolvimento de uma sociedade ecologicamente consciente com o uso de energias renováveis. Mesmo sendo uma fonte de energia utilizada desde os primórdios da humanidade, o seu potencial ficou de lado e precisa ser explorado, mas o interesse na utilização deste recurso cresceu nos últimos anos e as novas tecnologias demonstram a possibilidade de se tornar mais eficiente e competitiva. (ROSILLO-CALLE; BAJAY; ROTHMAN, 2005).

O principal interesse na atual produção de eletricidade a partir da biomassa deve-se a alguns fatores relacionados às questões ambientais, sendo mais específico no aquecimento global. Em especial nos países em desenvolvimento estima-se um crescimento dramático no consumo de eletricidade nos próximos 20 anos e uma dificuldade de atender tal demanda (ROSILLO-CALLE; BAJAY; ROTHMAN, 2005). Para evitar um dramático aumento dos impactos ambientais, é necessário que haja uma substancial contribuição de fontes renováveis na expansão da capacidade de geração, conseqüentemente a biomassa é uma boa opção.

A indústria de bioenergia já é utilizada em diversos países desenvolvidos e em desenvolvimento. Contudo, as técnicas e tecnologias de cultivo e conversão da biomassa em energia necessitam ser mais bem desenvolvidas. Se a pesquisa e o desenvolvimento da bioenergia tiverem prioridade e incentivo de políticas para desenvolvimento desse tipo de indústria, o setor de bioenergia vai ser capaz de inovar e diversificar, trazendo benefícios ambientais mais relevantes.

A biomassa tem um maior resultado de eficiência ambiental quando emprega a utilização de resíduos da produção industrial, agropecuária ou agrícola. A implantação se torna mais atraente quando a central geradora está localizada no mesmo lugar em que os resíduos estão disponíveis. (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008). Quando a biomassa não é um resíduo, se torna atraente quando produzida de forma sustentável.

Pode-se citar também que a produção de biomassa exige uma grande quantidade de mão de obra, principalmente na parte de produção. Optar por este sistema acaba por trazer mais ofertas de empregos, visto que outras fontes renováveis, como a eólica, acabam por trazer pouca mão de obra e ainda exigem apenas profissionais mais especializados (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

### 2.1.1 Biomassas disponíveis

Inúmeros setores industriais que usam a biomassa como matéria-prima podem gerar resíduos para geração de energia, os resíduos que se destacam são o bagaço de cana-de-açúcar, a lixívia e também os restos de madeira de diversos ciclos produtivos. Outra fonte que tem entrando em estudo é a produção de florestas energéticas em que sua produção é direcionada apenas para a geração de energia.

O bagaço da cana-de-açúcar é um resíduo da indústria sucroalcooleira, indústria com grande potencial no Brasil e a lixívia é resíduo do processo produtivo de papel e celulose, geralmente estes resíduos são consumidos nas próprias indústrias para produzir vapor e calor.

A produção sucroalcooleira tem grande potencial na biomassa. Depois de cortada, a cana é levada para a usina, lavada e esmagada, onde a fibra é separada do caldo, e em seguida enviada diretamente para a caldeira, podendo por meio de sistemas de cogeração gerar além de energia térmica, trabalho mecânico e eletricidade, necessários para o processo produtivo (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

Além da utilização do bagaço, outro resíduo que pode ser aproveitado é a palha, geralmente largada no campo, mas que dispõem de grande capacidade energética, se associado com baixos custos de transporte se torna uma opção sustentável de geração.

A lixívia é um produto derivado da produção de celulose através do processo químico Kraft<sup>1</sup>. Ela é consumida como combustível nas caldeiras das indústrias de celulose e fornece uma parte significativa da demanda por vapor, e quase sempre esse vapor é utilizado também para gerar energia elétrica através de unidades de cogeração. As fábricas de papel, em boa parte empresas de pequeno porte possuem a autoprodução de energia elétrica, mas ainda não passam de 15% de seu consumo de eletricidade. A fabricação da pasta de celulose fornece uma grande quantidade de resíduos que podem ser queimados em caldeiras, assim a instalação de unidades de cogeração para o consumo desses resíduos é uma escolha natural e econômica, que também traz benefícios ambientais, uma vez que esse tipo de recuperação térmica tem sido até agora a maneira mais eficiente e econômica de descartá-los (CORTEZ; LORA; GÓMEZ, 2008).

Outra possibilidade é o uso da madeira para fins energéticos através do aproveitamento dos resíduos proveniente do corte. Durante o processo de coleta são deixados

---

<sup>1</sup> O processo Kraft é a principal forma de produção de celulose por ser um processo com cozimento contínuo. Uma de suas vantagens é o sistema de recuperação dos produtos químicos que é associado ao processo

no campo folhas, galhos e cascas, que de forma similar a palha proveniente da colheita da cana-de-açúcar, possui excelentes potenciais para serem recuperados e aproveitados.

Tendo em vista o potencial da madeira, já na década de 80, foi introduzido o conceito de florestas energéticas, um conceito que contava com grande concentração de árvores por hectare, que tinha como finalidade a produção do maior volume de biomassa por área em um menor espaço de tempo, mas os resultados não foram satisfatórios. Porém, atualmente com os avanços tecnológicos alcançados no campo, tanto em termos de manejo quanto no desenvolvimento de material genético selecionado, tem se observados altos índices de produtividade, essa opção voltou a ser estudada (ROSILLO-CALLE; BAJAY; ROTHMAN, 2005). As principais espécies usadas são, a Acácia devido ao seu poder de combustão excelente e o Eucalipto pelo seu rápido crescimento em conjunto com o poder de queima satisfatório.

As condições climáticas, bem como a extensão territorial aliada a disponibilidade de terras de qualidade com mão de obra, torna o Brasil um grande potencial para o desenvolvimento deste tipo de cultura. As florestas energéticas podem constituir uma grande alternativa econômica sustentável proporcionando geração de trabalho e renda no campo.

### **2.1.2 Formas de geração de energia elétrica através da Biomassa**

A biomassa dispõe de inúmeras rotas de conversão de sua energia, podendo obter no final produtos como calor, eletricidade e combustíveis para sistemas de transportes. Para produzir eletricidade, é possível realizar a combustão direta ou então sua previa conversão em combustíveis líquidos ou gasosos. Basicamente existem duas tecnologias que se destacam para conversão em eletricidade, que são os sistemas de motores a combustão interna e os sistemas baseados no ciclo a vapor.

Para utilização em motores de combustão interna é necessário realizar a gaseificação da biomassa. Este processo converte um material muito heterogêneo em combustível gasoso intermediário, podendo ser usados em processos industriais, geração de eletricidade e produção de combustíveis líquidos. O processo de gaseificação pode converter biomassa em gases ricos em carbono e hidrogênio facilmente utilizados, com ganhos na eficiência e no desempenho ambiental comparado a combustão direta da biomassa (ROSILLO-CALLE; BAJAY; ROTHMAN, 2005).

A utilização da biomassa no ciclo a vapor se torna idêntica à empregada na geração térmica, baseadas no ciclo de Rankine, a única diferença está no fato de não utilizar combustíveis fósseis para geração de calor na caldeira do sistema de geração, mas sim biomassa, podendo ou não ser misturado a outros combustíveis derivados do petróleo.

Quando utilizada a combustão direta da biomassa, se tem sistemas pouco menos eficientes que os de combustíveis fósseis, mas o desenvolvimento de tecnologias mais modernas e eficientes estão mudando essa situação. Provavelmente, a melhor tecnologia para conversão de biomassa em energia elétrica, é a do ciclo combinado, onde integra a gaseificação da biomassa e reutiliza o calor da combustão para aquecimento de vapor que é aproveitado em um ciclo de Rankine.

Mesmo com essa pequena diferença na eficiência de térmicas convencionais para as movidas a biocombustíveis, se tem grandes expectativas para a contribuição da biomassa na matriz energética futura. É possível destacar que os combustíveis obtidos através da biomassa podem servir para substituir, de forma semelhante, os combustíveis fósseis nos sistemas de fornecimento de energia. Outras fontes renováveis, como solar e eólica, não permitem um dinamismo na produção, representando um desafio na distribuição e no consumo da energia (ROSILLO-CALLE; BAJAY; ROTHMAN, 2005).

## 2.2 CICLO DE RANKINE

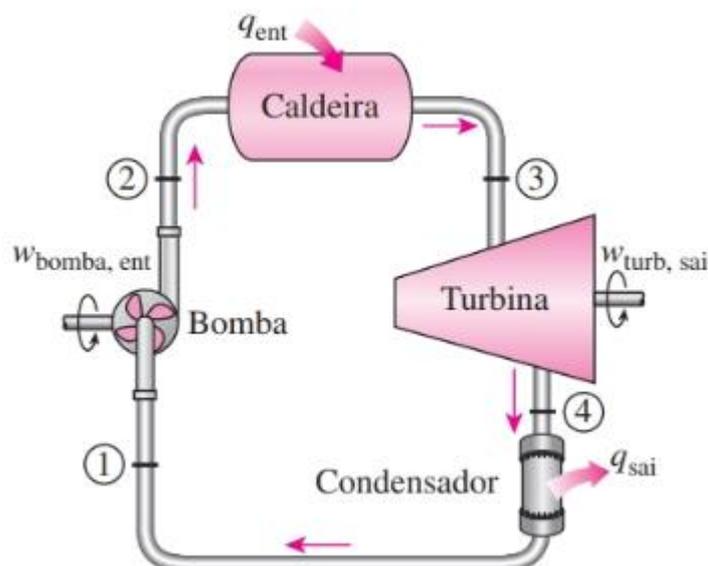
A geração de potência em sistemas que utilizam vapor é bastante complexa, sendo necessário idealização de modelos termodinâmicos mais simplificados. A modelagem é uma etapa inicial importante no projeto de engenharia, mesmo sabendo que estudos através de simplificações nos trazem resultados não ideais. Esses modelos geralmente permitem deduções sobre como a variação dos principais parâmetros afetariam o desempenho real do sistema, fornecem também cenários relativamente simples para discutir as funções e as vantagens de características destinadas a melhorar o rendimento do processo (MORAN, SHAPIRO, 2002).

O modelo termodinâmico que melhor descreve o processo de funcionamento de sistemas de geração de potência através de processos térmicos com utilização de vapor é o ciclo de Rankine. É um ciclo termodinâmico que descreve a conversão do calor em trabalho útil, onde frequentemente é utilizado vapor de água como fluido de trabalho. Em usinas termoelétricas, o trabalho resultante do processo é utilizado para gerar eletricidade.

O ciclo de Rankine baseia-se na primeira lei da termodinâmica, a Lei da Conservação da Energia, descrita como a variação da energia interna de um sistema que é expressa por meio da diferença entre a quantidade de calor trocada com o meio ambiente e o trabalho realizado durante a transformação, e na segunda lei definida pelo enunciado de Rudolf Clausius onde diz que, “é impossível para qualquer sistema operar de tal forma que o único resultado seja a transferência de energia sob a forma de calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente”, ou seja, quando uma parte de um sistema fechado interage com outra parte, a energia tende a dividir-se por igual, até que o sistema alcance um equilíbrio térmico.

Para entender o funcionamento do ciclo é necessário explicar um pouco sobre entropia e entalpia. Entropia é um conceito da termodinâmica que mede a desordem das partículas de um sistema físico, e segundo Clausius, que utilizou a ideia de entropia pela primeira vez em 1865, é mais útil conhecer sua variação do que seu valor absoluto. Já entalpia é o nome atribuído à quantidade de energia que fica armazenada nas substâncias em função de certos parâmetros físicos, que pode ser alterada através de reações químicas. Essas reações podem ser exotérmicas, onde há liberação de calor, ou endotérmicas onde há absorção de calor. A entalpia também aparece em balanços de energia para o cálculo de calor e trabalho nos processos com escoamento, como os balanços aplicados aos trocadores de calor, evaporadores, colunas de destilação, bombas, compressores, turbinas, entre outros (SMITH, VAN NESS, ABBOTT, 2007).

Figura 3 – Esquema básico de um ciclo de Rankine



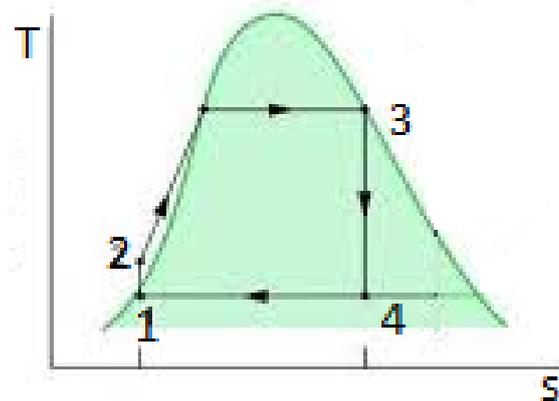
Fonte: Cengel; Boles (2013, p. 557).

Os principais componentes empregados no ciclo de Rankine são: a bomba hidráulica, a caldeira ou então evaporador, a turbina e o condensador, conforme está representado na Figura 3.

De uma forma simples a água entra na caldeira onde é aquecida até evaporar para posteriormente entrar na turbina, onde a mesma gira resultando em trabalho de eixo, em seguida, o vapor sai da turbina, passa por um condensador onde vira água para novamente ser bombeada para a caldeira repetindo o ciclo.

A Figura 4 representa o diagrama de temperatura por entropia (T-s) que representa um ciclo Rankine convencional. Observa-se que a curva de vapor saturado possui inclinação negativa, características de fluidos úmidos. Por esta razão, o fluido na saída da turbina é constituído de uma mistura de vapor e água saturada.

Figura 4 – Diagrama de temperatura por entropia para um ciclo Rankine convencional



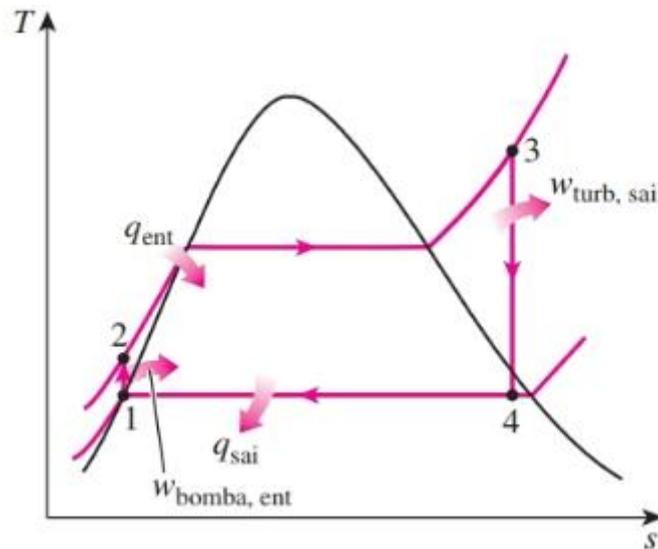
Fonte: Adaptado de Moran, Shapiro, (2013, p. 345).

Do processo 1 para 2 temos água sendo bombeada de uma pressão baixa para uma pressão alta através da bomba hidráulica. A água então já pressurizada no ponto 2 entra no evaporador, onde é aquecida até se tornar vapor saturado com alta pressão no ponto 3. O vapor saturado expande através de uma turbina para gerar trabalho de eixo saindo com uma pressão menor do que a de entrada, como visto no processo 3 para 4. Por fim, o vapor entra no condensador, onde é resfriado até a condição de líquido saturado expressa no processo 4 para 1 do diagrama. Para um melhor aproveitamento geralmente se tem um processo diferenciado para utilização de vapor superaquecido.

Se uma energia adicional é fornecida ao fluido que se encontra em estado de vapor saturado, é possível obter uma condição de vapor superaquecido na entrada da turbina. Essa adição de energia é realizada em um trocador de calor denominado superaquecedor. Na

prática, a combinação da caldeira com o superaquecedor é conhecida como gerador de vapor superaquecido. A Figura 5 representa o diagrama T-s com vapor superaquecido.

Figura 5 – Diagrama T-s de um ciclo Rankine com superaquecimento



Fonte: Cengel; Boles (2013, p. 557).

A água entra na bomba no estado 1 como líquido saturado e é comprimida de maneira isentrópica até a pressão de operação da caldeira. A temperatura da água aumenta um pouco durante esse processo de compressão, devido a uma ligeira diminuição do volume específico da água. A distância vertical entre os estados 1 e 2 do diagrama T-s foi bastante exagerada por questões de clareza, já que a adição de calor neste processo é irrisória se comparada às outras transferências de calor do sistema (CENGEL; BOLES, 2013).

A água entra na caldeira como um líquido comprimido no estado 2 e sai como vapor superaquecido no estado 3. A caldeira é basicamente um grande trocador de calor no qual o calor originário de gases de combustão, reatores nucleares ou outras fontes é transferido para a água essencialmente a uma pressão constante. A caldeira, incluindo a região onde o vapor é superaquecido, no caso o superaquecedor, também é chamada de gerador de vapor (CENGEL; BOLES, 2013).

O vapor de água superaquecido no estado 3 vai então para a turbina, na qual ele se expande de forma isentrópica e produz trabalho no eixo, onde geralmente é conectado a um gerador elétrico. A pressão e a temperatura do vapor consumida durante esse processo caem até os valores do estado 4, onde o vapor entra no condensador, sendo constituído de uma

mistura de líquido e vapor saturados com título<sup>2</sup> elevado. O vapor é condensado a pressão constante no condensador, que também pode ser definido como um grande trocador de calor, perdendo o calor para um meio de resfriamento como um lago, um rio ou a atmosfera. Posteriormente, a água deixa o condensador como líquido saturado e entra na bomba completando o ciclo (CENGEL; BOLES, 2013).

Todos os fundamentos necessários à análise termodinâmica dos sistemas de geração de potência já foram apresentados anteriormente. Como os princípios da conservação da massa e da energia, a segunda lei da termodinâmica e os dados termodinâmicos. Esses princípios se aplicam a componentes individuais de uma planta de geração, tais como turbinas, bombas e trocadores de calor, bem como, as mais complexas plantas de potência.

Para realizar os cálculos do balanço energético do ciclo alguns pontos são desconsiderados, como as perdas de calor pelas fronteiras que são desprezíveis, as variações das energias cinética e potencial que são consideradas nulas, além de considerar que todos os componentes operam em regime permanente.

Quando o vapor estiver condensado é realizado o bombeamento para a caldeira a uma pressão mais elevada. Utilizando de um volume de controle em volta da bomba, sem considerar perdas para a vizinhança, o balanço de energia se dá pela Equação (1):

$$\frac{W_p}{m} = h_2 - h_1 \quad (1)$$

Onde temos que  $W_p/m$  é a taxa de potência por unidade de massa que passa pela bomba, e  $h_1$  e  $h_2$  está relacionado com a entalpia da água antes e depois da bomba respectivamente (MORAN, SHAPIRO, 2002), valores geralmente tabelados para a água em função de pressão e temperatura. Ou então através da Equação (2):

$$W_p = v(P_2 - P_1) \quad (2)$$

Onde temos que  $W_p$  como a potência produzida pela bomba,  $P_1$  e  $P_2$  é a pressão da água antes e depois da bomba respectivamente e  $v$  é o volume específico do fluido em relação a temperatura e pressão (CENGEL; BOLES, 2013).

Agora, com o líquido já em alta pressão alimentando a caldeira, temos seu aquecimento até a temperatura desejada, geralmente superaquecido, utilizando como volume de controle o ponto 2 e o ponto 3, temos a Equação (3) para a taxa de energia fornecida:

$$\frac{Q_{entrada}}{m} = h_3 - h_2 \quad (3)$$

---

<sup>2</sup> O título é a percentagem de massa de vapor numa mistura líquido-vapor

Onde temos que  $Q_{entrada}/m$  é taxa de transferência de calor da fonte de energia por unidade de massa que passa pela caldeira (MORAN, SHAPIRO, 2002), e  $h_2$  e  $h_3$  está relacionado com a entalpia da água antes e depois da caldeira, onde os valores são tabelados uma vez que os parâmetros, como pressão e temperatura de entrada e saída da água são conhecidos.

Agora com o vapor já em alta pressão e alta temperatura, é então levado a turbina, onde ele se expande resultando em trabalho de eixo. Utilizando do volume de controle o ponto 3, saída da caldeira, e o ponto 4, saída da turbina, temos a Equação (4) para a taxa de energia fornecida:

$$\frac{W_t}{m} = h_3 - h_4 \quad (4)$$

Onde temos que  $W_t/m$  é a taxa de potência fornecida pela turbina por unidade de massa ao gerador (MORAN, SHAPIRO, 2002), e os valores de  $h_4$  e  $h_3$  estão relacionados com a entalpia da água antes e depois da turbina. Para  $h_3$  têm-se um valor tabelado já que a pressão e temperatura do vapor são conhecidos, mas com o valor da entalpia  $h_4$  deve-se tomar cuidado, pois o mesmo contém tanto vapor saturado como água saturada, ou seja, antes de realizar os cálculos é necessário conhecer o título do vapor.

Por último, se tem o balanço de energia entre os pontos 4 e 1, onde descreve a transferência de energia que o condensador libera a natureza, tornado o vapor quente com água totalmente em líquido saturado, para o mesmo poder ser bombeado novamente a caldeira, com isso temos a Equação (5):

$$\frac{Q_{saída}}{m} = h_4 - h_1 \quad (5)$$

Para a Equação (5), temos que  $Q_{saída}/m$  é taxa de transferência de calor do vapor do ciclo, transferida ao meio de resfriamento por unidade de massa que passa pelo condensador (MORAN, SHAPIRO, 2002), e  $h_4$  e  $h_1$  está relacionado com a entalpia da água antes e depois do condensador. O valor de  $h_1$  é tabelado já que a pressão e temperatura do líquido saturado são conhecidos, com a entalpia  $h_4$  deve-se tomar cuidado com o título do vapor.

Sempre se deve levar em conta que estes cálculos utilizam de um processo ideal, portanto, valores podem variar em um sistema de geração real, mas os mesmos apresentam resultados bem próximos e que servem bem para exemplificar um processo que utilize deste ciclo.

### 2.2.1 Geração de vapor

A utilização do vapor para processos industriais foi iniciada na época da Revolução Industrial, e até hoje esse recurso apresenta grande relevância e aplicação. Destacamos a aplicação do vapor em alguns segmentos da indústria, como por exemplo, alimentos, bebidas, têxtil, química, papel e celulose. Nesses processos o vapor pode ser utilizado para movimentar máquinas, para aquecimento, em atividades de limpeza e esterilização, entre outras aplicações.

O uso do vapor apresenta um aquecimento rápido e uniforme, elevado coeficiente de transferência térmica, além da facilidade no transporte. Para se produzir vapor é necessário o aquecimento da água até atingir a sua temperatura de evaporação. O processo para aquecer geralmente ocorre em uma caldeira e pode utilizar diversas fontes de combustível.

Para aumentar a eficiência energética, é possível também que a caldeira aproveite o calor residual de outros processos, como os gases de escape de uma turbina a gás.

A partir da caldeira, o vapor é transportado através de tubulação termicamente isolada até os locais de consumo, onde os processos irão realizar o seu aproveitamento. Sendo assim, o vapor pode ser considerado como uma forma de transferência de energia.

Para mensurar o nível de eficiência energética de um sistema de produção de vapor, são feitas avaliações energéticas que relacionam o trabalho produzido com o calor transferido, mapeando as perdas existentes no sistema.

A produção de vapor geralmente ocorre em um equipamento chamado caldeira. Essa tem o papel de gerar calor a partir de uma fonte primária de energia, que por sua vez transfere esse calor para um fluido, geralmente água, com o propósito de que o mesmo evapore, produzindo assim o vapor.

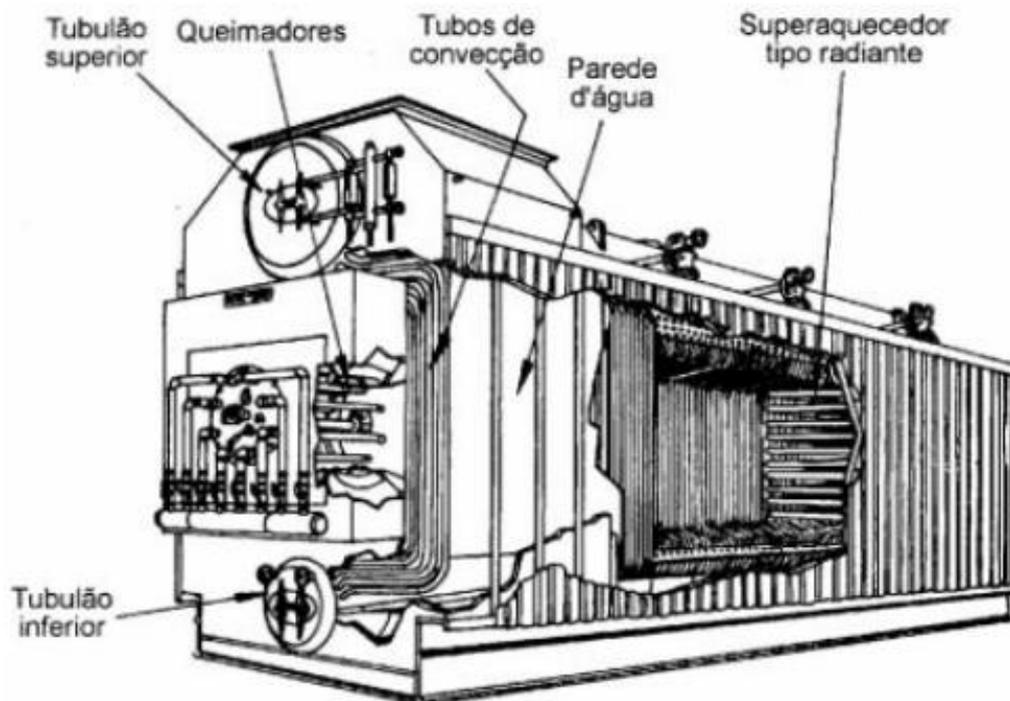
O processo de produção de vapor é realizado a uma pressão superior à pressão atmosférica, portanto há uma situação de risco operacional envolvida que requer controles, a fim de trazer segurança no processo de produção de vapor.

Para produzir o calor, podem ser queimados diversos tipos de combustíveis, bem como utilizar a energia elétrica aplicada em resistores ou eletrodos. O mais comum é a queima de combustível ou o reaproveitamento do calor residual de outros processos. Existem basicamente dois tipos de caldeiras que podem ser aplicados: os modelos “aquatubular” e “flamotubular”.

### 2.2.1.1 Caldeiras aquatubulares

As caldeiras aquatubulares são construídas de forma que a água circula por diversos tubos com diâmetro pequeno e que são dispostos na forma de uma parede de água, onde geralmente se encontram na câmara de combustão. A Figura 6 mostra um exemplo simplificado de como seria uma caldeira aquatubular.

Figura 6 – Esquema de uma caldeira aquatubular



Fonte: Bega (2003, p. 40).

Os gases de combustão são levados ao fundo da fornalha de onde podem ser reaproveitados ou não na passagem para a chaminé. A velocidade com que os gases de exaustão saem varia entre 5 e 30 m/s de acordo com o tipo de combustível. A produção de vapor por unidade de superfície de aquecimento é algo muito variável já que depende do tipo de fornalha empregada e do tipo de combustível que está sendo utilizado, uma caldeira de grande porte apresenta em média valores na ordem de 200 kg/m<sup>2</sup>h.

Caldeiras aquatubulares de grande porte são geralmente montadas em campo e normalmente em locais que permitem a livre dilatação térmica que ocorre durante o aquecimento, já caldeiras menores são entregues pré-montadas pelo próprio fabricante.

Para realizar a alimentação de água da caldeira é necessário utilizar bombas centrífugas de alta pressão além de a mesma possuir vazão superior à capacidade de produção de vapor da caldeira, o volume de água dentro da caldeira deve ser controlado pela bomba com cuidado, um evento de falta de água pode acarretar em um superaquecimento dos tubos no interior da caldeira, desgastando os mesmos ou em casos mais graves podendo acarretar em explosão (BAZZO, 1995).

As caldeiras aquatubulares podem ser construídas de acordo com a demanda do sistema de produção específico, adequando a faixa de produção de vapor ou de pressão, entretanto, sobre pressões maiores é necessário tomar o cuidado com a circulação natural da água, pois a circulação da água é consequência da diferença de peso específico entre o líquido e o vapor que tende a ser tanto menor quanto maior for a pressão de operação.

A separação entre vapor e água ocorre no tambor principal, o ideal é que o vapor deixe o tambor com título o mais próximo possível de 1. A produção de vapor com qualidade depende da carga da caldeira, pressão de trabalho e assim como de todos os dispositivos auxiliares instalados no tambor separador.

É necessário um rigoroso cuidado com a qualidade da água exigindo um tratamento químico específico para este tipo de processo. A qualidade do vapor em usinas termoelétricas tem que ser sempre maior, a umidade presente no vapor tem a tendência de arrastar sílica em quantidade tanto maior quanto maior for à pressão de operação da caldeira (BAZZO, 1995).

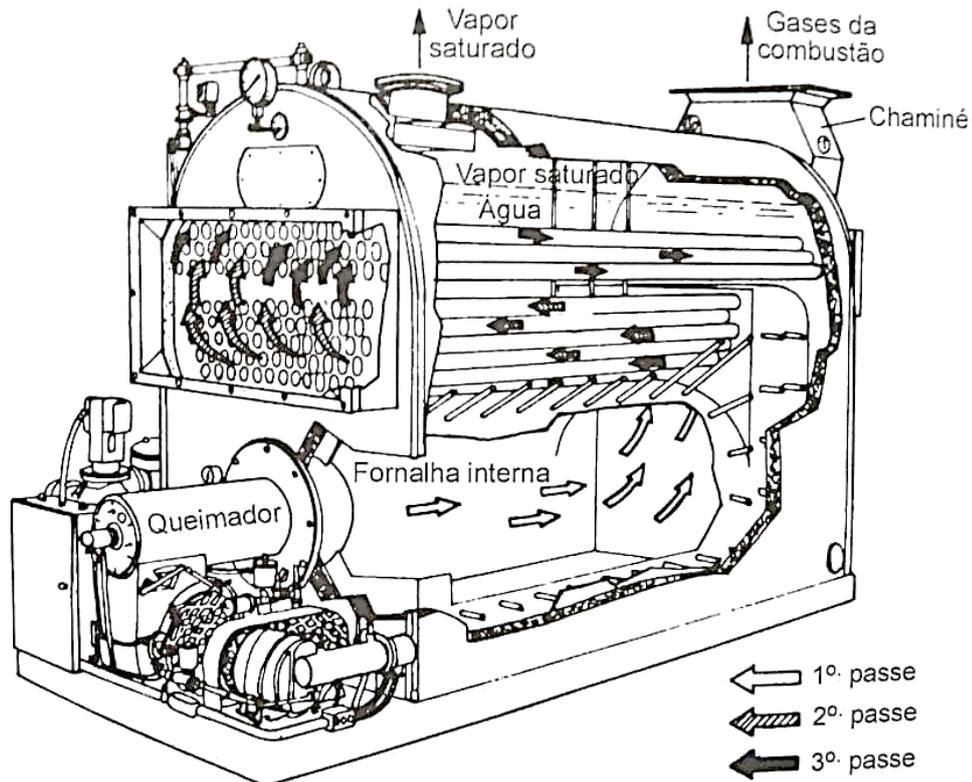
#### 2.2.1.2 Caldeiras flamotubulares

As caldeiras flamotubulares são constituídas em formato inverso as aquatubulares, neste caso a água circula ao redor de diversos tubos montados no interior da caldeira, os gases de exaustão produzidos na combustão circulam por dentro destes tubos, podendo passar duas ou mais vezes no interior antes de ir em direção à chaminé.

A primeira passagem, também chamada de fase; ocorre na própria fornalha. A segunda passagem ocorre por dentro dos tubos finos superiores, podendo ter mais fases conforme cada projeto, os tubos são unidos às bordas por solda ou expansão de suas extremidades. As bordas são montadas e reforçadas por estais soldados ao corpo cilíndrico externo da caldeira. Na Figura 7, podemos ver um exemplo simplificado de como seria uma caldeira flamotubular de 3 fases.

As caldeiras flamotubulares podem ser construídas tanto com fornalhas internas quanto externas, mas a produção de vapor por unidade de superfície de aquecimento é maior nas caldeiras com fornalha interna, podendo variar entre 30 e 40 kg/m<sup>2</sup>h, maiores números de passagens pelos tubos permite melhorar o aproveitamento de energia disponível nos gases de exaustão (BAZZO, 1995).

Figura 7 – Esquema de uma caldeira flamotubular



Fonte: Bega (2003, p. 37).

O nível de água no interior da caldeira tem que estar sempre inundando os tubos, pois a própria água serve para refrigerar as superfícies de aquecimento da caldeira, a construção da fornalha preferencialmente na base da caldeira ajuda a prevenir problemas em caso de falta de água, obtendo assim uma maior margem de segurança contra os perigos de superaquecimento nas tubulações e possivelmente explosão da caldeira.

As flamotubulares, mesmo com um bom rendimento térmico que gira em torno de 85% são limitadas na pressão e na produção de vapor, mesmo sendo mais simples que as aquatubulares, por questões econômicas e construtivas são restritas às indústrias que consomem menos de 10.000 kg de vapor saturado por hora, a pressões de trabalho que não ultrapassem 10 kgf/cm<sup>2</sup> (BEGA, 2003), tornando assim para grandes processos, menos competitivas que as caldeiras aquatubulares. Sua forma construtiva acaba por torná-la mais

vulnerável aos perigos de explosão, principalmente pelo fato de que a pressão do vapor está diretamente sobre as paredes da fornalha, tubos e carcaças externas.

Estas caldeiras apresentam menores gastos com manutenção, o tratamento químico da água também é importante, contribuindo com durabilidade e eficiência. Dispositivos de controle são implantados para garantir o suprimento de água através de uma bomba centrífuga com vazão sempre superior a capacidade de produção da caldeira. A caldeira produz vapor saturado com título variável entre 0,97 a 0,99. Na prática a qualidade que o vapor irá sair do tambor vai depender dos dispositivos de separação instalados na saída da caldeira.

### 2.2.1.3 Eficiência energética na produção de vapor

É possível implementar algumas medidas que aumentam a eficiência energética dos sistemas de geração de vapor.

Alguns processos necessitam de superaquecedores ou reaquecedores para que o vapor seja superaquecido após ser produzido. Para que isso ocorra, podemos aproveitar os gases de escape para realizar essa tarefa ou ainda o vapor pode recircular pela caldeira de forma a aproveitar o calor produzido no processo de evaporação.

Os economizadores são instalados na saída dos gases de tal forma a pré-aquecer a água que entra na caldeira, demandando menos calor para seu aquecimento até a temperatura de evaporação. Similar ao economizador, o pré-aquecedor reaproveita o calor de escape, com o objetivo de aumentar a temperatura do ar que entra no processo, elevando também a sua eficiência.

A regulagem da combustão serve para que a queima de combustível seja a mais eficiente possível, é importante regular a entrada de ar nesse processo, pois o excesso de ar reduz a eficiência da combustão. Na queima de combustíveis líquidos e gasosos, o controle de pressão e vazão também é um fator muito importante para a eficiência do processo.

Periodicamente deve-se verificar se a isolamento térmica da caldeira está em condições adequadas e, se necessário, deve-se realizar a devida manutenção reduzindo a dissipação de calor para o meio ambiente.

Realizando o controle permanentemente da qualidade da água reduz-se a formação de incrustações na superfície da tubulação, o que diminui a eficiência da troca térmica ocorrida na caldeira.

#### 2.2.1.4 Superaquecedores

Segundo Bazzo (1995) “superaquecedores são feixes tubulares determinados a elevar a temperatura do vapor proveniente do tambor da caldeira e são localizados para aproveitar melhor o calor disponível nos gases de combustão”.

Um fator crucial para a escolha de onde alocar o superaquecedor é a temperatura requerida pelo processo, temperaturas elevadas torna-se mais conveniente à instalação do superaquecedor o mais próximo possível da saída do tanque de combustão.

Geralmente os superaquecedores são classificados em dois tipos, os convectivos que são instalados nos trajetos dos gases de combustão onde a troca de calor se desenvolve por convecção e os radiantes em que geralmente são instalados no topo da câmara de combustão onde é predominante a troca de calor por radiação. A necessidade de vapor sob temperaturas mais elevadas, principalmente nas estruturas de maior porte tem exigido a instalação de superaquecedores em locais expostos ao calor radiante da fornalha. Algumas unidades têm superaquecedor dispostos junto às paredes laterais e frontais no alto da câmara de combustão.

Um problema apresentado no superaquecedores radiantes é que a temperatura de saída do vapor tende a diminuir com o aumento da carga da caldeira, porém geralmente se necessita de mais estabilidade na temperatura, isso resultou em modelos combinados entre superaquecedores radiantes e convectivos, os mistos são menos afetados pela variação da carga da caldeira (BAZZO, 1995).

Para projetar um superaquecedor é fundamental considerar vários fatores, dentre eles os que se destacam são a temperatura e a velocidade dos gases de exaustão, a temperatura e a velocidade do vapor, o arranjo e o posicionamento dos tubos e os tipos de materiais recomendados para os tubos e suportes.

A utilização dos materiais depende muito da faixa de temperatura, segundo Bazzo (1995, p. 95):

[...] para valores maiores que 420°C, recomenda-se aço carbono-molibdênio, acima de 520°C recomenda-se aço inoxidável carbono-níquel. Suportes espaçadores estão sujeitos a temperaturas maiores que os tubos por esses motivos são confeccionados em aço inoxidável para resistir grandes deformações e oxidações.

Superaquecedores são equipamentos de grande importância para sistemas de geração baseados no ciclo de Rankine, pois tornado o vapor superaquecido contribui com maior eficiência térmica, e também possibilita que o título do vapor esteja mais próximo de 1, diminuindo os impactos causados pelo vapor a turbina.

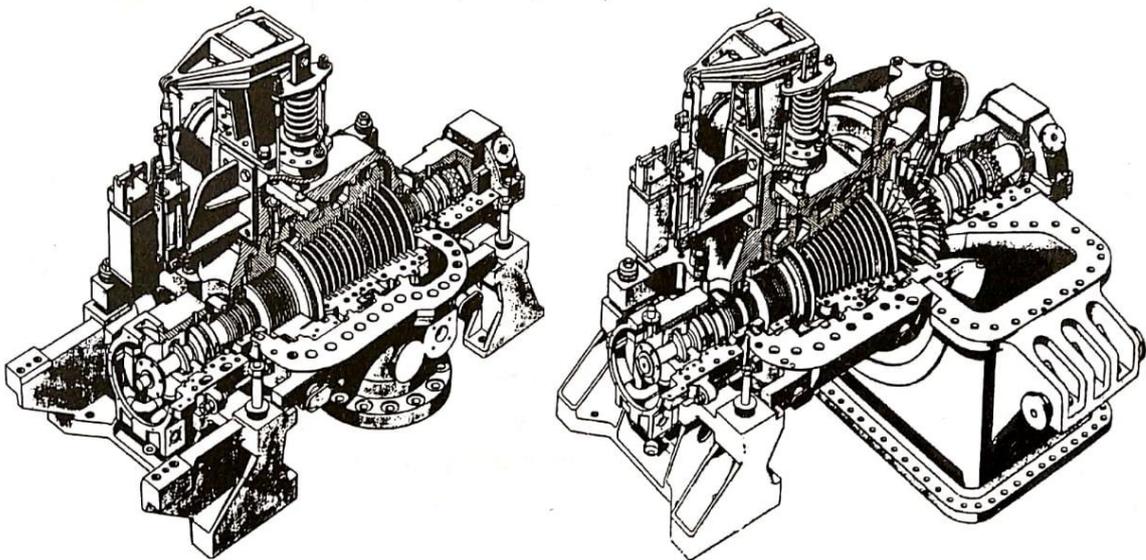
### 2.2.2 Turbinas

Uma turbina pode ser definida como um dispositivo no qual o trabalho desenvolvido resulta de um gás ou um líquido que passa através de um conjunto de lâminas fixas em eixo livre causando a rotação (MORAN, SHAPIRO, 2002), produzindo assim trabalho.

As turbinas são amplamente utilizadas nas instalações a vapor ou motores a gás, nessas aplicações o vapor superaquecido ou o gás entra na turbina e se expande até uma pressão mais baixa na saída da turbina produzindo o trabalho.

São fabricadas especificamente para cada aplicação, visando a maior eficiência e confiabilidade operacional possível. A importância da eficiência cresce à medida que aumenta a potência da máquina. São sempre construídas com múltiplos estágios, podendo ser de ação ou reação. As máquinas de ação possuem um primeiro estágio onde utiliza velocidade, seguido de vários estágios de pressão, já nas máquinas de reação, o primeiro estágio é de ação, seguido de vários estágios de reação (MARTINELLI JUNIOR, 2002). Na Figura 8 é mostrada a parte interna de uma turbina de múltiplos estágios.

Figura 8 – Formato interno de uma turbina a vapor (a) contrapressão (b) condensação



Fonte: Balestieri (2002, p. 103).

As turbinas a vapor empregadas no ciclo de Rankine convencional são geralmente turbinas de contrapressão ou então turbinas de condensação.

### 2.2.2.1 Turbina de condensação

Este tipo de turbina exige que haja um condensador na saída, o vapor de descarga tem pressão inferior à atmosférica.

Turbinas de condensação são usadas para assegurar geração todo o ano e não somente quando há processo de produção, normalmente tem extração ou tomadas de vapor no meio de seu corpo para a utilização em um processo ou a fim de aumentar a eficiência em outra parte do ciclo de Rankine.

### 2.2.2.2 Turbinas de contrapressão

Principal característica deste modelo é que não possui condensador e o vapor de escape está ligado a outro sistema que utiliza vapor a uma pressão mais baixa que a produzida pela caldeira. É muito utilizada em indústrias em que além de gerar sua própria energia elétrica, precisam de vapor a pressões moderadas para utilização industrial, como o aquecimento de estufas por exemplo. Amplamente utilizada em sistemas de cogeração. Porém este tipo de sistema geralmente só opera com o processo produtivo em funcionamento.

## 2.2.3 Condensador

“O condensador é um equipamento trocador de calor onde se realiza a transformação do vapor de exaustão da turbina para o estado líquido, fazendo o uso de água como fluido para o resfriamento” (STUCHI; TACONELLI; LANGHI, 2015).

O condensador típico tem em seu interior inúmeros tubos pelos quais circulam água fria destinada a realizar troca térmica com o vapor saturado injetado pelo duto que conecta a turbina do gerador. Esse processo é necessário para diminuir a temperatura do vapor e, mudar o estado para líquido saturado, isto é necessário, pois a bomba trabalha apenas com líquidos.

Como os últimos estágios das turbinas a vapor geralmente operam com pressão negativa, nessa região pode ocorrer à infiltração de ar, e para a manutenção do nível pressão nos condensadores é necessário que se remova constantemente os gases que não são condensáveis pelos ejetores que infiltram durante seu funcionamento (STUCHI; TACONELLI; LANGHI, 2015).

## 2.2.4 Gerador

Os geradores usados nas indústrias são baseados no princípio da indução magnética empregado por Faraday e Henry. Consistia em um disco de cobre que girava em um campo magnético formado pelos polos de um ímã de ferradura e assim produzia corrente contínua. Aproximadamente um ano depois, outro pesquisador obteve corrente alternada utilizando um gerador com ímãs e enrolamento de fio em uma armadura de ferro.

As máquinas elétricas foram se desenvolvendo em um ritmo acelerado, devido aos trabalhos de Antonio Pacinotti e Zénobe Gramme que introduziram o enrolamento em anel bem como o de Werner Siemens, que inventou o enrolamento em tambor utilizado até hoje.

### 2.2.4.1 Princípios de funcionamento

O gerador de energia alternada é um equipamento que converte energia mecânica em elétrica. O funcionamento é baseado na indução de força eletromotriz, sendo que o modelo mais simples é composto por uma espira. Fazendo a espira girar tem-se corrente elétrica.

Conforme Umans (2014, p. 190):

A conversão eletromagnética de energia ocorre quando surgem alterações no fluxo concatenado decorrentes do movimento mecânico. Nas máquinas rotativas, as tensões são geradas nos enrolamentos ou grupos de bobinas quando estes giram mecanicamente dentro de um campo magnético, ou quando um campo magnético gira mecanicamente próximo aos enrolamentos, ou ainda quando o 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 variável no tempo é gerada.

As máquinas CA podem ser classificadas em síncronas e de indução. Nas máquinas síncronas, as correntes do enrolamento e do rotor são fornecidas diretamente na parte estacionária do motor por meio de contatos rotativos. Já nas máquinas de indução, as correntes são induzidas nos enrolamentos do rotor combinando a variação, no tempo, das correntes de estator e do movimento do rotor em relação ao estator.

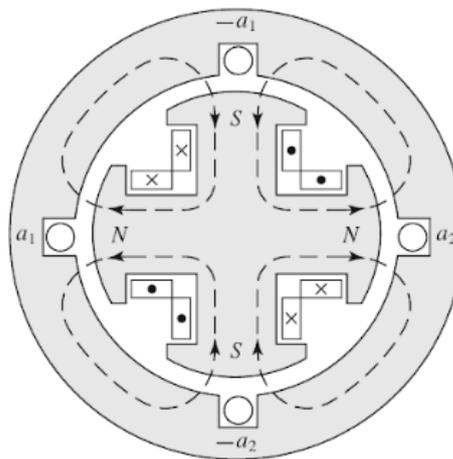
### 2.2.4.2 Gerador Síncrono

O desempenho de um gerador síncrono pode ser obtido analisando-se a tensão induzida na armadura do gerador síncrono CA de polos salientes. O enrolamento de campo é

excitado por uma corrente contínua que é levada até ele por meio de escovas estacionárias de carvão fazendo o contato com anéis coletores ou anéis deslizantes girantes. Há casos que o enrolamento de campo pode ser alimentado por um sistema de excitação rotativo, também conhecido como sistema de excitação sem escovas.

O enrolamento de armadura consiste em uma única bobina de  $N$  espiras. Os condutores que formam esses lados da bobina são paralelos ao eixo da máquina e são ligados em série por terminais de conexão. O rotor gira a uma velocidade constante a partir de uma fonte de potência mecânica conectada ao eixo. Na Figura 9 podemos ver o esquema dos polos de um gerador síncrono.

Figura 9 – Vista esquemática de um gerador síncrono, monofásico de quatro polos



Fonte: Umans, (2014, p. 195).

Conforme o rotor gira, o fluxo concatenado do enrolamento da armadura varia no tempo. Em uma máquina de dois polos, a tensão resultante na bobina será senoidal no tempo, onde resulta em um sinal ondulatório, passando por um ciclo completo a cada revolução da máquina. A frequência em ciclos por segundo é a mesma que a velocidade do rotor em rotações por segundo. Quando uma máquina possui mais de dois polos, pode-se observar apenas um par de polos e certificar de que as condições elétricas, magnéticas e mecânicas associadas aos demais pares de polos são repetições das do par analisado.

As estruturas com polos salientes são encontradas em geradores hidrelétricos, uma vez que as turbinas hidráulicas operam em velocidades relativamente baixas, sendo necessário um número elevado de polos para produzir a frequência desejada. Como as turbinas a vapor ou a gás operam com velocidades consideradas elevadas, os geradores a turbina, são em geral máquinas de rotor cilíndrico de dois ou quatro polos.

A maior parte dos sistemas de potência do mundo são trifásicos, e consequentemente, os geradores síncronos são máquinas trifásicas com pouquíssimas exceções. Para produzir um conjunto de três tensões defasadas em 120 graus elétricos no tempo, são utilizadas três bobinas defasadas de 120 graus elétricos no espaço.

#### 2.2.4.3 Gerador de Indução

Os enrolamentos do estator são basicamente os mesmos de uma máquina síncrona. Entretanto, os enrolamentos do rotor são eletricamente curto-circuitados sendo que muitas vezes não apresentam conexões externas. As correntes são induzidas por ação de um transformador a partir dos enrolamentos do estator. Diferentemente de uma máquina síncrona, os enrolamentos do rotor de uma máquina de indução não são excitados por uma fonte externa, ou seja, correntes são induzidas nos enrolamentos curto-circuitados do rotor quando este atravessa a onda de fluxo de armadura sincronicamente. Por isso as máquinas de indução são máquinas assíncronas e produzem conjugado<sup>3</sup> somente quando a velocidade do rotor é diferente da velocidade síncrona (UMANS, 2014).

### 2.3 REQUISITOS LEGAIS PARA CONEXÃO DE MICRO E MINIGERADORAS

Um sistema de cogeração aplicado à indústria deve se enquadrar em um sistema de micro ou minigeração distribuída e para ser conectado à rede o mesmo deve atender a resolução normativa N° 482 da ANEEL e aos requisitos impostos pelo Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição - Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, também elaborado pela ANEEL.

#### 2.3.1 Resolução normativa N° 482, de 17 de abril de 2012

A resolução N° 482 define que o consumidor brasileiro pode gerar sua própria energia elétrica a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e inclusive fornecer o excedente para a rede de distribuição de sua localidade.

Dessa forma, todo consumidor ativamente cadastrado no Ministério da Fazenda, por um CPF ou um CNPJ, tem concessão para conectar um sistema gerador de energia

---

<sup>3</sup> O conjugado, também conhecido por torque, é o esforço realizado por um motor, mais precisamente pelo centro do eixo do rotor do motor, quando realiza um trabalho de força ou de movimento.

elétrica próprio, oriundo de fontes renováveis (hidráulica, solar, eólica, biomassa ou cogeração qualificada), paralelamente às redes de distribuição das concessionárias.

Compreende-se microgeração e minigeração distribuída por:

- a) Microgeração – Central geradora de energia elétrica, com potência instalada menor ou igual a 75 kW e que utilize cogeração qualificada ou fontes renováveis de energia, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2012).
- b) Minigeração – Central geradora de energia elétrica, com potência instalada superior a 75 kW e menor ou igual a 5 MW, conectada na rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2012).

A potência do sistema varia entre os grupos de consumidores. Para o dimensionamento da potência instalada das centrais geradoras, ficou definido que para os consumidores do grupo A (alta tensão), atendidos em tensão igual ou superior a 2,3 kV, a potência total da central geradora fica limitada à demanda contratada presente na conta de energia elétrica da unidade consumidora (ANEEL, 2015).

Para os consumidores do grupo B (baixa tensão), que são atendidos por tensão inferior a 2,3 kV, a potência das centrais limita-se à carga instalada na unidade (ANEEL, 2015).

Havendo a necessidade de se instalar um sistema gerador com potência superior às definidas anteriormente, o consumidor tem a possibilidade de solicitar aumento da demanda contratada, no caso de unidade consumidora do grupo A ou aumento da carga instalada, no caso de unidade consumidora do grupo B.

Ainda, segundo a Resolução 482 da ANEEL, a taxa mínima cobrada para consumidores do Grupo A para o faturamento dessa energia fica definido que para consumidores do “grupo A” deve ser cobrado, no mínimo, o valor referente à demanda contratada, pois existe a possibilidade de a geração suprir completamente o consumo ativo de energia elétrica, não havendo faturamento excedente a ser cobrado (ANEEL, 2015).

Nos demais casos, o faturamento se dá pelo consumo de energia (ativo e reativo) nos horários de ponta e fora de ponta, já subtraídos os créditos energéticos do sistema de compensação no mesmo horário em que foi gerado.

Para os consumidores do “grupo B”, deverá ser cobrado, no mínimo, o valor referente ao custo de disponibilidade de acesso à rede, quando não houver consumo ativo faturado. Nos demais casos serão cobrados o consumo ativo, já subtraído os créditos energéticos do sistema de compensação (ANEEL, 2015).

### **2.3.2 Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica - PRODIST**

O Módulo 3 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional) define as condições necessárias para o acesso ao Sistema de Distribuição.

Tem como principal objetivo estabelecer as condições de acesso, compreendendo a conexão e o uso, ao sistema de distribuição, não abrangendo as Demais Instalações de Transmissão – DIT, além de definir os critérios técnicos e operacionais, os requisitos de projeto, as informações, os dados e a implementação da conexão, aplicando-se aos novos consumidores bem como aos existentes (ANEEL, 2017).

As etapas que constituem os procedimentos de acesso ao sistema de distribuição são a consulta de acesso, informação de acesso, solicitação de acesso e o parecer de acesso. Já as centrais geradoras interessadas em participar de leilões de energia, devem formalizar solicitação à distribuidora acessada para obter um documento de acesso para leilão.

Estabelece também alguns critérios técnicos e operacionais mínimos para o desenvolvimento de projetos de acesso ao sistema de distribuição, incluindo ampliações e reforços no sistema de distribuição, além de paralelismo de centrais geradoras e compartilhamento de instalações de conexão. Define também os requisitos a serem observados pelos consumidores que necessitam elaborar projetos de instalações de conexão.

Ao realizar a conexão de unidades consumidoras ao sistema de distribuição de baixa tensão, o responsável pelas instalações deve assegurar que as mesmas estejam em conformidade com as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Em caso de subestações de alta tensão devem ser apresentados no mínimo os diagramas unifilares, arranjos em geral, sistema de aterramento, diagramas esquemáticos, sistema de medição, entre outros.

O sistema de proteção das instalações do consumidor deverá ser compatível com os requisitos de proteção da acessada, sendo que a mesma deve disponibilizar as informações sobre o projeto e equipamentos a serem utilizados.

Dentre os procedimentos de recepção do ponto de conexão, podemos destacar a inspeção, os ensaios, a vistoria e a aprovação.

Estabelece requisitos para operação, manutenção e segurança das instalações, bem como as atribuições, diretrizes e responsabilidades do acessante e da acessada.

O sistema de medição deve atender às mesmas especificações que são exigidas para unidades consumidoras conectadas no mesmo nível de tensão da microgeração e

minigeração distribuída, porém com a funcionalidade de medição bidirecional de energia elétrica ativa.

Nele são encontradas todas as etapas do processo de solicitação de acesso, com suas respectivas ações e responsáveis por essas, além dos prazos para cumprir cada etapa.

## 2.4 REQUISITOS PARA CONEXÃO A REDE

Para que uma central geradora seja caracterizada como micro ou minigeradora distribuída, são obrigatórias as etapas de solicitação e de parecer de acesso. A solicitação de acesso é o requerimento feito pelo consumidor, que depois de entregue à distribuidora, torna o atendimento prioridade, de acordo com a ordem dos protocolos solicitados. Deve ser enfatizado que quando citado o consumidor em caso de micro e minigeração também é um gerador de energia elétrica e não apenas um consumidor, como os demais acessantes a rede.

Para realizar a solicitação de acesso, o consumidor deve preencher o Formulário de Solicitação de Acesso para micro e minigeração distribuída, disponíveis nos Anexos II, III e IV da seção 3.7 do Módulo 3 do PRODIST, cada um desses anexos corresponde a uma determinada faixa de potência instalada.

O prazo máximo para elaboração do parecer é de 15 dias para microgeração e de 30 dias para minigeração. Esses prazos são dobrados caso haja necessidade de obras de melhorias ou reforços no sistema de distribuição do consumidor. É importante salientar que é dever da distribuidora a responsabilidade pela coleta das informações acerca das unidades geradoras e enviar os dados à ANEEL para fins de registro.

Todo o sistema deve atender o Módulo 3 do PRODIST que trata desde o ponto de conexão da unidade geradora, que é o mesmo da unidade consumidora, até pontos mais específicos, como exemplo, a exigência de realizar a conexão com a frequência compatível com a da rede, que é de 60 Hz, e fazer o devido controle deste parâmetro.

Um ponto ressaltado no PRODIST é sobre o paralelismo das instalações do consumidor com o sistema da concessionária, onde o mesmo não pode causar problemas técnicos ou de segurança aos demais consumidores, ao sistema de distribuição em que está conectado e ao pessoal envolvido com a operação e manutenção da rede. O consumidor deve ajustar suas proteções de maneira a desfazer o paralelismo caso ocorra desligamento, antes da subsequente tentativa de religamento (ANEEL, 2017).

### 2.4.1 Sistema de proteção

Para a parte de proteção existem vários requisitos mínimos. Os ajustes das proteções das instalações do consumidor devem ser por ele calculados e aprovados pela concessionária de eletricidade, observando a requisitos detalhados em normas descritas no PRODIST. Todos os procedimentos de operação da proteção do sistema elétrico do consumidor devem estar definidos no acordo operativo firmado como a concessionária.

Conforme Kinderman (2012, p. 56):

A proteção dos sistemas elétricos de potência é feita por esquemas de proteção que, por sua vez, são basicamente comandadas por relés. A função primordial desses relés é identificar os defeitos, localizá-los da maneira mais exata possível e alertar a quem opera o sistema, promovendo o disparo de alarmes sinalizadores e também, dependendo do caso, promovendo abertura de disjuntores de modo a isolar o defeito.

Mantendo o resto do sistema em operação sem afetar os demais consumidores.

Uma série de equipamentos são necessários para garantir o bom funcionamento e a segurança, tanto do sistema de geração quanto da rede em que o mesmo está conectado em função da potência instalada do grupo gerador. O Quadro 1 mostra os equipamentos básicos requeridos para cada sistema.

Em casos de conexão do sistema de geração à rede com inversores de frequência o sistema é diferenciado, pois os mesmos já possuem inúmeros dispositivos de proteção integrados, o consumidor deve apresentar certificados atestando que os inversores foram ensaiados e aprovados conforme normas técnicas brasileiras ou normas internacionais, ou o número de registro da concessão do Inmetro para o modelo e a tensão nominal de conexão constantes na solicitação de acesso, de forma a atender aos requisitos de segurança e qualidade estabelecidos nesta seção.

Todos os equipamentos presentes no Quadro 1 podem ser necessários para determinadas centrais geradoras, neste contexto, será apresentado com mais detalhes aqueles necessários para todos os sistemas de geração independente de potência instalada. Dentre eles podemos destacar a importância dos relés, que segundo Kinderman (2012, p. 56):

Os relés são os elementos mais importantes do sistema de proteção. Eles são sensores que vigiam a operação do sistema elétrico, havendo alguma anomalia, como um curto-circuito, a corrente sensibiliza o relé que opera enviando um sinal para abertura do disjuntor, conseqüentemente o trecho defeituoso será desconectado.

Assim o sistema elétrico continua a operar com a mesma configuração anterior apenas desfalcado do trecho defeituoso.

Quadro 1 – Equipamentos necessários para conexão em função da potência instalada

<b>EQUIPAMENTO</b>	<b>Menor ou igual a 75 kW</b>	<b>Maior que 75 kW e menor ou igual a 500 kW</b>	<b>Maior que 500 kW e menor ou igual a 5 MW</b>
<b>Elemento de desconexão</b>	Sim	Sim	Sim
<b>Elemento de interrupção</b>	Sim	Sim	Sim
<b>Transformador de acoplamento</b>	Não	Sim	Sim
<b>Proteção de sub e sobretensão</b>	Sim	Sim	Sim
<b>Proteção de sub e sobrefrequência</b>	Sim	Sim	Sim
<b>Proteção contra desequilíbrio de corrente</b>	Não	Não	Sim
<b>Proteção contra desbalanço de tensão</b>	Não	Não	Sim
<b>Sobrecorrente direcional</b>	Não	Sim	Sim
<b>Sobrecorrente com restrição de tensão</b>	Não	Não	Sim
<b>Relé de sincronismo</b>	Sim	Sim	Sim
<b>Anti-ilhamento</b>	Sim	Sim	Sim
<b>Medição</b>	Medidor Bidirecional	Medidor 4 Quadrantes	Medidor 4 Quadrantes

Fonte: Os autores 2019.

Os princípios de funcionamento dos relés evoluíram muito com o tempo, porém sua filosofia de funcionamento continua a mesma. Os relés devem garantir proteção com sensibilidade, seletividade, rapidez, confiabilidade, robustez, vida útil longa e estabilidade, entre outros aspectos importantes para o bom funcionamento do sistema elétrico.

#### 2.4.1.1 Sistema de medição

O ajuste do sistema de medição é fundamental para medir a energia consumida e a gerada. O sistema de medição deve atender às mesmas especificações exigidas para unidades consumidoras conectadas ao sistema de acordo com sua faixa de tensão, acrescido da funcionalidade de medição bidirecional de energia elétrica.

Com o cenário exposto na tabela, considera-se necessário realizar a medição das seguintes grandezas elétricas pelos medidores eletrônicos no Brasil. Para os medidores de quatro quadrantes (bidirecionais para o fluxo de energia) é necessário medir a energia ativa consumida (+ kWh), a energia ativa fornecida à rede (- kWh), a energia reativa (kVArh) em cada um dos 4 quadrantes, demanda ativa (kW), demanda reativa (kvar), fator de potência com indicação de quadrante, potência ativa (W) com sinalização de sentido, potência reativa (var) com sinalização de quadrante, tensão (V), corrente (A), frequência (Hz). Além das grandezas elétricas, sugere-se que os medidores registrem outras informações como data, hora, duração de interrupção individual por unidade consumidora (DIC), frequência de interrupção individual por unidade consumidora (FIC), entre outras.

A distribuidora é responsável tanto por adquirir quanto instalar e realizar as manutenções necessárias do sistema de medição, sem custos ao consumidor no caso de microgeração distribuída, incluindo os custos de eventual substituição. Já para o caso de minigeração distribuída, o consumidor é responsável por ressarcir a distribuidora pelos custos de adequação do sistema de medição, nos termos da regulamentação específica.

Para o caso de conexão de central geradora em unidade consumidora existente, sem necessidade de aumento da potência disponibilizada, a distribuidora não pode exigir a adequação do padrão de entrada da unidade consumidora em função da substituição do sistema de medição existente, exceto se for constatado descumprimento das normas e padrões técnicos vigentes à época da sua primeira ligação, ou se houver inviabilidade técnica devidamente comprovada para instalação do novo sistema de medição no padrão de entrada existente (ANEEL, 2016).

#### 2.4.1.2 Sistema anti-ilhamento

O ilhamento não intencional deve ser detectado pelos parâmetros de proteção do sistema de geração distribuída, pois pode causar a diminuição da qualidade de energia, risco de vida as equipes de manutenção, bem como problemas na proteção do sistema de distribuição. Mas, segundo Marchesan (2016, p. 13):

Por outro lado, a detecção indevida pode ter como consequência a instabilidade do sistema interligado em casos de grande dependência de geração distribuída, diminuição da qualidade da energia e do fornecimento, bem como a diminuição da confiabilidade do sistema de distribuição e aumento do custo operacional.

No caso de operação em ilha do consumidor conectado à rede, a proteção de anti-ilhamento deve garantir a desconexão física entre a rede de distribuição e as instalações elétricas internas à unidade consumidora, incluindo a parcela de carga e de geração, sendo vedada a conexão ao sistema da distribuidora durante a interrupção do fornecimento (ANEEL, 2016).

#### 2.4.1.3 Relé de sincronismo

A função do relé de sincronismo é comparar a frequência entre duas fontes de geração ou entre a fonte e o sistema de distribuição de energia elétrica. É um dispositivo obrigatório quando se deseja operar duas ou mais fontes de energia em paralelo (MAMEDE FILHO, 2011).

O relé de sincronismo possui duas entradas de tensão, cada entrada destinada a uma das fontes de geração que serão sincronizadas. Assim, é possível colocar em paralelo dois geradores, ou um gerador e a rede da concessionária de energia elétrica, este último o mais comum para geração distribuída.

O relé de sincronismo compara o módulo das diferenças máximas entre as tensões de fase das fontes, o módulo das diferenças máximas entre as frequências de fase das fontes e o módulo das diferenças máximas entre as defasagens angulares de fase das fontes geradoras.

#### 2.4.1.4 Proteção de sub e sobrefrequência

Com relação à proteção de sub e sobrefrequência, os relés digitais calculam a frequência elétrica considerando uma janela de medição sobre no mínimo um ciclo da forma de tensão da barra em que o relé está conectado. Usualmente os relés apresentam ajustes temporizados e ajustes de mínima tensão de operação. Caso a frequência do sistema seja superior ou inferior ao ajuste durante um tempo ajustado e o valor de tensão for superior ao ajustado de mínima tensão de operação o relé envia um sinal para abertura do disjuntor.

#### 2.4.1.5 Proteção de sub e sobretensão

Os relés de subtensão são aparelhos destinados à proteção de sistemas elétricos submetidos a níveis de tensão inferiores aos valores mínimos que garantam as necessidades mínimas dos equipamentos elétricos em operação (MAMEDE FILHO, 2011).

Os níveis mínimos de tensão admitidos no sistema de potência são de 80 a 90% do valor nominal, ajustando os valores a 90% para unidades temporizadas e 80% para unidades instantâneas.

Os relés de sobretensão são aparelhos destinados à proteção de sistemas elétricos submetidos a níveis de tensão superiores aos valores máximos, que garantam a integridade dos equipamentos elétricos em operação (MAMEDE FILHO, 2011).

Já os níveis máximos de tensão admitidos num sistema de potência são de 110% do valor nominal, ajustando o relé com valores não superiores a 115% para unidades temporizadas e 120% para unidades instantâneas.

Os relés de subtensão e de sobretensão podem ser fornecidos para proteção monofásica, bem como para proteção trifásica. Esses aparelhos também podem ter tecnologia eletromecânica, eletrônica ou digital.

#### 2.4.1.6 Elemento de interrupção

Elemento de interrupção automático acionado por proteção para microgeradores distribuídos e por comando ou proteção para minigeradores distribuídos. Dispositivo de interrupção também chamado de dispositivo de paralisação é um dispositivo de controle utilizado principalmente para desativar um equipamento e mantê-lo fora de operação. Este dispositivo pode ser operado manualmente ou eletricamente de modo local ou remoto (KINDERMANN, 2012). Geralmente utilizam-se disjuntores ou chaves fusíveis.

#### 2.4.1.7 Elemento de desconexão

Os elementos de desconexão mais empregados são as chaves separadoras ou chaves seccionadoras, que compreende em um dispositivo interruptor do tipo chave que só é alterável sem carga, utilizado para possibilitar manobras com o objetivo de mudança na configuração do sistema elétrico, A operação da seccionadora pode ser motorizada com controle local ou remoto (KINDERMANN, 2012).

#### 2.4.1.8 Proteções extras

- a) Transformador de acoplamento: transformador de interface entre a unidade consumidora e rede de distribuição.

- b) Proteção contra desequilíbrio de corrente: o relé de inversão de fase ou desequilíbrio das correntes de fase opera quando as correntes das fases estiverem sequência inversa, ou quando as correntes das fases forem desequilibradas ou contiverem componentes de sequências negativas acima de certo valor ajustado.
- c) Proteção contra desbalanço de tensão: o relé de balanceamento de tensão opera quando a diferença de tensão de dois circuitos ultrapassar um valor ajustado no relé.
- d) Sobrecorrente direcional: o relé de sobrecorrente direcional opera somente quando a corrente elétrica alterada flui em uma determinada direção com valor maior do que o seu pré-ajustado.
- e) Sobrecorrente com restrição de tensão: o objetivo neste caso é de diferenciar a situação de sobrecarga normal da situação de sobrecarga por curto-circuito.

## 2.5 ANÁLISE ECONÔMICA

Analisar se um investimento é rentável ou não é de grande importância, devido “a escassez dos recursos frente às necessidades ilimitadas faz com que cada vez mais se procure otimizar sua utilização. A análise prévia de investimentos permite que se racionalize a utilização dos recursos de capital. Para a solução de um problema de análise de investimentos, dentro da complexidade do mundo atual, é necessário o conhecimento de técnicas especiais” (CASAROTTO FILHO; KOPITKE, 2000).

### 2.5.1 Fluxo de caixa

O fluxo de caixa consiste na representação gráfica de receitas e despesas proporcionadas por um projeto de investimento, sendo que no eixo horizontal são apontados os períodos considerando uma unidade de tempo em meses ou anos. O desembolso de capital ou saída de investimentos é representado por setas que apontam para baixo, enquanto as entradas de valores ou retorno do investimento são representadas por setas que apontam para cima.

A Tabela 1 apresenta o fluxo de caixa do projeto em que o investimento na data zero corresponde a R\$ 10.000,00 e os retornos do investimento, de R\$ 2.000,00, ocorrem durante cinco meses.

Tabela 1 – Diagrama de fluxo de caixa

Meses	Capitais
0	(R\$ 10.000,00)
1	R\$ 2.000,00
2	R\$ 2.000,00
3	R\$ 2.000,00
4	R\$ 2.000,00
5	R\$ 2.000,00

Fonte: Os autores 2019.

### 2.5.2 Taxa de juros

A taxa de juros é de grande importância, “todas as transações que envolvem dinheiro, ou mais genericamente capital, devem ser analisadas considerando-se os juros envolvidos explicitamente ou implicitamente. Uma compra à vista também é analisada considerando-se juros.” (CASAROTTO FILHO; KOPITTKKE, 2000). Representa o “valor do dinheiro” e relaciona os valores presente e futuro, ou seja, pode ser entendida como a remuneração do capital aplicado, conforme a Equação (6).

$$F = P(1 + i) * n \quad (6)$$

- a) F = representa o valor futuro;
- b) P = representa o valor presente;
- c) i = corresponde à taxa de juros;
- d) n = é o número de períodos.

### 2.5.3 Métodos de avaliação de investimentos

“Os investimentos mais rentáveis deverão ser analisados de acordo com critérios financeiros, os quais mostrarão os efeitos do investimento na situação financeira da empresa, por exemplo, como o investimento irá afetar o capital de giro da empresa” (CASAROTTO FILHO; KOPITTKKE, 2000). A avaliação do projeto de investimento deve contemplar o período de tempo necessário para recuperar o capital investido conforme o fluxo de caixa elaborado. O intervalo de tempo para recuperar o capital investido é denominado payback.

Se na avaliação não for considerado a taxa de juros, o método de avaliação é denominado payback simples; se for considerado, é denominado payback descontado.

O método geral de análise do payback está representado matematicamente pela Equação (7):

$$\text{Payback} = \frac{\text{investimento total}}{\text{retorno anual}} \quad (7)$$

### 2.5.3.1 Payback simples (PBS)

É um método simples de avaliação empregado para apurar o tempo de retorno de investimento, e compara com o tempo máximo permitido pelo investidor.

A primeira e a segunda coluna da Tabela 2 representam o fluxo de caixa de um investimento. A terceira coluna apresenta o tempo de retorno do capital, ou seja, o saldo do projeto. O retorno obtido após o primeiro ano de investimento, segundo o fluxo de caixa, é de R\$ 800,00 e resulta em um saldo negativo de R\$ 1.700,00.

Tabela 2 – Payback simples

<b>Anos</b>	<b>Capitais</b>	<b>Saldo do projeto</b>
<b>0</b>	-R\$ 2.500,00	-R\$ 2.500,00
<b>1</b>	R\$ 800,00	-R\$ 1.700,00
<b>2</b>	R\$ 750,00	-R\$ 950,00
<b>3</b>	R\$ 980,00	R\$ 30,00
<b>4</b>	R\$ 650,00	R\$ 680,00
<b>5</b>	R\$ 1.050,00	R\$ 1.730,00

Fonte: Os autores 2019.

Na coluna saldo de projeto, verifica-se que o retorno do investimento ocorre durante o segundo ano, quando o retorno passa a ser positivo.

É importante salientar que o saldo do projeto é sempre negativo até que ocorra o payback. Se o saldo do projeto ficar negativo até a conclusão do tempo de análise, significa que o investimento não terá retorno.

### 2.5.3.2 Payback descontado (PBD)

A metodologia de avaliação é semelhante à do payback simples, mas a diferença reside na taxa de juros, considerando a desvalorização da moeda durante a implantação do projeto.

A Tabela 3 apresenta o payback descontado, onde a primeira coluna refere-se ao período utilizado, a segunda indica os valores do fluxo de caixa, a terceira aponta os valores do fluxo de caixa descontada a taxa de juros considerada, enquanto os valores financeiros acumulados são apresentados na quarta coluna.

Tabela 3 – Payback descontado

<b>Anos</b>	<b>Capitais</b>	<b>Capital descontado</b>	<b>Saldo do projeto</b>
<b>0</b>	-R\$ 2.500,00	-R\$ 2.500,00	-R\$ 2.500,00
<b>1</b>	R\$ 800,00	R\$ 727,27	-R\$ 1.772,73
<b>2</b>	R\$ 750,00	R\$ 619,83	-R\$ 1.152,89
<b>3</b>	R\$ 980,00	R\$ 736,29	-R\$ 416,60
<b>4</b>	R\$ 650,00	R\$ 443,96	R\$ 27,35
<b>5</b>	R\$ 1.050,00	R\$ 651,97	R\$ 679,32

Fonte: Os autores 2019.

Considerando uma taxa de 10%, os valores apresentados na terceira coluna foram obtidos através da divisão dos valores da segunda coluna por  $1,1$  (juro de 10%). Para cada um dos anos a divisão é feita considerando os períodos  $(1,1)^2$   $(1,1)^3$  - segundo e terceiro anos, respectivamente.

Nesse caso o retorno do investimento ocorre ao longo do terceiro ano, tendo em vista que o último valor negativo está no ano três.

### 2.5.3.3 Valor Presente Líquido (VPL)

Este método é amplamente utilizado como método de avaliação de projetos, pois apresenta a contribuição do investimento no aumento do valor da empresa.

A Tabela 4 apresenta o fluxo de caixa de um empreendimento. Aplicando o método do VPL, avalia-se se o projeto deve ser aceito considerando uma taxa mínima requerida de 12% ao ano.

O valor presente líquido do fluxo de caixa apresentado na tabela é maior do que zero, portanto, o investimento deve ser aceito.

Caso a soma de todos os retornos do projeto na data zero sejam maiores do que o investimento, o valor presente líquido é positivo e o projeto deve ser aceito. Se o VPL for negativo deve-se recusar o projeto, pois o investimento estará reduzindo o valor da empresa.

Tabela 4 – Método do VPL

Meses	Capitais
0	-R\$ 600.000,00
1	R\$ 120.000,00
2	R\$ 150.000,00
3	R\$ 130.000,00
4	R\$ 90.000,00
5	R\$ 180.000,00
6	R\$ 210.000,00
7	R\$ 140.000,00

Fonte: Os autores 2019.

A Equação (8) apresenta o método de cálculo do valor presente líquido.

$$VPL = -FC_0 + \frac{FC_1}{(1+i)^1} + \frac{FC_1}{(1+i)^2} + \dots + \frac{FC_1}{(1+i)^n} \quad (8)$$

Onde:

- a)  $FC_0$ : fluxo de caixa investimento inicial;
- b)  $FC_n$ : fluxo de caixa no tempo;
- c)  $n$ : quantidade de períodos;
- d)  $i$ : taxa interna de retorno.

#### 2.5.3.4 Taxa Interna de Retorno (TIR)

“A taxa interna de retorno de um fluxo de caixa é a taxa para a qual o valor presente líquido do fluxo é nulo” (CASAROTTO FILHO; KOPITTKKE, 2000). A taxa interna de retorno, representada pela Equação (9), de um investimento representa a taxa de juros que zera o valor presente líquido. Portanto, se a taxa mínima requerida for menor do que a TIR, teremos um VPL positivo.

$$VP = capital + \sum_{t=1}^n \frac{Ft}{(1+i)^t} \quad (9)$$

Onde:

- a)  $VP$ : valor presente;
- b)  $capital$ : valor do investimento;
- c)  $Ft$ : entrada de capital no período  $t$ ;

### **3 ANÁLISE TÉCNICA DE UM PROJETO DE COGERAÇÃO**

Para projetar um sistema de cogeração serão abordadas duas empresas com processos diferentes que dispõem de recursos variados, mostrando com mais clareza detalhes que devem ser observados quando se tem o intuito de estudar a possibilidade de instalação de um sistema de geração utilizando do vapor disponível no processo.

A primeira empresa atua no ramo madeireiro e possui uma caldeira de pequeno porte em sua produção, já a segunda empresa atua no ramo de graxaria onde faz a preparação de subprodutos do abate, a mesma tem a necessidade de instalar uma caldeira nova, permitindo assim dimensioná-la para geração de energia em conjunto com o processo produtivo da empresa.

#### **3.1 TERMOMAD COMÉRCIO DE MADEIRA**

O primeiro projeto tem em vista atender a necessidades energéticas da empresa Termomad Comércio de Madeira Ltda. localizada em Gravatal – SC, cidade esta pertencente à Associação de Municípios da Região de Laguna-AMUREL.

A Empresa Termomad trabalha com madeiras de Pinus e Eucalipto atendendo a diversos setores como construção civil, indústria de móveis, indústrias de esquadrias, setor moldureiro, e todos os setores que necessitem de madeira.

O principal serviço oferecido pela Termomad é a secagem e armazenamento de madeira, atendendo pequenas e grandes empresas do setor na região. Para executar a parte de secagem de madeira a empresa conta com três estufas em conjunto com uma caldeira.

A caldeira que a empresa possui é da empresa Benecke Irmãos & Cia Ltda. Uma caldeira flamotubular com capacidade de gerar mais de 2.000 Kg/h de vapor e com máxima pressão de trabalho estipulada pelo fabricante em 10 kgf/cm<sup>2</sup>, área de aquecimento dos tubos de 80 m<sup>2</sup> e o combustível utilizado é na maior parte cavaco e um pouco de tocos de sobras dos produtos. A caldeira utilizada na empresa foi fabricada em 1986 e está em perfeitas condições de operação.

##### **3.1.1 Escolha da turbina**

O primeiro passo é buscar uma turbina que se encaixe aos parâmetros da caldeira e das necessidades do processo produtivo da madeireira. A caldeira possui capacidade de

trabalhar em 10 kgf/cm<sup>2</sup>, no entanto, as estufas da empresa trabalham hoje com pressão de entrada variando de 6 a 7 kgf/cm<sup>2</sup>, havendo então a possibilidade de consumir 4 kgf/cm<sup>2</sup> apenas para geração de energia elétrica. Mas, apenas usar essa variação de pressão com vapor saturado com temperatura próxima de 180°C não é algo muito interessante, o ideal é superaquecer o vapor para melhorar o rendimento da turbina e fornecer mais entalpia ao vapor com pouco consumo a mais de combustível, uma vez que geralmente se aproveita os gases de escape para isso.

Em contato com fornecedores de caldeira foi verificado que a máxima temperatura alcançada superaquecendo o vapor na saída com este modelo de caldeira é algo em torno de 220°C. A partir destes valores começou-se a buscar uma turbina que pudesse ser instalada em série com as estufas da Termomad, aproveitando o calor gerado para geração de energia elétrica e térmica, conseqüentemente as estufas serviriam como condensador e o sistema continuaria fechado.

As empresas nacionais em que foi entrado em contato apenas falavam em inviabilidade devido a esta queda de pressão ser muito baixa, todos os modelos encontrados necessitavam de entradas com valores de pressão elevados.

Buscou-se então turbinas internacionais que pudessem atender este sistema, no entanto, encontrar turbinas de baixa pressão é uma tarefa complicada. Em contato com empresas internacionais foi encontrado modelos que se encaixavam com o sistema segundo os fabricantes, mas estudando melhor o processo para verificar a vazão de vapor para o processo, este parâmetro tornou o sistema inviável tecnicamente.

O grande empecilho que tornou o projeto inviável para a Termomad é o fato de o processo não ter um fluxo de vapor constante, o que resulta em períodos de consumo de vapor que em determinados momentos fica muito abaixo de 2.000 kg/h ou então até sem vazão, isso acabaria por acionar a turbinas em períodos curto de tempo e outro espaço curto ela estaria parada. Turbinas não são projetadas para trabalharem desta forma, principalmente pelo tempo em que elas levam para vencer seu estado estacionário e entrar em estado de funcionamento linear.

Para que o sistema pudesse ser implantado seria necessária uma vazão de vapor mais constante ou então maior, vazões maiores resultariam em gerações ainda mais interessantes, e para se ter um rendimento realmente satisfatório a queda de pressão teria de ser um pouco maior. A entrada em 10 kgf/cm<sup>2</sup> teria um bom rendimento se a saída fosse de até 4 kgf/cm<sup>2</sup>.

Se a caldeira da Termomad disponibilizasse de uma maior produção de vapor poderia ser estudada a possibilidade de instalar o sistema em paralelo com o processo produtivo, no entanto, seria necessário um condensador para transformar o vapor em água novamente na saída da turbina para manter o circuito de água fechado, o que resulta em perda de calor para o ambiente.

### 3.2 NIEHUES NUTRIMENTOS

O segundo projeto visa atender as necessidades energéticas da empresa Niehues Nutrimentos Ltda. localizada em São Ludgero – SC, cidade que também pertencente à Associação de Municípios da Região de Laguna-AMUREL.

Esta empresa atua no ramo de graxaria desde 1993 tendo como atividade principal a preparação de subprodutos do abate.

Os produtos e subprodutos provenientes das graxarias como o sebo industrial e as farinhas, atendem principalmente os mercados de rações animais especialmente para aves, além de farmacêutico, cosméticos entre outras aplicações industriais.

A partir do abate de bovinos e suínos, bem como o de outras espécies, obtém-se carne e seus derivados para o consumo humano. Para que uma empresa possa realizar esta operação e ainda fazer o processamento industrial da carne, é necessário estar regulamentada a várias normas sanitárias.

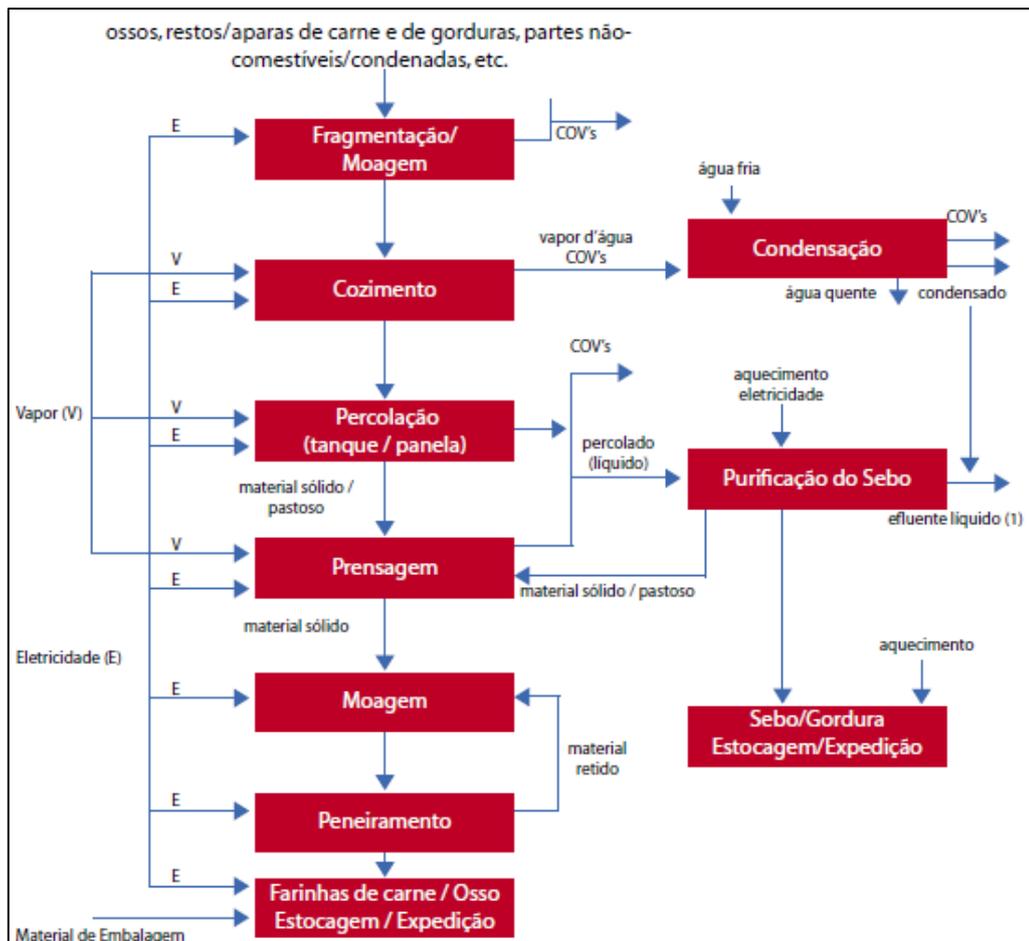
Como consequência do abate, originam-se vários subprodutos e resíduos que devem sofrer processamentos específicos, como couro, sangue, ossos, gorduras, tripas, animais ou suas partes condenadas pela inspeção sanitária, entre outros. Normalmente, a destinação dos resíduos tem características diferentes de uma região para outra, podendo ser vendido algumas partes para processamento obtendo-se componentes, ou ainda pode ser enviado tudo para as graxarias. Independente da maneira, processamentos e destinações adequadas devem ser dadas a todos os resíduos e subprodutos do abate, visando atender às leis e normas sanitárias e ambientais vigentes.

Nas graxarias são realizados os processamentos dos subprodutos e resíduos dos abatedouros, frigoríficos e açougues, como sangue, ossos, cascos, chifres, gorduras, aparas de carne e vísceras não comestíveis. Seus produtos principais são o sebo ou gordura animal destinado à indústria de sabões, sabonetes e indústria química e farinhas de carne e ossos para rações animais. As atividades produtivas dessas empresas são reguladas e fiscalizadas pelas

autoridades sanitárias do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA seguindo, por exemplo, a Instrução Normativa Nº15/2003.

Na Figura 10, tem-se o fluxograma e as descrições gerais das etapas importantes do processo em graxarias e indicadas as principais entradas e saídas de cada etapa.

Figura 10 – Fluxograma típico de graxaria – produção de sebo e de farinhas de ossos



Fonte: São Paulo, 2006.

A empresa dispõe atualmente de uma caldeira com capacidade de produzir 6.000 kg/h de vapor a uma pressão de 10 kgf/cm<sup>2</sup> a uma temperatura de vapor saturado que segundo Moran, Shapiro e Munson (2011) é de 202°C. No entanto, seu processo utiliza os 6.000 kg/h de vapor a uma pressão menor que 8 kgf/cm<sup>2</sup>.

O vapor é utilizado principalmente para abastecer os digestores onde é realizado o cozimento dos resíduos que operam durante 14 horas por dia. Todavia, a empresa visa um crescimento próximo de 10% em um ano e para atender essa nova demanda é necessário adquirir uma nova caldeira para auxiliar a já existente e trazer mais confiabilidade ao sistema.

Vislumbrando essa possibilidade, será feito o dimensionamento da caldeira visando implantar em conjunto um sistema de cogeração que atenda tanto a atual necessidade de vapor quanto o consumo de energia elétrica.

### 3.2.1 Escolha da turbina

Tendo em vista a possibilidade de realizar o dimensionamento da caldeira, o primeiro passo é estudar o consumo de energia elétrica da empresa para a partir disto calcular a potência de geração necessária para que a empresa seja autossuficiente em geração de energia elétrica. O consumo de energia elétrica da empresa está apresentado na Tabela 5, onde o período analisado foi o de setembro de 2018 até agosto de 2019.

Tabela 5 – Consumo de energia elétrica da Niehues Nutrimentos

Nº	Mês/ano	Consumo Fat. (kWh/mês)
1	set/18	143.741
2	out/18	142.582
3	nov/18	150.634
4	dez/18	152.354
5	jan/19	152.466
6	fev/19	135.845
7	mar/19	123.211
8	abr/19	140.116
9	mai/19	133.712
10	jun/19	136.510
11	jul/19	136.363
12	ago/19	135.678

Fonte: Os autores 2019.

Através do levantamento foi calculada a média de consumo de energia elétrica da empresa através da Equação (10).

$$\text{Consumo médio} = \frac{(\sum_1^{n^\circ \text{ de meses}} \text{Consumo mês } x)}{n^\circ \text{ de meses}} \quad (10)$$

Chegando a um consumo médio de 140.267,7 kWh/mês, ou seja, para que a empresa se torne autossuficiente seria necessário que a mesma gerasse esta quantia

mensalmente. Porém, percebemos que seu processo produtivo que utiliza vapor funciona apenas 14 horas diárias variando de 5 a 6 dias semanais totalizando cerca de 22 dias. Com isso, sabe-se que gerar energia elétrica apenas quando o processo que utilize vapor estiver em operação teremos um período de aproximadamente 308 horas mensais.

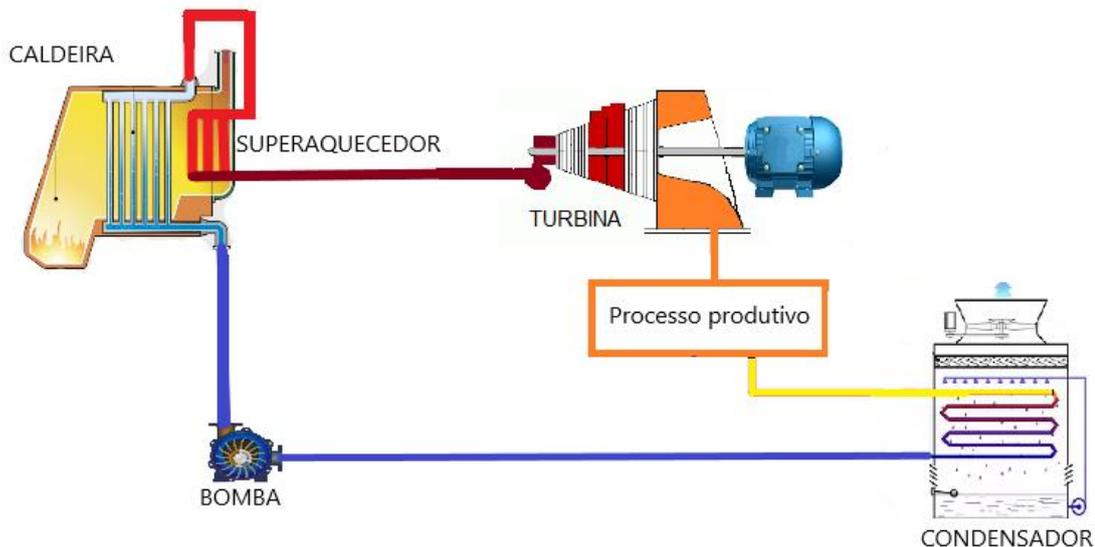
Para obtermos a potência de geração necessária a ser instalada utiliza-se a Equação (11), onde se divide o consumo médio mensal pela média de horas em que há consumo de vapor na empresa.

$$Pg = \frac{\text{Consumo médio}}{\text{Horas em operação}} \quad (11)$$

A partir disso se obtém uma potência requerida aproximada de 455,41 kW.

A ideia inicial foi de buscar uma turbina de contrapressão que nos fornecesse no mínimo 455,41 kW de geração conforme a topologia apresentada na Figura 11, disponibilizando na saída os 6.000 kg de vapor por hora a uma pressão de 8 kgf/cm<sup>2</sup> com temperatura de vapor saturado. Os parâmetros de entrada seriam dimensionados conforme a necessidade da turbina para fornecer esta potência de geração.

Figura 11 – Topologia com sistema de contrapressão



Fonte: Os autores 2019.

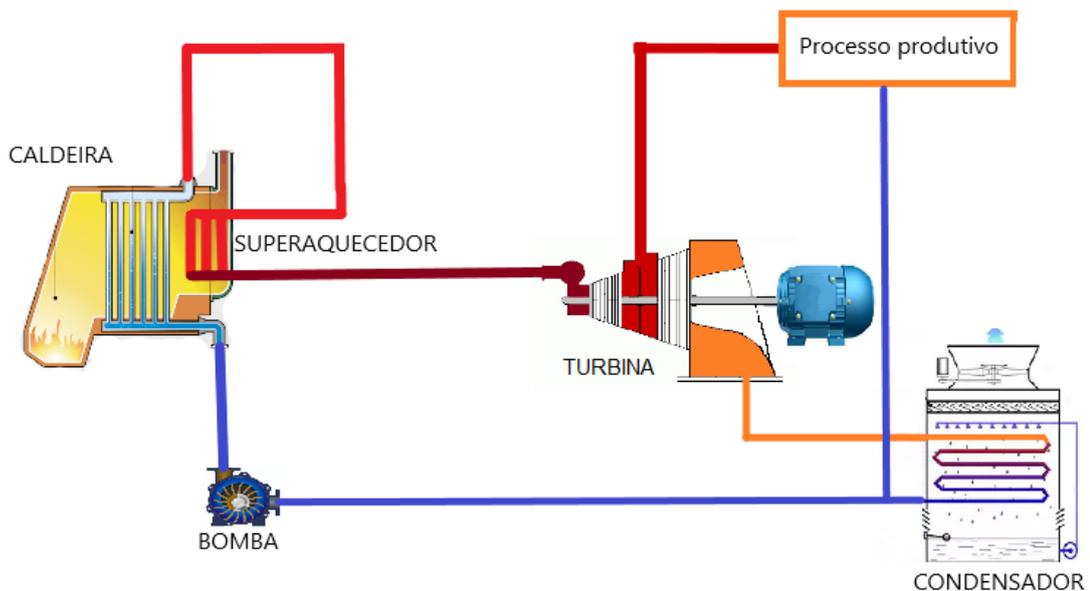
No entanto, ao entrar em contato com fabricantes nacionais de turbinas foi verificado que este sistema tem um baixo rendimento, e mesmo utilizando de caldeiras

flamotubulares de alta pressão, que para estes modelos é comum encontrar até 23 kgf/cm<sup>2</sup>, a geração ainda não supriria a demanda de energia elétrica da empresa.

Através do contato com os fabricantes, foi constatado que para sistemas de contrapressão se tornarem viáveis é necessário um maior consumo de vapor em sua planta industrial, consumindo, por exemplo, a partir de 10.000 kg de vapor por hora, tornando o estudo mais interessante podendo viabilizar o sistema.

Outra alternativa, é a de utilizar um sistema com turbina de condensação com extração de vapor, conforme apresenta a Figura 12, de acordo com as necessidades da empresa.

Figura 12 – Topologia com sistema de condensação com extração



Fonte: Os autores 2019.

No entanto, os equipamentos comerciais disponíveis e que são compatíveis para estes sistemas são capazes de gerar uma quantia de energia muito superior ao necessário para abater o consumo de energia elétrica da empresa. É possível sim gerar somente o necessário para a empresa, no entanto, estaria se fazendo um mal aproveitamento do equipamento, já que estes equipamentos podem gerar 1 MW/h quando acoplados a caldeiras flamotubulares de alta pressão, além de estar diminuindo a vida útil da turbina.

Vale ressaltar que é possível personalizar uma turbina para uma geração um pouco inferior, mas os gastos para implantar um sistema completo destes seria igual ou muito próximo de um sistema de 1 MW de potência. Isso se deve, ao fato de que ambos os níveis de potência necessitam de caldeiras de alta pressão, mudando a vazão ou algum outro parâmetro,

assim como dos custos com sistemas de controle, obra civil, transporte, tubulação, projeto, homologação entre outros gastos extras.

Várias empresas possuem turbinas para essa faixa de pressão e de vazão, como a Solidda Energia, TGM do grupo WEG, Turbimaq e A1 Energia dispõem de sistemas que poderiam atender a este tipo de empreendimento.

Utilizando valores comuns para os modelos de caldeiras flamotubulares e adotando como parâmetros de entrada uma vazão de 12.000 kg/h e uma pressão de 21 kgf/cm<sup>2</sup>, foi possível escolher um sistema de condensação com extração apresentado por uma empresa, onde essa extração disponibilizaria 6.000 kg/h de vapor a uma pressão de 9 kgf/cm<sup>2</sup>, que atenderia o processo produtivo. Este sistema teria uma potência de geração de 1.200 kW de acordo com a empresa fornecedora, possibilitando ainda o fechamento da extração sem interromper a geração. No entanto, é necessário diminuir a vazão da caldeira para 6.000 kg/h e manter a pressão, tal mudança limitaria a geração para aproximadamente 900 kW.

Figura 13 – Turbina de condensação (a) Turbimaq (b) Solidda



Fonte: Solidda, 2019 e Turbimaq, 2019.

### 3.2.2 Cálculo de potência pelo ciclo de Rankine

Com a utilização da turbina citada anteriormente, será apresentado os cálculos térmicos do sistema de geração proposto, a fim de comparar com os valores passados pelo fabricante, onde temos como base os valores nominais da caldeira para a operação da turbina. O Quadro 2 mostra os parâmetros de entrada, extração e saída da turbina para a utilização nos cálculos.

Pelo fato de a turbina ter uma extração, será necessário dividir o cálculo em duas partes, a primeira parte contendo a queda de pressão de 21 kgf/cm<sup>2</sup> para 9 kgf/cm<sup>2</sup>, denominada de parte de alta, e a segunda contendo a queda de pressão de 9 kgf/cm<sup>2</sup> para 0,2 kgf/cm<sup>2</sup>, denominada de parte de baixa.

Quadro 2 – Parâmetros do sistema de geração

PARÂMETROS	Entrada	Extração	Saída
Pressão do vapor	21 kgf/cm <sup>2</sup>	9 kgf/cm <sup>2</sup>	0,2 kgf/cm <sup>2</sup>
Pressão do vapor	2.059,4 kPa	882,6 kPa	19,6 kPa
Temperatura do vapor	300°C	230°C	60°C
Vazão de vapor	12.000 kg/h	6.000 kg/h	6.000 kg/h
Vazão de vapor	3,3333 kg/s	1,6667 kg/s	1,6667 kg/s

Fonte: Os autores 2019.

Para calcular a potência disponibilizada no eixo pela parte de alta é necessário utilizar valores de entalpia para vapor superaquecido, valores conhecidos que segundo Van Wylen e Sonntag (1993) é de 3.021,76 kJ/kg para vapor à 2.059,4 kPa e com temperatura de 300°C e de 2.901,97 kJ/kg para vapor à 882,6 kPa e com temperatura de 230°C.

Então, utilizando a Equação (4) para a parte de alta, tem-se:

$$\frac{Wt}{m} = 3021,76 - 2901,97 = 119,79 \text{ kJ/kg} \quad (12)$$

Resultado este que multiplicado pela quantidade de vapor em que passa pela parte de alta, teremos a potência disponibilizada no eixo da turbina:

$$Wt = 119,79 * 3,3333 = 399,2778 \text{ kJ/s} \quad (13)$$

O valor de entalpia na entrada de baixa da turbina já é conhecido, mas a entalpia na saída não, isto porque na saída da turbina temos vapor misturado à água, e para determinar a entalpia, antes é necessário determinar o título do vapor. É possível determinar o título específico através de cálculos que utilizam da entropia dos valores de pressão na entrada e saída de baixa da turbina, conforme mostra a Equação (14).

$$x = \frac{sve - sls}{svs - sls} * 100 \quad (14)$$

Para a Equação (14), têm-se *sve* como a entropia do vapor na entrada de baixa da turbina que é de 6,892012 kJ\*k/kg, *sls* a entropia do líquido na saída da turbina que é de 0,824592 kJ\*k/kg e *svs* como a entropia do vapor na saída da turbina que é de 7,918164 kJ\*k/kg, segundo Van Wylen e Sonntag (1993). Substituindo os valores na Equação (14) se obtém um título de 85,677%.

Portanto, teremos 85,677% da entalpia do vapor saturado a 0,2 kgf/cm<sup>2</sup>, que segundo Van Wylen e Sonntag (1993) é de 2.609,7 kJ/kg e 14,323 % da entalpia do líquido saturado para essa pressão que é 251,38 kJ/kg.

$$h4 = (2608,85 * 0,85677) + (284,997 * (1 - 0,85677)) = 2270,92 \quad (15)$$

Sendo assim a entalpia na saída da turbina é de 2.270,92 kJ/kg. Agora utilizando a Equação (4) para a parte de baixa, tem-se:

$$\frac{Wt}{m} = 2901,97 - 2270,92 = 631,05 \text{ kJ/kg} \quad (16)$$

Deste modo multiplicando esse valor pela quantidade de vapor em que passa pela parte de baixa, teremos:

$$Wt = 631,05 * 1,6667 = 1051,7552 \text{ kJ/s} \quad (17)$$

Para obter a potência disponível total, basta somar a geração da parte de alta com a da parte de baixa, obtendo assim uma potência de 1.451,033 kJ/s o que corresponde a 1.451,033 kW/h de geração.

Potência essa superior à garantida pelo fabricante, isso pelo fato de não se considerar a eficiência do conjunto gerador. A eficiência pode ser definida pela Equação (18).

$$nt = \frac{Pot\ g}{Pot\ c} * 100\% \quad (18)$$

Onde temos como *Pot g* a potência gerada garantida pelo fabricante que é de 1.200 kW e *Pot c* a potência calculada.

$$nt = \frac{1200}{1451,033} * 100\% = 82,6997\% \quad (19)$$

Ou seja, podemos definir que 82,699% da energia disponível no eixo da turbina é transformada em energia elétrica.

No entanto, a potência de 1.200 kW corresponde ao gerado no tempo em que o processo está em funcionamento. Quando a empresa suspende a utilização de vapor em seu processo é necessário fechar a extração, e para que a turbina continue funcionando é fundamental diminuir a geração de vapor na caldeira para 6.000 kg/h, conseqüentemente diminuindo a potência de geração e a eficiência da turbina, já que a mesma é projetada para operar utilizando mais vapor na parte de alta.

Entretanto, é necessário calcular novamente a potência, agora sem a extração, onde se tem apenas a queda de pressão de 21 kgf/cm<sup>2</sup> para 0,2 kgf/cm<sup>2</sup>, e para isso usaremos novamente a Equação (4) com os valores de entalpia apresentados anteriormente.

$$\frac{Wt}{m} = 3021,76 - 2270,92 = 750,84 \text{ kJ/kg} \quad (20)$$

Este valor que quando multiplicado pela quantidade de vapor em que passa pela turbina, resulta na energia disponível no eixo da turbina, conforme apresenta a Equação (21).

$$Wt = 750,84 * 1,6667 = 1251,42 \text{ kJ/s} \quad (21)$$

Potência essa superior a garantida pelo fabricante de 900 kW, isso é possível por não se considerar a eficiência do conjunto gerador que para essa situação se torna menor. A eficiência pode ser definida pela Equação (18), substituindo os valores se tem:

$$nt = \frac{900}{1251,42} * 100\% = 71,918\% \quad (22)$$

Ou seja, podemos definir que 71,918 % da energia disponível no eixo da turbina é transformada em energia elétrica, eficiência bem inferior à do caso anterior pelo fato de a turbina estar sobre dimensionada para esta atividade. No entanto, o fabricante garante ser mais interessante operar deste modo do que deixar a turbina parada nas horas em que não há consumo de vapor, pois o tempo que ela levaria até atingir seu limiar de geração é considerável, além de não serem projetadas para estar parando e voltando frequentemente.

Outro ponto interessante é levantar a quantidade de energia gerada pela caldeira que é aproveitada em todo o ciclo, assim, se tem uma ideia de quanto do combustível é aproveitado de forma eficaz. É possível calcular essa eficiência através da Equação (23).

$$ng = \frac{m3(h1 - h4) + m2 * (h1 - h2) + m3(h4 - h5)}{m1(h1 - h6)} * 100\% \quad (23)$$

- a.  $m1$  = vazão mássica total = 3,333 kg/s;
- b.  $m2$  = vazão mássica na parte de baixa da turbina = 1,667 kg/s;
- c.  $m3$  = vazão mássica no processo da empresa = 1,667 kg/s;
- d.  $h1$  = entalpia na saída da caldeira = 3.021,76 kJ/kg;
- e.  $h2$  = entalpia na saída de baixa da turbina = 2.270,92 kJ/kg;
- f.  $h4$  = entalpia na saída da extração = 2.901,97 kJ/kg;
- g.  $h5$  = entalpia na saída do processo = 284,997 kJ/kg;
- h.  $h6$  = entalpia na entrada da caldeira = 287,08 kJ/kg;

Substituindo todos os valores na Equação (23), chega-se a uma eficiência de 63,766% para o momento em que o processo está utilizando vapor, este valor representa a eficiência na utilização da energia térmica disponibilizada pela caldeira, tanto para geração elétrica quanto para o processo produtivo. Este valor é relativamente alto para sistemas térmicos de geração de energia elétrica, devido ao uso de vapor no processo, fato que torna a cogeração um sistema atraente no ponto de vista de eficiência energética.

No entanto, quando fechado a extração se tem uma mudança na Equação (23) já que não é mais aproveitado o calor para a atividade produtiva, gerando apenas 6.000 kg/h de vapor na caldeira. O cálculo fica conforme a Equação (24):

$$n_g = \frac{m_2(h_1 - h_2)}{m_2(h_1 - h_6)} * 100\% \quad (24)$$

Substituindo todos os valores na Equação (24), chega-se a 27,46 % de eficiência para o momento em que o processo não está utilizando vapor, isto se deve ao fato que parte da energia que a caldeira forneceu para o vapor se perdeu no condensador.

### 3.2.3 Consumo de combustível

É possível também determinar a quantidade de combustível que deverá ser queimada na caldeira a fim de gerar energia térmica necessária para a geração elétrica e para o processo produtivo da empresa. O combustível será o cavaco de madeira de pinus e eucalipto, produzido em grande quantidade na região da Amurel. Parte deste cavaco é produzido com restos do processo produtivo de madeiras da região e outra parte vem da extração de madeira de reflorestamentos, apenas para sua transformação em cavaco.

Segundo Filippo Filho (2014), é possível determinar a energia fornecida por um equipamento térmico através do poder calorífico inferior (PCI) do combustível e a sua vazão ( $m$ ) para a combustão, conforme mostra a Equação (25).

$$E = m * PCI \quad (25)$$

Portanto, para calcular o consumo é necessário saber a energia fornecida pela caldeira, que pode ser calculada através da Equação (3), e o PCI (poder calorífico inferior) do cavaco utilizado.

Assim como a turbina, a caldeira também irá operar em dois regimes, um com produção de 6.000 kg/h de vapor durante 10 horas e outro com produção de 12.000 kg/h de vapor durante 14 horas, resultando em uma variação no consumo de combustível.

A energia fornecida pela caldeira no momento em que produz 12.000 kg/h de vapor que corresponde a 3,333 kg/s é dada pela Equação (26).

$$Q_{entra} = 3,333 * (3021,76 - 287,08) = 9144,68 \text{ kJ/s} \quad (26)$$

No entanto, parte dessa energia gerada pela caldeira é usada no processo produtivo da empresa, ou seja, não é um gasto exclusivo do sistema de geração de energia

elétrica. É possível determinar essa diferença descontando da Equação (26) a quantidade de energia térmica usada na produção da empresa.

$$Q_{entra} = 9144,68 - (1,667 * (2901,97 - 284,997)) = 4782,19 \text{ kJ/s} \quad (27)$$

Já a energia fornecida pela caldeira no momento em que produz 6.000 kg/h de vapor que corresponde a 1,667 kg/s é dada pela Equação (28).

$$Q_{entra} = 1,667 * (3021,76 - 287,08) = 4558,71 \text{ kJ/s} \quad (28)$$

Tabela 6 – PCI de diferentes combustíveis

Combustível	PCI
Casca de eucalipto	3.750 Kcal/kg
Cavaco (eucalipto)	4.300 Kcal/kg
Cavacos de pinus	2.500 Kcal/kg
Coque de lenha	7.600 Kcal/kg
Serragem de pinho (40% água)	2.000 Kcal/kg
Serragem seca (20% água)	3.500 Kcal/kg
Pó de madeira fino (seco)	4.000 Kcal/kg
Pó de madeira grosso (seco)	4.200 Kcal/kg
Sobra de serraria (pinho)	4.160 Kcal/kg

Fonte: Modificado pelos autores de TEC 2019.

O PCI da madeira é muito variado conforme a umidade e o tipo de madeira, uma média pode ser adotada para um valor de umidade que varia de 25% a 40% para o cavaco é apresentado na Tabela 6, obtendo 2.500 kCal/kg, cerca de 10.460 kJ/kg.

Então, usando a Equação (25), tem-se o seguinte cenário para a alta produção de vapor:

$$m = \frac{9144,68}{10460} = 0,8742 \quad (29)$$

A quantia de massa a ser queimada na caldeira para produzir 12.000 kg/h de vapor, é de 0,8742 kg por segundo, cerca de 3.147,31 kg por hora. Descontando a quantia de energia térmica usada no processo da empresa se tem:

$$m = \frac{4782,19}{10460} = 0,4572 \quad (30)$$

A quantia de massa a ser queimada na caldeira para produzir 12.000 kg/h de vapor que é usada para geração de energia elétrica, é de 0,4572 kg por segundo, cerca de 1.645,87 kg por hora. Já para a produção de 6.000 kg/h de vapor tem-se o seguinte cenário.

$$m = \frac{4558,71}{10460} = 0,4358 \quad (31)$$

A quantia de massa a ser queimada na caldeira é de 0,4358 kg por segundo, cerca de 1.568,96 kg por hora. O Quadro 3 apresenta a quantidade total de cavaco consumida por dia, já o Quadro 4 apresenta a quantidade de cavaco descontando a parte usada no processo, considerando apenas o que é destinado a geração de energia elétrica da empresa.

Quadro 3 – Consumo total de cavaco

<b>PERÍODO</b>	<b>Geração De Vapor</b>	<b>Consumo De Cavaco</b>	<b>Horas</b>	<b>Consumo</b>
<b>Segunda a Sexta</b>	12.000 kg/h	3.147,31 kg	14	44.062,34 kg
	6.000 kg/h	1.568,96 kg	10	15.689,60 kg
	Total por dia			59.751,94 kg
<b>Sábado e Domingo</b>	12.000 kg/h	3.147,31 kg	0	0
	6.000 kg/h	1.568,96 kg	24	37.655,12 kg
	Total por dia			37.655,12 kg

Fonte: Os autores 2019.

Quadro 4 – Consumo descontado de cavaco

<b>PERÍODO</b>	<b>Geração De Vapor</b>	<b>Consumo De Cavaco</b>	<b>Horas</b>	<b>Consumo</b>
<b>Segunda a Sexta</b>	12.000 kg/h	1.645,87 kg	14	23.042,18 kg
	6.000 kg/h	1.568,96 kg	10	15.689,60 kg
	Total por dia			38.731,78 kg
<b>Sábado e Domingo</b>	12.000 kg/h	1.645,87 kg	0	0
	6.000 kg/h	1.568,96 kg	24	37.655,12 kg
	Total por dia			37.655,12 kg

Fonte: Os autores 2019.

Vale ressaltar que este consumo foi calculado com base no PCI do cavaco de pinus, adotando 2.500 kCal/kg, valor relativamente baixo já que pode conter grande

quantidade de madeiras de eucalipto no meio, na qual dispõem de um PCI de até 4.300 kCal/kg, podendo assim diminuir o consumo consideravelmente.

### 3.2.4 Geração de energia elétrica

Com as potências de geração definida é possível estipular a quantia de energia elétrica a ser gerada em um determinado intervalo de tempo. As potências utilizadas são as garantidas pelo fabricante, tendo 1.200 kW para o período em que o processo produtivo da empresa estiver em funcionamento e 900 kW para o período de pausa na utilização de vapor da empresa.

Outro fator importante é o consumo de energia elétrica dos sistemas auxiliares do conjunto de geração, que segundo o fabricante é bem próximo de 200 kW, diminuindo assim a geração líquida do sistema.

A empresa Niehues Nutrimentos utiliza vapor em sua produção durante um intervalo de 14 horas diárias, possibilitando a geração de 1.200 kW, no entanto esse processo opera apenas de segunda a sexta, sendo que sábado e domingo irá gerar apenas 900 kW. O Quadro 5 apresenta a geração por períodos de operação, onde leva em conta o consumo dos sistemas auxiliares para ambos os modos de operação, visto que o sistema de condensação irá operar em todo momento que o sistema estiver em funcionamento.

Quadro 5 – Geração diária por modelo de operação

<b>PERÍODO</b>	<b>Geração</b>	<b>Potência Bruta</b>	<b>Potência Descontada</b>	<b>Horas</b>	<b>Geração</b>
<b>Segunda a Sexta</b>	com extração	1.200 kW	1.000 kW	14	14.000,00 kWh
	sem extração	900 kW	700 kW	10	7.000,00 kWh
	Total por dia				21.000,00 kWh
<b>Sábado e Domingo</b>	com extração	1.200 kW	1.000 kW	0	0
	sem extração	900 kW	700 kW	24	16.800,00 kWh
	Total por dia				16.800,00 kWh

Fonte: Os autores 2019.

Levando em conta que em um mês comum se tem em média 8 dias de finais de semana e mais 22 dias de semana, é possível determinar a geração média de energia em um mês. O Quadro 6 apresenta a geração de um mês comum.

Quadro 6 – Geração mensal

<b>PERÍODO</b>	<b>Dias</b>	<b>Geração Em Um Dia</b>	<b>Geração Em Um Mês</b>
<b>Segunda a Sexta</b>	22	21.000,00 kWh	462.000,00 kWh
<b>Sábado e Domingo</b>	8	16.800,00 kWh	134.400,00 kWh
<b>Mês</b>	Total		596.400,00 kWh

Fonte: Os autores 2019.

Ao analisar o Quadro 6, se tem um resultado próximo de 600.000,00 kWh de energia por mês, algo bem superior que o consumido pela empresa que é em média de 140.267,67 kWh no mês. Deve-se buscar uma alternativa para este excedente.

#### 3.2.4.1 Consórcio de geração distribuída

Gerar mais que o consumido não traz benefícios para a empresa, então é necessário encontrar uma forma de tratar esse excedente de energia elétrica gerada pelo sistema que é de 456.132,33 kWh em um mês.

Neste cenário há duas possibilidades mais comuns, a primeira é vender a energia no mercado livre, e a segunda é de entrar na geração compartilhada em um consórcio com outra empresa que possua um consumo próximo deste excedente.

Segundo Resolução Normativa N°482 esta modalidade é caracterizada pela união de consumidores dentro da mesma área de concessão ou permissão da distribuidora, composta por pessoa jurídica, que possua unidade consumidora com microgeração ou minigeração distribuída em local diferente das unidades consumidoras nas quais a energia excedente será compensada.

Este modelo de geração distribuída compartilhada foi garantido pela Resolução Normativa N°687, uma atualização da Resolução Normativa N°482 a qual permite associar dois ou mais empreendimentos para que tenham sua conta de energia elétrica abatida (ANEEL, 2015). Neste cenário, as empresas associadas dividem os gastos com a implantação e operação do sistema visando diminuir os custos com energia elétrica ao longo do tempo.

A cidade de São Ludgero é conhecida pelas suas grandes empresas de plásticos e grandes madeireiras o que torna essa opção viável.

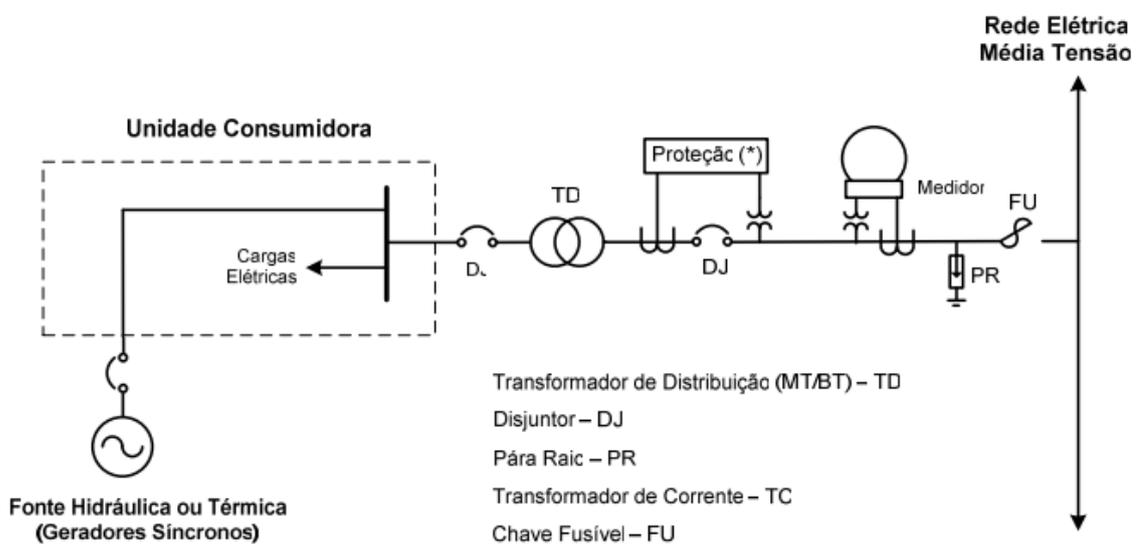
Caso o sistema de geração fosse de posse de uma pessoa física, seria possível se unir com mais pessoas a fim de dividir a geração.

### 3.2.5 Conexão do sistema de geração a rede

Para conectar o sistema na rede elétrica da CEGERO é necessário fazer algumas alterações, a primeira delas se trata do contrato de demanda da empresa Niehues Nutrimentos, hoje o contrato de demanda é de 474 kW na ponta e fora de ponta. No entanto, é necessário contratar a demanda conforme a geração, exigindo assim uma alteração de 1.000 kW fora de ponta e de 700 kW na ponta. Esses valores exigiriam um pequeno ajuste na produção de energia elétrica conforme os horários de ponta, que para a CEGERO é das 18:30 até as 21:30, sendo assim, para melhorar os custos neste período não se deve gerar mais que 700 kW.

A outra alteração necessária para a conexão do gerador é a implantação de uma subestação elevadora de 1MW, visto que o gerador proposto pelo fabricante da turbina é da marca ABB, que opera em baixa tensão (380V) e a rede na qual será conectado é de média tensão (13,8 kV). Na Figura 14, temos um diagrama que representa um modelo simplificado de como deve ser a conexão do sistema.

Figura 14 – Diagrama simplificado de conexão à rede da CEGERO



Fonte: CELESC, 2018.

Ao adquirir um sistema de geração distribuída como o proposto para a Niehues Nutrimentos é necessário introduzir um sistema de medição bidirecional, com um medidor de 4 quadrantes, onde é possível medir a potência ativa e reativa importada e exportada da empresa.

A inclusão de geradores distribuídos nas redes de subtransmissão e de distribuição de energia elétrica traz muitos benefícios, mas também algumas dificuldades, envolvendo

desde questões técnicas até aspectos econômicos e regulatórios, sendo assim, os sistemas de distribuição necessitam de um pouco mais de atenção, uma vez que inicialmente foram projetados para operar, tendo como fonte de energia para as cargas, apenas a subestação da concessionária. “Portanto, a instalação de geradores distribuídos em tais redes deve ser necessariamente precedida de uma série de estudos detalhados para avaliar os possíveis impactos desses novos geradores na operação das redes de distribuição e seus efeitos no sistema de subtransmissão e de transmissão de energia elétrica” (MOZINA, 2001 *apud* LINO, 2007).

Vale ressaltar que os geradores distribuídos necessitam de proteção, não somente contra curtos-circuitos, mas também contra outras anomalias que podem ocorrer nos equipamentos da geração distribuída, tais como sobretensão, desbalanço de correntes, sobre-excitação e perda de sincronismo.

Normalmente, as funções de proteção para conectar um gerador distribuído à rede elétrica são determinadas por cada concessionária, não havendo um padrão bem determinado. Com o aumento do interesse pela instalação de sistemas distribuídos, a ANEEL, através do PRODIST, elaborou um documento que serve de base e recomenda o uso de algumas funções de proteção para se realizar esta conexão de acordo com o nível de potência instalada. No entanto, as funções utilizadas nesses sistemas de proteção são dotadas de uma codificação ANSI visando uma padronização.

Conforme apresentado no tópico 2.4.1 (sistema de proteção) os elementos necessários para conexão de um sistema com potência maior que 500 kW e menor ou igual a 5 MW são os seguintes:

- a) O elemento de desconexão é uma chave seccionadora visível e acessível que a concessionária usa garantindo a desconexão da central geradora durante uma manutenção em seu sistema.
- b) O elemento de interrupção possui ação automática sendo acionado por um comando ou proteção no caso de minigeradores distribuídos.
- c) O transformador de acoplamento é também conhecido como um transformador de interface, para conexão da unidade consumidora com a rede de distribuição, servindo como uma proteção galvânica entre a rede e o sistema.
- d) ANSI 27 – Função de proteção contra subtensão: o relé faz a proteção tanto da rede, quanto do gerador distribuído evitando quedas de tensão que possam prejudicar os equipamentos. É temporizado a fim de evitar que o paralelismo seja desfeito, como por exemplo, na partida de um motor, em que se houver o

desligamento justamente neste momento há um grande risco de se ter afundamento de tensão, podendo ser prejudicial para toda a instalação caso permaneça por muito tempo (GOMES, 2018).

- e) ANSI 59 – Função de proteção contra sobretensão: este relé opera quando a tensão se eleva acima de certo valor, sendo que este foi determinado por normas relacionadas ao máximo de tensão de linha a ser fornecida (GOMES, 2018).
- f) ANSI 81 – Função de proteção contra sub/sobrefrequência: opera quando a frequência da rede muda do valor nominal que é 60 Hz, se mantendo por um determinado tempo fora de uma margem pré-estabelecida ou quando ultrapassa instantaneamente uma faixa de frequência pré-determinada (LINO, 2007).
- g) ANSI 46 – Função de proteção contra desbalanço de corrente: normalmente aplicada para proteção de sistemas geradores com capacidade acima de 500 kW, prevenindo que o gerador sofra com correntes desbalanceadas que ocasionam o sobreaquecimento do rotor da máquina. O ajuste desta função deve ser determinado pelo proprietário do equipamento a ser protegido, uma vez que cada gerador suporta diferentes correntes desbalanceadas (GOMES, 2018).
- h) ANSI 47 – Função de proteção contra desbalanço de tensão: proteção contra desequilíbrio de fase resultante de inversão de fase, alimentação desequilibrada ou falha distante detectada pela medição da tensão de sequência negativa. Com esta função é possível identificar o sentido de rotação do fasor de tensão por meio de leituras do desbalanço. Tem na sua maior parte a função de proteger a rede da distribuidora de inserção de uma tensão desbalanceada no ponto de conexão. Para fazer a regularização da tensão realiza-se a abertura do disjuntor.
- i) ANSI 67 – Função de proteção contra sobrecorrente direcional de fase: tem como objetivo a eliminação de faltas em certo sentido de circulação de sobrecorrentes. Vastamente utilizada na proteção de linhas e barras, mas também pode ser empregada na proteção interna de geradores. Para ajustar esta função é necessário um estudo detalhado das instalações da parte do consumidor. É interessante a instalação de duas funções 67, tanto no sentido do consumidor para a concessionária e vice-versa (GOMES, 2018).
- j) ANSI 50/51 – Função de proteção contra sobrecorrente instantânea/temporizada: esta função procura detectar situações de

sobrecorrente causadas por falta fase-terra, fase-fase, fase-fase-terra ou trifásicas e procura eliminar o período faltoso para que a elevada corrente não provoque danos aos equipamentos das instalações. O ajuste desta função é baseado em curvas de tempo inverso e curvas de tempo definido, visando a melhor parametrização e atuando quando detecta corrente elevada em qualquer direção da rede (GOMES, 2018).

- k) ANSI 50N/51N – Função de proteção contra sobrecorrente de neutro instantânea/ temporizada: tem a função de identificar facilmente as faltas a terra. A partir de uma leitura da componente zero presente no neutro do circuito é possível detectar uma falta no sistema. Identificada essa situação, o relé demanda a abertura do disjuntor para eliminar esta condição (GOMES, 2018).
- l) ANSI 51V – Função de proteção contra sobrecorrente com restrição de tensão: é utilizada com a finalidade de tornar a proteção mais sensível a falta, tendo como base o nível de variação de tensão. Empregada principalmente em geradores com geração acima de 500 kW e serve como uma retaguarda para a função 67 por conta de faltas bifásicas e trifásicas, pois muitas vezes esta função não é sensibilizada para níveis de curto-circuito influenciados por tensão (GOMES, 2018).
- m) ANSI 25 – Função de verificação de sincronismo ou sincronização: faz a verificação de sincronismo, controlando o fechamento do disjuntor de acoplamento mediante certas condições de variação de tensão, frequência e ângulo entre os sistemas. Deve ser empregado de preferência em todos os disjuntores responsáveis pelo paralelismo do sistema gerador com a rede. Essa função também é responsável por garantir que não haverá o fechamento entre a rede e o gerador mediante uma desenergização, podendo conectar-se novamente somente 2 minutos após o reestabelecimento da tensão na rede (GOMES, 2018).
- n) A proteção de anti-ilhamento usando gerador síncrono conectado à rede de distribuição, fornece energia elétrica com uma frequência constante conforme a requerida pela rede local. A queda ou elevação da frequência é o fator que determinará a desconexão de gerador, para que isso ocorra, essa variação deve ser detectada pelo relé de proteção. As funções que ajudam a realizar a abertura

são as funções 81 e 81R (proteção contra a taxa de variação da frequência), além da 78.

Além destas funções apresentadas pelo PRODIST como fundamentais para a proteção de sistemas de geração distribuída com potência maior que 500 kW e menor ou igual a 5 MW, outras funções tem grande importância, como as seguintes:

- a) ANSI 78 – Função de proteção contra perda de sincronismo: caso haja entrada de cargas na rede, faltas transitórias e outras ocorrências que levem o sistema elétrico a uma oscilação de potência instável, esta função faz o comando de abertura do disjuntor para proteção do sistema, além de ser também uma alternativa para proteção contra o ilhamento. A condição de perda de sincronismo se dá quando há um deslocamento do ângulo de fase da tensão do gerador, “o ajuste recomendado é de 6° para redes de alta potência de curto-circuito e de 12° para redes de baixa potência de curto-circuito” (VIEIRA, 2006 *apud* MOTA, 2015). Quando a defasagem ultrapassa os valores ajustados, o desacoplamento é feito protegendo os componentes.
- b) ANSI 32 – Função direcional de potência: esta função procura limitar o máximo valor que vai ser exportado ou importado pelo consumidor de acordo com o contrato estabelecido. Isto ajuda a evitar problemas de sobrecarga nos equipamentos do sistema da concessionária. Ela também é empregada na proteção do gerador contra motorização, ou seja, evita que o gerador passe a consumir potência ativa gerando sobreaquecimento em seu rotor e danificando a turbina acoplada ao gerador. O ajuste desta função na limitação de potência exportada para a rede deve ser feito após o estudo da concessionária, uma vez que os parâmetros dependem do valor de potência fornecido pelo consumidor em contrato.

Os relés utilizados para proteção de sistemas elétricos com este nível de potência possuem muitas outras funções de proteção, a configuração de outras funções pode aumentar ainda mais a confiabilidade do sistema de geração, no entanto, as apresentadas anteriormente já garantem um bom nível de proteção de sistemas de geração com geradores síncronos.

#### 4 ANÁLISE DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Realizar o estudo econômico de um sistema de cogeração desse nível é uma tarefa um tanto quanto complicada. Inicialmente é fácil mensurar os gastos relacionados diretamente com o sistema de geração, como os valores dos equipamentos, transporte e instalação. Porém, todos os gastos extras referentes à manutenção, operação, entre outros se tornam difíceis de calcular e separar do que se refere ao processo já existente na empresa.

O primeiro custo a ser levado em consideração são os equipamentos, necessitando assim de orçamento de fornecedores.

A empresa fornecedora da turbina, pensando na alternativa de condensação com extração controlada, apresentou um escopo de fornecimento contendo turbina, redutor, condensador, gerador, painel gerador, torre de resfriamento, bombas para circulação de água e supervisão de montagem com preço estimativo do conjunto em R\$ 3.220.000,00.

Neste orçamento, não está presente o valor da caldeira, das obras civis, das interligações mecânicas e elétricas, entre outros gastos, onde é levado em consideração apenas o fornecimento dos equipamentos.

Outro gasto bem considerável é a caldeira, entrando em contato com vários fabricantes da região, como Biocal Burntech Caldeiras e Queimadores, H. Bremer & Filhos, IMTAB Indústria de Geradores de Calor, Secamaq Indústrias de Máquinas, Engecass Caldeiras, entre outras, é possível notar uma média de preço de R\$ 3.500.000,00 para caldeiras com capacidade de gerar 12.000 kg/h de vapor com pressão de trabalho máxima variando de 21 a 23 kgf/cm<sup>2</sup> conforme o fabricante. Este preço inclui alimentador automático a cavaco, transporte e instalação com toda parte de automação.

No entanto, a empresa já teria de adquirir uma nova caldeira com dimensões inferiores, então parte do custo deste sistema não está ligado apenas ao sistema de geração de energia elétrica. A caldeira com as características em que a empresa tinha planos de investir custa em média R\$ 1.000.000,00.

Os demais custos, relacionados à obra civil, interligação dos dutos de vapor, interconexão e equipamentos para o sistema elétrico são difíceis de mensurar, segundo o fornecedor de turbina, este valor não ultrapassa R\$ 1.000.000,00, então, será adotado este valor como base.

Assim como o custo da caldeira, os custos das interligações e obras civis também podem ser divididos, uma vez que parte destes gastos já seria necessário mesmo sem o sistema de geração. A Tabela 7 apresenta essa divisão conforme as estimativas.

Tabela 7 – Custos de aquisição e instalação do sistema

<b>Equipamentos</b>	<b>Custo Total</b>	<b>Custo Relacionado Ao Sistema De Geração</b>
Turbina e componentes auxiliares	R\$ 3.220.000,00	R\$ 3.220.000,00
Caldeira	R\$ 3.500.000,00	R\$ 2.500.000,00
Interligação e ligação elétrica	R\$ 1.000.000,00	R\$ 700.000,00
<b>Total</b>	<b>R\$ 7.720.000,00</b>	<b>R\$ 6.420.000,00</b>

Fonte: Os autores 2019.

Portanto, o custo para adquirir e instalar o sistema de cogeração é de aproximadamente R\$ 6.420.000,00.

Como citado anteriormente, há a necessidade de aumentar o contrato de demanda da empresa, atualmente a empresa tem um contrato de 474 kW na ponta a um preço de R\$ 27,77 kWh e 474 kW fora de ponta a um preço de R\$ 8,76 kWh, preços estes de agosto de 2019, ajustando a geração de energia elétrica de forma econômica, pode ser alterado o contrato para 700 kW na ponta e 1.000 kW fora de ponta. Obtém-se assim um custo de R\$ 19.469,00 na ponta e R\$ 8.760,00 fora de ponta, ou seja, um custo mensal de R\$ 28.229,00.

Sabendo que a empresa possui um contrato de demanda de 474 kW na ponta e fora de ponta e que consome em média 140.267,7 kWh/mês, apresenta assim, um custo médio com energia elétrica em torno de R\$ 63.605,96, valor este que anualmente pode chegar a R\$ 763.271,58, incluindo os tributos e bandeiras tarifárias.

Se descontar deste valor a quantia a ser paga pelo novo contrato de demanda, que é de R\$ 338.748,00 anual chega-se a possibilidade de abater R\$ 424.523,58 da conta de energia elétrica por ano.

O sistema de geração produz 596.400,00 kWh/mês muito mais que o consumido pela empresa que é de 140.267,7 kWh/mês, ou seja, a empresa consome menos de 25% da quantia a ser gerada. Realizando um consórcio para a implantação do sistema, a empresa poderia dividir os custos de aquisição conforme o seu consumo, destinando 75% da geração para os demais consorciados, assim como 75% dos custos. Desta forma, a Niehues Nutrimentos teria de arcar com R\$ 1.605.000,00 do investimento referente ao sistema de geração de energia elétrica.

A Tabela 8 apresenta um fluxo de caixa simples, onde representa um investimento inicial de R\$ 1.605.000,00 e a quantia na qual a empresa deixaria de gastar com energia elétrica ao fim de cada ano de operação do sistema de geração, sem considerar o gasto com

combustível. Um método simples apenas para análise básica de como o sistema traria benefícios para empresa ao longo dos anos, olhando apenas pela conta de energia elétrica.

Tabela 8 – Diagrama de fluxo de caixa

<b>Anos</b>	<b>Capitais</b>
<b>0</b>	- R\$1.605.000,00
<b>1</b>	R\$424.523,58
<b>2</b>	R\$424.523,58
<b>3</b>	R\$424.523,58
<b>4</b>	R\$424.523,58

Fonte: Os autores 2019.

Para uma melhor análise é necessário visualizar o custo com o combustível, utilizado no sistema de geração. Levando em conta apenas os gastos destinados à geração de energia elétrica, tem-se um consumo de 1.153.340,12 kg de cavaco de madeira por mês.

Na região é praticado um preço médio de R\$ 24,00 por m<sup>3</sup> ou de R\$ 0,07 por kg, resultando em um gasto mensal de R\$ 80.733,81. Deste valor a empresa terá que arcar com 25%, ou seja, R\$ 20.183,45.

A Tabela 9 apresenta o Payback descontado, com os valores de investimento inicial, valores de receita, capital descontado que leva em consideração os custos com a aquisição do cavaco e com contrato de demanda, além de apresentar o saldo do projeto para cada ano.

É possível observar pela Tabela 9 que o projeto levaria próximo de nove anos para ter saldo positivo. Isto se deve principalmente pelo fato de ser necessário um contrato de demanda maior que o já adquirido pela empresa, e também pelos preços praticados pela Cooperativa de Eletricidade de São Ludgero serem baixos, diminuindo assim a atratividade do projeto para a região.

Afim de comparação, podemos inserir este sistema a rede de distribuição da CELESC, onde o preço praticado é um pouco superior ao da CEGERO, e ainda, com valor de contrato de demanda bem próximo.

A mesma conta de energia elétrica que é de R\$ 63.605,96 na CEGERO, na CELESC seria por volta de R\$ 84.482,58 se inserido no grupo A4, resultando assim em um custo anual de R\$ 1.013.790,99. Se fosse feito o mesmo contrato de demanda de 700 kW na ponta e de 1.000 kW fora de ponta, teria um custo de R\$ 34.160,00 na CELESC, valor próximo ao de R\$ 28.229,00 praticado pela CEGERO.

Tabela 9 – Payback descontado

<b>Anos</b>	<b>Capitais</b>	<b>Capital Descontado</b>	<b>Saldo Do Projeto</b>
<b>0</b>	<b>-R\$1.605.000,00</b>	<b>-R\$1.605.000,00</b>	<b>-R\$1.605.000,00</b>
<b>1</b>	R\$763.271,52	-R\$580.949,40	-R\$1.422.677,88
<b>2</b>	R\$763.271,52	-R\$580.949,40	-R\$1.240.355,76
<b>3</b>	R\$763.271,52	-R\$580.949,40	-R\$1.058.033,64
<b>4</b>	R\$763.271,52	-R\$580.949,40	-R\$875.711,52
<b>5</b>	R\$763.271,52	-R\$580.949,40	-R\$693.389,40
<b>6</b>	R\$763.271,52	-R\$580.949,40	-R\$511.067,28
<b>7</b>	R\$763.271,52	-R\$580.949,40	-R\$328.745,16
<b>8</b>	R\$763.271,52	-R\$580.949,40	-R\$146.423,04
<b>9</b>	R\$763.271,52	-R\$580.949,40	R\$35.899,08
<b>10</b>	R\$763.271,52	-R\$580.949,40	R\$218.221,20

Fonte: Os autores 2019.

Utilizando desses valores para analisar o payback do projeto, com o valor de investimento inicial, valores de receita, o capital descontado que leva em consideração os custos com a contratação da nova demanda e pela compra de cavaco além de apresentar o saldo do final do projeto para cada ano, é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 – Payback descontado com preço da CELESC

<b>Anos</b>	<b>Capitais</b>	<b>Capital descontado</b>	<b>Saldo do projeto</b>
<b>0</b>	-R\$1.605.000,00	-R\$1.605.000,00	-R\$1.605.000,00
<b>1</b>	R\$1.013.790,99	-R\$652.121,40	-R\$1.243.330,41
<b>2</b>	R\$1.013.790,99	-R\$652.121,40	-R\$881.660,82
<b>3</b>	R\$1.013.790,99	-R\$652.121,40	-R\$519.991,24
<b>4</b>	R\$1.013.790,99	-R\$652.121,40	-R\$158.321,65
<b>5</b>	R\$1.013.790,99	-R\$652.121,40	R\$203.347,94
<b>6</b>	R\$1.013.790,99	-R\$652.121,40	R\$565.017,53

Fonte: Os autores 2019.

É possível notar que o projeto se torna muito mais atrativo, onde no início do quinto ano o projeto já tem saldo positivo, resultando apenas em economia para os anos subsequentes.

Para melhorar a análise econômica é necessário analisar os custos com manutenção e operação do sistema. Os equipamentos geradores de energia térmica, como as caldeiras, têm um custo de manutenção anual equivalente a 1% do seu valor de mercado (DAL FARRA & ESPERANCINI, 2005 *apud* NASCIMENTO, 2007). Em geral, as turbinas praticamente não têm manutenção, então o valor pode ser incluído ao custo da manutenção da caldeira.

O custo com operação consiste na mão de obra dos funcionários que trabalham diretamente com a caldeira. Esse custo pode ser expresso de acordo com a guia trabalhista: Cálculo de encargos sociais e trabalhistas (JÚNIOR; MACHADO, 2015).

Segundo Júnior e Machado (2015) os custos com operação podem ser definidos multiplicando os valores de salário base para operadores de caldeira na região, pelo número de operadores e por um fator de encargos sociais e trabalhistas que é de 1,6384.

Para os custos de manutenção teremos uma despesa anual de R\$ 35.000,00, porém este custo não está apenas associado ao sistema de geração. Levando em conta o investimento na caldeira referente ao sistema de geração apenas, se tem um custo anual de R\$ 25.000,00.

Já os custos com operação dependem dos salários base dos operadores, utilizando o piso salarial de um operador de caldeira para Santa Catarina que é próximo de R\$ 1.400,00 e a necessidade de 5 operadores, chega-se a um custo anual de R\$ 137.625,60. Porém, este custo não está apenas direcionado ao sistema de geração, levando em conta que o sistema já teria de operar durante 14 horas de segunda a sexta sem o sistema de geração podemos dizer que 41,66% dos custos de operação já seriam necessários sem o sistema de geração. Portanto, tem-se apenas R\$ 80.290,78 que se refere ao custo de operação pelo acréscimo de tempo necessário para rodar o sistema 24 horas por dia durante toda a semana.

Sendo assim, o sistema tem um custo a mais de R\$ 105.290,78 anual para todo o sistema de geração, no entanto no modelo de consórcio proposto, apenas 25% destes custos seriam da Niehues Nutrimentos, sendo necessário desembolsar R\$ 26.322,69 anualmente com a operação do sistema de geração.

No entanto, vale ressaltar que poderá haver mais gastos que os apresentados aqui bem como menos. Geralmente por estar se tratando de um sistema com componentes novos, no início os custos são menores e ao longo do tempo o sistema começa a gerar mais gastos.

Para melhorar ainda a análise, é interessante acrescentar uma taxa de crescimento nos preços relacionados à energia elétrica, com intuito de acompanhar o mercado atual. E para isso será usado como base o crescimento nos preços dos anos anteriores para a região Sul do país, levando em conta o preço do primeiro trimestre anual, conforme apresenta a Tabela 11.

Tabela 11 – Preço médio da energia elétrica para região Sul

<b>Anos</b>	<b>Preço</b>
<b>2012</b>	200,42 R\$/MWh
<b>2013</b>	197,07 R\$/MWh
<b>2014</b>	188,76 R\$/MWh
<b>2015</b>	320,59 R\$/MWh
<b>2016</b>	445,22 R\$/MWh
<b>2017</b>	392,85 R\$/MWh
<b>2018</b>	407,06 R\$/MWh
<b>2019</b>	431,20 R\$/MWh

Fonte: ANEEL 2019.

Com base nesses valores, é possível observar um crescimento médio de 14% ao ano, no entanto, é verificado uma menor elevação dos preços nos últimos quatro anos, sendo assim, será adotada uma taxa de 10% ao ano de acréscimo nos preços da tarifa para os próximos anos.

Com isso é possível determinar o payback de forma mais completa, levando em conta um reajuste tarifário como vem acontecendo nos últimos anos, e também os gastos com operação e manutenção do sistema de geração. Os resultados para este modelo de análise estão expressos na Tabela 12.

Tabela 12 – Payback descontado com reajuste tarifário

<b>Anos</b>	<b>Capital</b>	<b>Custo com demanda</b>	<b>Custo com O &amp; M e cavaco</b>	<b>Saldo do projeto</b>	<b>Capital descontado</b>
<b>0</b>	-R\$1.605.000,00	-	-	-R\$1.605.000,00	-
<b>1</b>	R\$763.271,52	-R\$338.748,00	-R\$268.524,09	-R\$1.449.000,57	R\$155.999,43
<b>2</b>	R\$839.598,67	-R\$372.622,80	-R\$268.524,09	-R\$1.250.548,80	R\$198.451,78
<b>3</b>	R\$923.558,54	-R\$409.885,08	-R\$268.524,09	-R\$1.005.399,43	R\$245.149,37
<b>4</b>	R\$1.015.914,39	-R\$450.873,59	-R\$268.524,09	-R\$708.882,72	R\$296.516,71
<b>5</b>	R\$1.117.505,83	-R\$495.960,95	-R\$268.524,09	-R\$355.861,93	R\$353.020,79
<b>6</b>	R\$1.229.256,42	-R\$545.557,04	-R\$268.524,09	R\$59.313,35	R\$415.175,28
<b>7</b>	R\$1.352.182,06	-R\$600.112,75	-R\$268.524,09	R\$542.858,57	R\$483.545,22
<b>8</b>	R\$1.487.400,26	-R\$660.124,02	-R\$268.524,09	R\$1.101.610,72	R\$558.752,15
<b>9</b>	R\$1.636.140,29	-R\$726.136,42	-R\$268.524,09	R\$1.743.090,49	R\$641.479,77

Fonte: Os autores 2019.

Com esse tipo de análise é possível observar que o projeto tem saldo positivo a partir do sexto ano de operação, e que à medida que os anos vão passando o capital descontado que entra nos cofres da empresa só cresce. Mas, projetos deste nível de investimento exigem uma análise de um maior período de operação, visto que a vida útil destes equipamentos é prologada. Será apresentada uma análise para 20 anos de operação.

Tabela 13 – Payback descontado com reajuste tarifário para 20 anos

<b>Anos</b>	<b>Capital</b>	<b>Custo com demanda</b>	<b>Custo com O &amp; M e cavaco</b>	<b>Saldo do projeto</b>	<b>Capital descontado</b>
<b>0</b>	-R\$1.605.000,00	-	-	-R\$1.605.000,00	-
<b>1</b>	R\$763.271,52	-R\$338.748,00	-R\$268.524,09	-R\$1.449.000,57	R\$155.999,43
<b>2</b>	R\$839.598,67	-R\$372.622,80	-R\$268.524,09	-R\$1.250.548,80	R\$198.451,78
<b>3</b>	R\$923.558,54	-R\$409.885,08	-R\$268.524,09	-R\$1.005.399,43	R\$245.149,37
<b>4</b>	R\$1.015.914,39	-R\$450.873,59	-R\$268.524,09	-R\$708.882,72	R\$296.516,71
<b>5</b>	R\$1.117.505,83	-R\$495.960,95	-R\$268.524,09	-R\$355.861,93	R\$353.020,79
<b>6</b>	R\$1.229.256,42	-R\$545.557,04	-R\$268.524,09	R\$59.313,35	R\$415.175,28
<b>7</b>	R\$1.352.182,06	-R\$600.112,75	-R\$268.524,09	R\$542.858,57	R\$483.545,22
<b>8</b>	R\$1.487.400,26	-R\$660.124,02	-R\$268.524,09	R\$1.101.610,72	R\$558.752,15
<b>9</b>	R\$1.636.140,29	-R\$726.136,42	-R\$268.524,09	R\$1.743.090,49	R\$641.479,77
<b>10</b>	R\$1.799.754,32	-R\$798.750,06	-R\$268.524,09	R\$2.475.570,65	R\$732.480,16
<b>11</b>	R\$1.979.729,75	-R\$878.625,07	-R\$268.524,09	R\$3.308.151,24	R\$832.580,59
<b>12</b>	R\$2.177.702,73	-R\$966.487,58	-R\$268.524,09	R\$4.250.842,29	R\$942.691,05
<b>13</b>	R\$2.395.473,00	-R\$1.063.136,34	-R\$268.524,09	R\$5.314.654,86	R\$1.063.812,57
<b>14</b>	R\$2.635.020,30	-R\$1.169.449,97	-R\$268.524,09	R\$6.511.701,09	R\$1.197.046,23
<b>15</b>	R\$2.898.522,33	-R\$1.286.394,97	-R\$268.524,09	R\$7.855.304,36	R\$1.343.603,27
<b>16</b>	R\$3.188.374,56	-R\$1.415.034,46	-R\$268.524,09	R\$9.360.120,36	R\$1.504.816,00
<b>17</b>	R\$3.507.212,02	-R\$1.556.537,91	-R\$268.524,09	R\$11.042.270,38	R\$1.682.150,01
<b>18</b>	R\$3.857.933,22	-R\$1.712.191,70	-R\$268.524,09	R\$12.919.487,80	R\$1.877.217,42
<b>19</b>	R\$4.243.726,54	-R\$1.883.410,87	-R\$268.524,09	R\$15.011.279,38	R\$2.091.791,58
<b>20</b>	R\$4.668.099,19	-R\$2.071.751,96	-R\$268.524,09	R\$17.339.102,52	R\$2.327.823,14

Fonte: Os autores 2019.

A partir disto é possível calcular a TIR do projeto, levando em conta um investimento inicial de R\$ 1.605.000,00 e os capitais descontados que serão acumulados ao longo dos anos de operação do sistema. Aplicando o método da TIR neste modelo de negócio

se tem uma taxa de 24% a.a. para os 20 anos de operação. Pode-se considerar que esta taxa de retorno é aceitável, quando comparada, por exemplo, com a caderneta de poupança, onde o retorno desse tipo de aplicação é cerca de 4,5% a.a. (2019) ou então com o tesouro prefixado que tem retorno médio de 6,38% a.a. (2019) , notando-se então, a alta atratividade do projeto.

Uma alternativa para investir no empreendimento é o financiamento pelo BNDES (Banco Nacional do Desenvolvimento) através do programa Finame (financiamento de máquinas e equipamentos) onde se consegue taxas de juros bem baixas para geração de energias renováveis, variando de 3% a.a. até 7,5% a.a. Será realizada a análise de um modelo de financiamento com taxa de juros de 5% a.a. conforme a Tabela 14.

Tabela 14 – Payback descontado com financiamento e com reajuste tarifário para 20 anos

<b>Anos</b>	<b>Capital</b>	<b>Custo com demanda</b>	<b>Custo com O &amp; M e cavaco</b>	<b>Financiamento</b>	<b>Capital descontado</b>
<b>0</b>	-	-	-	-	-
<b>1</b>	R\$763.271,52	-R\$338.748,00	-R\$268.524,09	-R\$240.750,00	-R\$84.750,57
<b>2</b>	R\$839.598,67	-R\$372.622,80	-R\$268.524,09	-R\$232.725,00	-R\$34.273,22
<b>3</b>	R\$923.558,54	-R\$409.885,08	-R\$268.524,09	-R\$224.700,00	R\$20.449,37
<b>4</b>	R\$1.015.914,39	-R\$450.873,59	-R\$268.524,09	-R\$216.675,00	R\$79.841,71
<b>5</b>	R\$1.117.505,83	-R\$495.960,95	-R\$268.524,09	-R\$208.650,00	R\$144.370,79
<b>6</b>	R\$1.229.256,42	-R\$545.557,04	-R\$268.524,09	-R\$200.625,00	R\$214.550,28
<b>7</b>	R\$1.352.182,06	-R\$600.112,75	-R\$268.524,09	-R\$192.600,00	R\$290.945,22
<b>8</b>	R\$1.487.400,26	-R\$660.124,02	-R\$268.524,09	-R\$184.575,00	R\$374.177,15
<b>9</b>	R\$1.636.140,29	-R\$726.136,42	-R\$268.524,09	-R\$176.550,00	R\$464.929,77
<b>10</b>	R\$1.799.754,32	-R\$798.750,06	-R\$268.524,09	-R\$168.525,00	R\$563.955,16
<b>11</b>	R\$1.979.729,75	-R\$878.625,07	-R\$268.524,09		R\$832.580,59
<b>12</b>	R\$2.177.702,73	-R\$966.487,58	-R\$268.524,09		R\$942.691,05
<b>13</b>	R\$2.395.473,00	-R\$1.063.136,34	-R\$268.524,09		R\$1.063.812,57
<b>14</b>	R\$2.635.020,30	-R\$1.169.449,97	-R\$268.524,09		R\$1.197.046,23
<b>15</b>	R\$2.898.522,33	-R\$1.286.394,97	-R\$268.524,09		R\$1.343.603,27
<b>16</b>	R\$3.188.374,56	-R\$1.415.034,46	-R\$268.524,09		R\$1.504.816,00
<b>17</b>	R\$3.507.212,02	-R\$1.556.537,91	-R\$268.524,09		R\$1.682.150,01
<b>18</b>	R\$3.857.933,22	-R\$1.712.191,70	-R\$268.524,09		R\$1.877.217,42
<b>19</b>	R\$4.243.726,54	-R\$1.883.410,87	-R\$268.524,09		R\$2.091.791,58
<b>20</b>	R\$4.668.099,19	-R\$2.071.751,96	-R\$268.524,09		R\$2.327.823,14

Fonte: Os autores 2019.

A forma de pagamento do financiamento mostrada na Tabela 14 entra no modelo SAC<sup>4</sup>. Utilizando deste modo de pagamento, a empresa acaba por não ter que desembolsar uma grande quantia no momento da implantação do projeto, sendo assim, no ano zero não existe despesas, apenas ao final do primeiro ano é possível levantar os custos e a receita.

Neste modelo é possível notar que a partir do terceiro ano o caixa da empresa já passa a receber dinheiro, mesmo tendo de pagar a parcela referente à aquisição do sistema, isso se deve ao fato de que o preço pago pela energia tende a subir ao longo dos anos e a parcela paga vai reduzindo com passar do tempo.

Ao calcular a taxa interna de retorno é necessário utilizar a MTIR (Taxa interna de retorno modificada), usada para situações onde se tem financiamentos, podendo ser observada uma taxa de 31% a.a. aumentando assim a atratividade por este modelo de negócio. O principal fator que contribui para isso é que a empresa não precisa desembolsar grandes quantias de seu cofre para subsidiar o sistema de geração.

#### 4.1 ANÁLISE ECONÔMICA PARA O CONSORCIADO

É possível determinar a atratividade do projeto para a empresa que se consorciar (podendo ser mais de uma) para a implantação deste projeto. Sabendo que a empresa parceira deve estar na mesma área de concessão da CEGERO, é possível determinar o lucro com energia elétrica que a consorciada terá, assim como os custos com combustível, operação e manutenção do sistema de geração.

Sabe-se que a consorciada está na rede da CEGERO, no entanto, não se sabe em que grupo de tarifa esta enquadrada, será suposto então, uma empresa atendida no grupo A4 assim como a Niehues Nutrimentos.

Portanto, a consorciada terá a disponibilidade de abater 447.300,00 kWh de energia elétrica por mês, o que corresponde a 75 % da geração total do sistema que é 596.400,00 kWh.

Levando em conta apenas a energia gasta no mês, sem o contrato de demanda, a consorciada tem a possibilidade de abater algo em torno de R\$ 104.556,38 por mês, o que representa um lucro anual de R\$ 1.254.676,50. A Tabela 15 apresenta o Payback do projeto

---

<sup>4</sup> SAC é um sistema de amortização no qual as parcelas têm valores decrescentes, mantém o mesmo valor de amortização durante o financiamento, mas diminui o valor pago em juros, o que reduz o valor da prestação durante o contrato.

para a consorciada, levando em conta os custos com combustível, operação e manutenção e também leva em conta um reajuste tarifário de 10 % a.a. para todos os anos.

Tabela 15 – Payback para a consorciada com reajuste tarifário para 20 anos

<b>Anos</b>	<b>Capital</b>	<b>Custo com O &amp; M e cavaco</b>	<b>Capital descontado</b>	<b>Saldo do projeto</b>
<b>0</b>	-R\$4.815.000,00	-R\$4.815.000,00	-R\$4.815.000,00	-R\$4.815.000,00
<b>1</b>	R\$1.254.676,50	-R\$805.572,28	R\$449.104,22	-R\$4.365.895,78
<b>2</b>	R\$1.380.144,15	-R\$805.572,28	R\$574.571,87	-R\$3.791.323,91
<b>3</b>	R\$1.518.158,57	-R\$805.572,28	R\$712.586,28	-R\$3.078.737,63
<b>4</b>	R\$1.669.974,42	-R\$805.572,28	R\$864.402,14	-R\$2.214.335,49
<b>5</b>	R\$1.836.971,86	-R\$805.572,28	R\$1.031.399,58	-R\$1.182.935,91
<b>6</b>	R\$2.020.669,05	-R\$805.572,28	R\$1.215.096,77	R\$32.160,86
<b>7</b>	R\$2.222.735,96	-R\$805.572,28	R\$1.417.163,67	R\$1.449.324,54
<b>8</b>	R\$2.445.009,55	-R\$805.572,28	R\$1.639.437,27	R\$3.088.761,81
<b>9</b>	R\$2.689.510,51	-R\$805.572,28	R\$1.883.938,22	R\$4.972.700,03
<b>10</b>	R\$2.958.461,56	-R\$805.572,28	R\$2.152.889,27	R\$7.125.589,30
<b>11</b>	R\$3.254.307,71	-R\$805.572,28	R\$2.448.735,43	R\$9.574.324,74
<b>12</b>	R\$3.579.738,48	-R\$805.572,28	R\$2.774.166,20	R\$12.348.490,94
<b>13</b>	R\$3.937.712,33	-R\$805.572,28	R\$3.132.140,05	R\$15.480.630,99
<b>14</b>	R\$4.331.483,56	-R\$805.572,28	R\$3.525.911,28	R\$19.006.542,27
<b>15</b>	R\$4.764.631,92	-R\$805.572,28	R\$3.959.059,64	R\$22.965.601,91
<b>16</b>	R\$5.241.095,11	-R\$805.572,28	R\$4.435.522,83	R\$27.401.124,74
<b>17</b>	R\$5.765.204,62	-R\$805.572,28	R\$4.959.632,34	R\$32.360.757,08
<b>18</b>	R\$6.341.725,09	-R\$805.572,28	R\$5.536.152,81	R\$37.896.909,89
<b>19</b>	R\$6.975.897,60	-R\$805.572,28	R\$6.170.325,31	R\$44.067.235,20
<b>20</b>	R\$7.673.487,35	-R\$805.572,28	R\$6.867.915,07	R\$50.935.150,28

Fonte: Os autores 2019.

Nota-se que o payback do projeto é próximo de seis anos para a consorciada, bem próximo ao da Niehues Nutrimentos. Aplicando o método da TIR neste modelo de negócio se tem uma taxa de 24% a.a. para os 20 anos de operação.

## 5 CONCLUSÃO

As grandes invenções que acabaram mudando o rumo da humanidade surgiram de algumas ideias que em um primeiro momento não faziam o menor sentido, ou de acidentes decorrentes de experimentos realizados para resolver outros problemas, porém podemos perceber que todas têm a necessidade de facilitar a execução de tarefas e mais atualmente aproveitar de maneira eficaz o potencial energético das fontes de energia, a fim de garantir que as próximas gerações tenham sobrevivência garantida.

Atualmente, buscam-se novas maneiras e formas de geração de energia para atender a demanda crescente de eletricidade. Além disso, a biomassa, tratando-se de um combustível renovável e fácil de ser encontrada no meio, está sendo amplamente difundida, uma vez que resgata princípios ecologicamente corretos e sustentáveis, o que torna uma fonte com largo potencial de exploração.

Este trabalho objetivou investigar a cogeração de energia e sua aplicação utilizando como combustível os resíduos de madeira. A cogeração é justificada energeticamente pela economia de combustível, haja vista a necessidade térmica e elétrica de um processo, significando uma maior racionalidade e eficiência de um combustível. Em seu contexto técnico, pode ser dividida de acordo com o ciclo termodinâmico a ser adotado e também com a configuração de cada tipo de arranjo e equipamentos utilizados.

Foi determinado os requisitos necessários para a conexão de micro e minigeradoras ao sistema de distribuição em função de sua potência instalada, que incluem geração distribuída, bem como, estabelece às condições de acesso, compreendendo a conexão e o uso, definidos os critérios técnicos e operacionais, os requisitos de projeto e informações para a implementação da conexão.

Abordamos também as questões econômicas relacionadas à viabilidade da aplicação de centrais de cogeração. Diante de algumas modelagens matemáticas, foram descritas as técnicas de avaliações mais comuns. A análise econômica é fundamental para a viabilização desses empreendimentos, além de servir como parâmetro para comparar diversos meios de aplicação de capital e retorno de investimentos.

Ao executar o estudo prático da possibilidade de implementação de sistemas de cogeração em duas indústrias da região da Amurel, foi possível observar que há potencial disponível para este tipo de conjunto gerador no local. O que é possível notar é que quanto maior o consumo de vapor maior é a viabilidade técnica para instalação deste sistema de geração.

A Termomad dispunha de sobra na caldeira, mas a quantia de vapor a ser consumida em seu processo não justificava a implementação do sistema. Já a Niehues Nutrimentos possuía sim um consumo de vapor significativo, no entanto, com períodos intermitentes na operação. Para um melhor aproveitamento tanto do sistema de geração em si como do investimento aplicado para sua aquisição, o ideal é modificar o sistema para que o mesmo opere sem a necessidade de o processo produtivo estar consumindo vapor.

Através dessa mudança, o sistema pode ter um retorno econômico interessante, assim como um alto índice de eficiência. Para empresas em que o consumo de vapor é elevado e constante a eficiência do sistema é ainda melhor. Empresas que tem essas características podem adotar uma turbina de contrapressão, onde todo o vapor passaria para o processo após a geração de energia elétrica, sendo assim, não haveria desperdício de energia térmica em um sistema de condensação, já que essa energia seria utilizada no processo da empresa.

Ao realizar uma pesquisa na região foi possível observar quatro setores industriais que dispõem de atratividade para a aquisição de um sistema de cogeração, como madeireiras de grande porte pela possibilidade de consumir o rejeito proveniente do processamento da madeira ou indústrias frigoríficas, alimentícias e têxteis pela alta demanda de vapor em alguns processos.

O Brasil possui muitos fabricantes de turbinas, mas ainda não atendem a uma parcela de indústrias com menor consumo de vapor. É um nicho de mercado que buscam atender, mas ainda não apresentam soluções eficientes e economicamente viáveis, tendo assim, grande dificuldade de conseguir viabilizar sistemas de geração com menos de 500 kW. Internacionalmente é possível encontrar sistemas baratos com potências menores que essa, mas importar uma turbina torna tudo mais complicado, pelas taxas impostas sobre o produto, pela mão de obra necessária para instalação, além da dificuldade de manter contato com o fabricante após a aquisição do sistema.

A maior dificuldade deste trabalho foi a de encontrar fabricantes de turbinas que aceitassem passar informações a respeito de seus produtos, sejam informações técnicas ou econômicas para aquisição e instalação. Somente após muita insistência conseguimos que algumas empresas nos ajudassem com as informações necessárias.

Outra dificuldade encontrada é a falta de bibliografias na área, pois muitas das encontradas estão desatualizadas ou estão inseridas em cenários diferentes, como para casos internacionais que tratam principalmente da queima de combustíveis fósseis.

Atualmente a região da Amurel não apresenta nenhum registro de um sistema de cogeração em funcionamento, o que mostra que a cogeração ainda não está difundida, isso talvez se dê pela falta de pesquisas na área, ou então, pelos altos investimentos necessários para a aquisição deste tipo de geração.

No entanto, é possível realizar financiamentos com taxas de juros bem baixas para estes modelos de geração renovável, o que acaba por aumentar a atratividade de um sistema de cogeração.

Por mais que os investimentos sejam relativamente altos, para a região atendida pela CEGERO é observado um retorno financeiro aceitável, e se analisar um período de tempo prolongado a atratividade aumenta.

O que menos contribui com a atratividade do projeto é o fato de a energia elétrica na CEGERO ser uma das mais baratas do país, portanto, se inserir este modelo de geração em concessionárias de energia elétrica com preços mais elevados, o retorno financeiro é mais rápido e atraente para a empresa que decide por implementar um sistema de cogeração.

Sistemas de cogeração tem alta atratividade financeira, principalmente pelo fato de parte dos custos muitas vezes já estarem inseridos nas necessidades produtivas da empresa, diminuindo assim seus custos com implantação, operação e manutenção.

## REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil**. 3. ed. Brasília: Tda Comunicação, 2008. 236 p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas3ed.pdf>>. Acesso em: 09 jun. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa N° 482**, de 17 de abril de 2012, ed. Brasília: ANEEL, 2012. 12 p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>. Acesso em: 12 mai. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa N° 687**, Altera a Resolução Normativa N° 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST.1 ed. Brasília: ANEEL, 2015. 25 p. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2015687.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Tarifas médias por classe de consumo e região**. 2019. Acesso à Informação, Dados Abertos, Tarifas. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/dados/tarifas>>. Acesso em: 21 out. 2019.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 3 – Acesso ao Sistema de Distribuição**. Brasília, 2017.
- ALTAFANI, Carlos Roberto. **Apostila Sobre Caldeiras**. Caxias do Sul, 2002. Apostila da disciplina sobre caldeiras do curso de Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul.
- BALESTIERI, José Antônio Perrella. **Cogeração: geração combinada de eletricidade e calor**. Florianópolis: Ufsc, 2002. 279 p.
- BARROS, Benjamim Ferreira de; BORELLI, Reinaldo; GEDRA, Ricardo Luiz. **Eficiência energética: Técnicas de aproveitamentos, gestão de recursos e fundamentos**. São Paulo: érica, 2015. 152 p.
- BAZZO, Edson. **Geração de vapor**. 2. ed. Florianópolis: UFSC, 1995. 216 p.
- BEGA, Egídio A. **Instrumentação aplicada ao controle de caldeiras**. 3. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência, 2003.
- CASAROTTO FILHO, Nelson; KOPITTKÉ, Bruno Hartmut. **Análise de investimentos: matemática financeira, engenharia econômica, tomada de decisão e estratégia empresarial**. 11. ed. São Paulo: Atlas, 2010. 411 p.
- CORTEZ, Luis Augusto Barbosa; LORA, Electo Eduardo Silva; GÓMEZ, Edgardo Olivares. **Biomassa para energia**. Campinas: Unicamp, 2008. 733 p.
- CENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7. Porto Alegre Bookman 2013. 1035 p.

CENTRAIS ELÉTRICAS DE SANTA CATARINA S.A. (CELESC) . **I-432.0004**: Requisitos para a conexão de micro ou minigeradores de energia ao sistema elétrico da celesc distribuição. Florianópolis: Dvpr, 2018. 38 p.

FILIPPO FILHO, Guilherme. **Máquinas térmicas estáticas e dinâmicas**: fundamentos de termodinâmica, características operacionais e aplicações. São Paulo: Erica, 2014. 196 p.

GIL, Antonio Carlo. **Como elaborar um projeto de pesquisa**. 4. ed. S: Atlas, 2002. 175 p.

GOLDEMBERG, José; LUCON, Oswaldo. Energias renováveis: um futuro sustentável. **Revista USP**, São Paulo, n. 72, p.6-15, dez. 2007. Disponível em: <<http://www.revistas.usp.br/revusp/article/download/13564/15382/>>. Acesso em: 29 mai. 2019.

GOMES, Hiury Silva. Proteção de sistemas geradores paralelos a rede elétrica MT. **Conprove Engenharia**: Fórum de proteção e automação, Uberlândia, v. 5, n. 13, p.1-5, 09 out. 2018. Disponível em: <<http://www.conprove.com.br/forum/viewforum.php?f=13>>. Acesso em: 20 out. 2019.

HODGE, B. K.. **Sistemas E Aplicacoes De Energia Alternativa**. Rio de Janeiro: Ltc, 2011. 309 p.

INEE, Instituto Nacional de Eficiência Energética -. **O que é cogeração**. 2007. Disponível em: <[http://www.inee.org.br/forum\\_co\\_geracao.asp](http://www.inee.org.br/forum_co_geracao.asp)>. Acesso em: 05 nov. 2019.

KINDERMANN, Geraldo. **Proteção de sistemas elétricos de potência**. 3. ed. Florianópolis: Labplan, 2012. 288 p.

LINO, Marco Aurélio Batista. **Proteção da Interconexão de um Gerador Distribuído com o Sistema de Distribuição de Energia Elétrica**. 2007. 55 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.

MAMEDE FILHO, João; MAMEDE Daniel Ribeiro **Proteção de sistemas elétricos de potência**. Rio de Janeiro: LTC, 2011. 601 p.

MARCHESAN, Gustavo. **Deteção de ilhamento em sistemas de distribuição com geração síncrona distribuída**. 2016. 130 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2016.

MARTINELLI JUNIOR, Luiz Carlos. **Máquinas Térmicas II**. Panambi: Unijui, 2002. 134 p.

MELLER, Gustavo Topanotti. **Desenvolvimento De Um Simulador De Operação De Caldeira Para Treinamento De Operadores**. 2014. 51 f. Monografia (Especialização) - Curso de Automação Industrial, Departamento Acadêmico de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

MME, Ministério de Minas e Energia. **Resenha Energética Brasileira**. 3. ed. Brasília: Departamento de Informações e Estudos Energéticos, 2019. 32 p. Disponível em: <<http://www.mme.gov.br/documents/1138787/1732840/Resenha+Energ%C3%A9tica+Brasileira+-+edi%C3%A7%C3%A3o+2019+v3.pdf/767fd42f-2fc2-43cc-8265-f67f299aca0d?version=1.0>>. Acesso em: 04 nov. 2019.

MORAN, Michael; SHAPIRO, Howard N.. **Princípios de termodinâmica para engenharia**. 4. Ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2002. 681 p.

MORAN, Michael; SHAPIRO, Howard N.; MUNSON, Bruce. **Introdução a engenharia de sistemas térmicos: Termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor**. Rio de Janeiro: Ltc, 2011. 604 p.

MOTA, Igor Lopes. **Análise de Alternativas de Proteção Anti-Ilhamento de Geradores Síncronos Distribuídos**. 2015. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

NASCIMENTO, M. D. **Otimização do uso de lenha e cavaco de madeira para produção de energia em agroindústria Seropédica..** Dissertação (Mestrado em Agronomia – Faculdade de Ciências Agrônômicas do Campus de Botucatu – Botucatu, UNESP. 2007. 103p.

PEREIRA, Mário Jorge. **Energia: eficiência e alternativas**. Rio de Janeiro: Ciência Moderna, 2009. 197 p.

RAMAGE, J; SCURLOCK, J. Biomassa. In: BOYLE, G. **Energia Renovável: Poder para um Futuro Sustentável**. Nova Iorque: Oxford University Press, 1996.

ROSILLO CALLÉ, Francisco; BAJAY, Sergio V.; ROTHMAN, Harry (Org.). **Uso da biomassa para produção de energia na indústria brasileira**. Campinas: Ed. Unicamp, 2005. 447 p.

SÃO PAULO. Cetesb - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Governo do Estado de São Paulo. **Graxarias processamento de materiais de abatedouros e frigoríficos bovinos e suínos: guia técnico ambiental de graxarias**. São Paulo: Cip, 2006. 76 p. (Série P+L). Disponível em: < <https://www.fiesp.com.br/arquivo-download/?id=4266> >. Acesso em: 22 set. 2019.

SILVA JÚNIOR, Sílvio AurÉlio da; MACHADO, Wellington de Sousa. **Especificação de uma caldeira para a fábrica de laticínios marília da cidade de itaperuna – RJ**. 2015. 116 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade Redentor, Itaperuna, 2015

SMITH, Joe Mauk, VAN NESS, Hendrick C., ABBOTT, Michael M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**, 7 ed. Ltc, 2007.

SOLIDDA ENERGIA. **Micorturbinas a Vapor**, 2019. Produtos, ST 1000. Disponível em: < <http://www.solidda.com.br/turbinas-a-vapor#turbinas-a-vapor> >. Acesso em: 15 out. 2019.

STUCHI, Gabriel A. D.; TACONELLI, Mauricio; LANGHI, Victor A. B.. **Geração termelétrica**: principais componentes e tipos de centrais termoelétrica. 2015. 147 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.  
TEC, Tecnologia em Calor. **Tabela de PCI**. 2016. Material de Apoio, Tabelas. Disponível em: <<http://www.teccalor.com.br/PDF/TabelaPoderCalorifico.pdf>>. Acesso em: 17 out. 2019.

TURBIMAQ MAQUINAS E EQUIPAMENTOS. **Turbinas De Condensação / Extração - Mega-CO / Mega-ECO**, 2019. Produtos, turbinas de múltiplos estágios. Disponível em: <<http://www.turbimaq.com.br/index.php/produtos/turbinas-de-multiplos-estagios/serie-mega-co-condensacao>>. Acesso em: 15 de out. de 2019.

UMANS, Stephen D.. **Máquinas Elétricas**: de Fitzgerald e Kingsley. 7. ed. Porto Alegre: Amgh, 2014. 708 p.

VAN WYLEN, Gordon J.; SONNTAG, Richard E.. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 3. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1993. 607 p