

CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ - FAG
RAFAEL RENAN VARGAS

ESTUDO COMPARATIVO DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO EM UM
LATICÍNIO

CASCADEL - PR
2020

CENTRO UNIVERSITÁRIO FUNDAÇÃO ASSIS GURGACZ - FAG
RAFAEL RENAN VARGAS

**ESTUDO COMPARATIVO DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO EM UM
LATICÍNIO**

Trabalho apresentado na disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso II, do Curso de Engenharia Mecânica, do Centro Universitário Assis Gurgacz, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Professor orientador: Cleberson de Souza Pereira

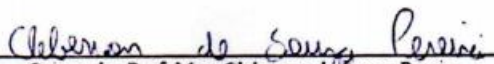
CASCADEL – PR
2020

CENTRO UNIVERSITÁRIO ASSIS GURGACZ
RAFAEL RENAN VARGAS

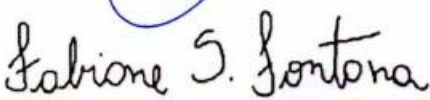
ESTUDO COMPARATIVO DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO EM UM
LATICÍNIO

Trabalho apresentado no Curso de Engenharia Mecânica do Centro Universitário FAG, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, sob orientação do Professor Cleberson de Souza Pereira.

BANCA EXAMINADORA


Orientador Prof. Msc. Cleberson de Souza Pereira
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico


Professor Msc. Sergio Mota
Centro Universitário Assis Gurgacz
Engenheiro Mecânico


Professora Msc. Fabiane Sorbar
Centro Universitário Assis Gurgacz
Bacharel em Ciência da Computação
Mestre em Engenharia Agrícola

Cascavel, 26 de novembro de 2020.

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre duas caldeiras alimentadas por cavaco, mensurando o custo de operação entre os equipamentos devido ao consumo de combustível e o volume de leite capacitado por cada equipamento. Devido a ampliação da produção deste laticínio a caldeira atual está em seu limite de operação, assim a necessidade de um equipamento maior e possa ter viabilidade de produção de energia elétrica, devido ao alto custo para operação do laticínio. O primeiro passo para a pesquisa foi a coleta de dados na indústria estudada mensurando uma possível caldeira como substituta, em que seja possível a produção de energia elétrica e que possa atender à demanda de vapor da indústria. Com a caldeira selecionada através de catálogos, foram feitos os cálculos de custo para operação com a produção de energia elétrica e comparada com a caldeira atual. Após obter esses valores, foi feito um comparativo em que o resultado esperado é que a caldeira proposta atenda aos requisitos de produção de energia e vapor e ainda seja mais econômica em termos de operação. Porém após a pesquisa conclui-se que não se tornou viável a produção de energia com o sistema proposto.

Palavras-chave: Caldeira. Cogeração de energia. Turbinas a vapor. Calor.

ABSTRACT

This work presents a comparative study between two boilers fed by chip, measuring the cost of operation between the equipment due to fuel consumption and the volume of milk enabled by each equipment. Due to the expansion of the production of this dairy, the current boiler is at its operating limit, so the need and a larger equipment and may have feasibility of producing electricity, due to the high cost of operating the dairy. The first step in the research was the data collection in the studied industry, measuring a possible boiler as a substitute, in which the production of electric energy is possible and which can meet the industry's demand for steam. With the boiler selected through catalogs, cost calculations were made for operation with the production of electricity and compared with the current boiler. After obtaining these values, a comparison was made in which the expected result is that the proposed boiler meets the requirements for energy and steam production and is even more economical in terms of operation. However, after the research it was concluded that the production of energy with the proposed system was not feasible.

Keywords: Boiler. Cogeneration of power. Steam turbines. Heat.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mecanismos de troca de calor	16
Figura 2: Caldeira flamutubular	18
Figura 3: Caldeira aquatubular	19
Figura 4: Sistema cogeração	21
Figura 5: Aplicação ciclo Rankine	23
Figura 6: Fluxograma Vapor	32

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Primeira lei da termodinâmica.....	24
Equação 2 – Conservação de energia.....	24
Equação 3 – Transferência de energia ao fluido.....	25
Equação 4 – Rendimento da caldeira.....	25
Equação 5 – Trabalho da turbina.....	26
Equação 6 - Rendimento térmico da turbina.....	26
Equação 7 – Massa de combustível para CCE.....	26
Equação 8 – Produção de energia elétrica.....	27
Equação 9 - Cálculo custo operação caldeira proposta.....	33
Equação 10 - Cálculo custo operação caldeira atual.....	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Dados dos geradores.....	29
Tabela 2: Dados da caldeira do laticínio	29
Tabela 3: Dados de produção do laticínio	30
Tabela 4: Informações caldeira proposta.....	30
Tabela 5: Resultados	36

LISTA DE ABREVIATURAS

TWh - Terawatt-hora

CCE - Centro de calor e energia

kg - Quilo grama

F - Força

Cm² – Centímetro quadrado

v - Vapor

h - Horas

L - Litro

kW - Quilowatts

M² - Metro quadrado

kcal - Quilo caloria

kJ - Quilo Joule

J - JOULE

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	12
1.1 OBJETIVOS	13
1.1.1 Objetivo Geral	13
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
2 JUSTIFICATIVA	14
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	15
3.1 CALOR.....	15
3.2 VAPOR DE ÁGUA.....	16
3.3 CALDEIRAS.....	17
3.4 COGERAÇÃO DE ENERGIA	20
3.5 TURBINAS A VAPOR.....	21
3.6 CICLO RANKINE	22
3.7 CALOR DISPONIBILIZADO E RENDIMENTO	24
3.7.1 Temperatura do fluido na entrada do sistema.....	24
3.7.2 Energia fornecida ao fluido pela caldeira.	25
3.7.3 Rendimento da caldeira.	25
3.7.4 Trabalho realizado na turbina	25
3.7.5 Rendimento térmico da turbina	26
3.7.6 Massa combustível para CCE.....	26
3.7.7 Cálculo da produção de energia elétrica.....	27
4 MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 MATERIAIS	28
4.1.1 Informações do laticínio	28
4.1.2 Nova caldeira.....	30
4.2 MÉTODOS	30
4.2.1 Cálculo da temperatura de entrada da água na caldeira.....	31
4.2.2 Cálculo da energia fornecida pela caldeira ao fluido	31
4.2.3 Cálculo eficiência da caldeira.....	31
4.2.4 Cálculo trabalho realizado pela turbina	32
4.2.5 Rendimento térmico da turbina	32
4.2.6 Massa de combustível para alimentar o CCE.....	32

4.2.7 Cálculo da produção de energia elétrica.....	33
4.2.8 Comparação de custos entre sistema proposto e o sistema atual.....	33
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	35
5.1 SISTEMA PROPOSTO.....	35
5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS	37
5.3 CONTRIBUIÇÕES	37
5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	37
REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

A agroindústria tem como principal matéria-prima um produto da agropecuária, por exemplo, um conjunto de laticínios (BACHA, 2004). Estes são responsáveis pela aquisição, pelo processamento e pela produção dos derivados do leite e integram o sistema agroindustrial de laticínios, que é formado pelos fornecedores de insumos, máquinas, equipamentos, pecuária leiteira, processamento e distribuição. O processamento, atividade da indústria de laticínios, é realizado por empresas multinacionais, grupos nacionais, cooperativas e pequenos laticínios (JANK, 1999 *apud* Carvalho, 2002).

A maioria dos equipamentos utilizados em industriais de beneficiamento de leite é, atualmente, do tipo regenerativo, consiste de trocadores de calor (placas ou tubulares), em que o leite é aquecido na entrada, em contracorrente com o leite que sai do pasteurizador, que deve ser resfriado (CEMIG, 1989).

Devido ao alto consumo de energia elétrica em plantas industriais e o com avanço em estudos relacionados a reaproveitamento energético, é possível termos um sistema de geração de energia a partir do vapor de água de uma caldeira. Para isso, é necessário estudo e projeto para determinar os equipamentos necessários para esta tarefa.

A eficiência energética é um conceito dinâmico associado ao crescimento econômico, à produtividade, à proteção do meio ambiente e ao desenvolvimento sustentável. No Brasil, a eletricidade contribuiu significativamente durante os 400 últimos anos para o desenvolvimento econômico do país.

O setor industrial teve grande parte de seu desenvolvimento impulsionado pela energia elétrica, de tal forma que responde atualmente a 46% do consumo total de eletricidade do país (BRASIL, 2009).

O trabalho tem como objetivo a cogeração como alternativa para atender a demandas térmicas e elétricas, pela confiabilidade e redução na emissão de poluentes, além da oportunidade de as empresas reduzirem custos com energia elétrica.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Dimensionar e selecionar um sistema de cogeração adequado para atender tanto à demanda de vapor quanto à de energia elétrica do laticínio.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Selecionar sistema composto por caldeira e turbina.
- Selecionar gerador que atenda à demanda de energia elétrica.
- Avaliar caldeira proposta.

2 JUSTIFICATIVA

No contexto do desenvolvimento sustentável, diversos autores têm apontado a cogeração como alternativa para atender a demandas térmicas e elétricas, pela confiabilidade e redução na emissão de poluentes, além da oportunidade de as empresas reduzirem custos com energia elétrica.

Dados coletados pelo Balanço Energético Nacional de 2019 demonstram que a eletricidade é a fonte de energia mais utilizada pelo setor industrial brasileiro, com um consumo de 37,5%. A geração elétrica a partir de não renováveis representou 17,6% do total nacional, e a autoprodução apresentou 16,8% do total produzido, representando um montante de 101,2TWh, destes, 57,6 TWh não foram injetados na rede, ou seja, foram produzidos e consumidos pela própria unidade geradora.

Conforme Bizzo (2003), grande parte da geração de energia elétrica do Hemisfério Norte utiliza vapor de água como fluido de trabalho em ciclos termodinâmicos, transformando a energia química de combustíveis fósseis ou nucleares em energia mecânica e, em seguida, energia elétrica.

Nascimento *et al.*, (1997) alertaram para o aumento do consumo de energia elétrica no Brasil, apontando a cogeração como opção não convencional para suprimento da demanda. Ao avaliarem os aspectos técnicos da cogeração, os autores apontaram as vantagens do emprego de turbinas a gás e a vapor em ciclo combinado, citando uma economia de mais de 40% no consumo específico de combustível.

Desta forma, este trabalho o tem como importante, pois irá combinar um ciclo de geração de potência com ciclo de geração térmica, resultando em produção de energia de forma rentável em um laticínio e estendido para indústrias lácteas.

O referente trabalho foi desenvolvido na cidade de Planalto, no Paraná, no Laticínios Santa Inêz, no ano de 2020, sobre a instalação de uma caldeira tipo mista alimentada por cavaco fabricada pela empresa Secamaq, para substituir a atual que está na empresa, e que seja possível a produção de energia elétrica de mil quilowatts/hora.

A pesquisa tem como objetivo escolher uma caldeira já catalogada com capacidade acima de quatro toneladas de vapor por hora, junto com a turbina a vapor, que será motriz de um gerador, comparando somente custo de operação entre a caldeira atual e a caldeira selecionada.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 CALOR

Segundo Schmidt *et al.* (2018), calor é a transação de energia devido à diferença de temperatura e que não está associada à transferência de massa. Calor pode ser entendido como a energia de transferência de calor de um corpo para outro devido à diferença de temperatura entre eles e pode acontecer por maneiras diferentes: condução, convecção ou radiação. A termodinâmica e suas leis ditam a ação no processo de transferência de calor: enquanto a termodinâmica é voltada para o estudo na quantidade de calor transferida de um estado de equilíbrio para outro em um sistema, a ciência da transferência de calor é voltada para estudar as taxas de transferência de calor em função do tempo e variação de temperatura (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

A energia pode deixar ou entrar em um sistema e ser transferida apenas em duas maneiras, calor ou trabalho. Se a transferência de energia for pelo motivo de variação de temperatura entre o sistema e a vizinhança, então a transferência de energia se caracteriza como calor, caso contrário será transferida como trabalho (SCHMIDT *et al.*, 2018).

Ainda segundo Schmidt *et al.* (2018), a ciência da transferência de calor identifica fatores que influenciam na troca de calor entre sólidos ou fluidos ou ambos. Há três categorias gerais para denominar a forma com que o calor é transmitido: condução, convecção e a radiação.

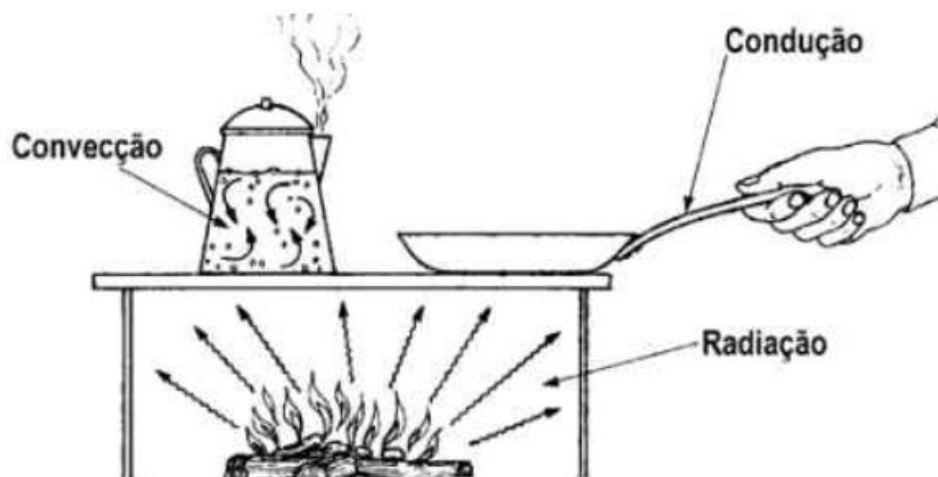
Na condução, ocorre a transferência de energia das partículas mais energéticas para as partículas menos energéticas em razão das interações entre elas; quanto maior for a temperatura, maior será a energia molecular. Já no processo de convecção, a transferência de calor acontece quando se há movimento de um fluido em relação à superfície, junto com a diferença de temperatura entre eles (INCORPERA *et al.*, 2008).

A transferência de calor por convecção é dada pela transferência de energia entre um fluido e uma superfície sólida, apresentando dois fenômenos, condução de energia através do fluido devido à presença de um gradiente de temperatura presente no fluido, o segundo fenômeno está associado com as características de escoamento do fluido, assim como suas propriedades termo-físicas (SCHMIDT *et al.*, 2018).

A transferência de energia por ondas eletromagnéticas é denominada de radiação. Qualquer meio material com temperatura superior a zero absoluto irradia energia, como exemplo a transferência de calor pelas chamas de uma fogueira para uma parede ilustra a

radiação de um gás para uma superfície sólida (SCHMIDT *et al.*, 2018). A figura 1 ilustra os três mecanismos de troca de calor.

Figura 1: Mecanismos de troca de calor



Fonte: Grimm (1999).

Diversos equipamentos utilizam o princípio de transferência de calor, como caldeiras, condensadores e trocadores de calor, que são projetados pela necessidade da demanda de transferência de calor, projetando, assim, o tamanho necessário do equipamento (ÇENGEL; GHAJAR, 2012).

3.2 VAPOR DE ÁGUA

Conforme fornecido calor à água, há variação de sua entalpia (quantidade de energia por kg de massa) e seu estado físico, quanto mais ser aquecida, mais aumentará sua temperatura e, conseqüentemente, sua densidade diminuirá, tornando-se mais “leve”. À medida que se fornece calor ao líquido, suas moléculas adquirem energia até conseguirem vencer as forças que as mantêm unidas no estado líquido (SAREV, 1992).

Vapor de água é usado como meio de geração, transporte e energia desde primórdios no desenvolvimento industrial. Há inúmeros fatores que colaboram na utilização do vapor da água, é o elemento mais abundante em nosso planeta e, portanto, fácil de obtê-lo e com baixo custo, no estado de vapor tem alto conteúdo de energia por unidade de massa e volume (BIZZO, 2003).

As primeiras aplicações industriais do vapor surgiram por volta do século 17 apenas com um reservatório com formato esférico com aquecimento na sua parte inferior, conhecida como caldeira de Haycock. Em 1880, Alan Stirling desenvolveu uma caldeira composta por tubos curvos, base até hoje nas grandes caldeiras de tubos de água (BIZZO, 2003).

Há diferentes aplicações de uso final para o vapor, incluindo aplicações em processos de aquecimento, movimentação mecânica, produção de reações químicas, limpeza, esterilização e fracionamento de componentes de hidrocarboneto em misturas. Os equipamentos mais comuns de sistema de uso final de vapor são: trocadores de calor, turbinas, torres de fracionamento e tanques de reação química. Em um trocador de calor, o vapor transfere seu calor latente a um líquido de processo. O vapor é mantido no trocador de calor por um purgador de vapor até que se condense. Nesse ponto, o purgador deixa passar o condensado para a linha de drenagem de condensado, ou sistema do retorno de condensado. Em uma turbina, o vapor transforma sua energia térmica em trabalho mecânico, para acionar máquinas rotativas, tais como: bombas, compressores ou geradores elétricos. Em torres de fracionamento, o vapor facilita a separação de vários componentes de um líquido (ELEKTRO, 2017).

3.3 CALDEIRAS

Segundo Alberichi (2013), as caldeiras são equipamentos amplamente utilizados na indústria e na geração de energia elétrica, tendo sua importância no setor industrial e em diversos casos sendo o equipamento mais importante.

De acordo com Alberichi (2013), a caldeira é um equipamento que tem a função de gerar vapor através de uma troca térmica entre a energia liberada pela queima do combustível e a água, que acontece pelo equipamento constituído por chapas e tubos metálicos que, aquecidos, transferem altos níveis de calor à água, produzindo a mudança de seu estado líquido para gasoso.

Segundo as normas regulamentadoras NR12 e NR13, a caldeira a vapor é um equipamento com função de “produzir acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refreradores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo” (ALBERICHI, 2013).

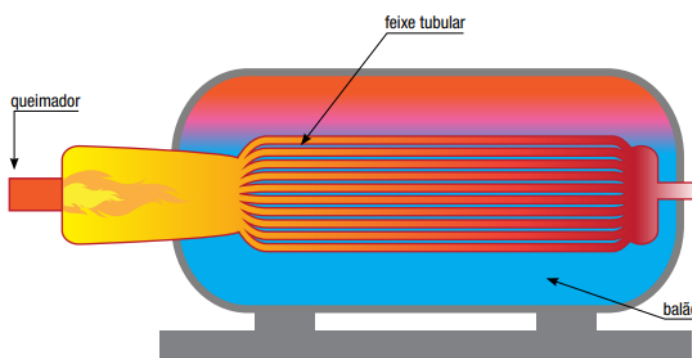
Atualmente, podemos classificar as caldeiras como dois tipos básicos as flamotubulares e as aquatubulares. Caldeiras flamotubulares são utilizadas em menores produções de vapor, os gases da fornalha circulam por tubos aquecendo a água que está em

contato do lato externo dos tubos, as caldeiras horizontais apresentam vaso de pressão cilíndrico no sentido horizontal onde está a passagem dos tubos que iram aquecer a água (BIZZO, 2003).

As caldeiras flamotubulares têm como característica a circulação interna dos gases de combustão conduzidos pelos tubos por todo o interior da caldeira e constituídas para operar em pressões delimitadas, pois as partes internas estão submetidas à pressão relativamente grande, deixando inviável o emprego de chapas de maiores espessuras (ALBERICHI, 2013).

Nas caldeiras flamotubulares (figura 2), os gases quentes da combustão circulam no interior de tubos que atravessam o reservatório de água a ser aquecida para produzir vapor. Esse tipo de caldeira, geralmente de pequeno porte, apresenta baixa eficiência e é utilizada apenas para pressões reduzidas. Ainda é muito utilizada em razão do seu baixo valor de investimento se comparado com as caldeiras aquatubulares e com a facilidade de manutenção e pode ser utilizada com qualquer tipo de combustível, líquido, sólido ou gasoso (ELEKTRO, 2017).

Figura 2: Caldeira flamotubular



Fonte: Manuais Elektro de Eficiência Energética Segmento Industrial (2017).

Para atender à necessidade de utilizar combustíveis sólidos em caldeiras com pequena capacidade fez surgir as caldeiras mistas, basicamente são a combinação da caldeira flamotubular com a caldeira aquatubular. Na fornalha, dá-se a queima do combustível sólido, como lenha, toras, cavacos entre outros; esta apresenta todas as vantagens das caldeiras aquatubulares, como segurança, eficiência térmica, e é uma solução eficiente para utilização de combustível sólido (BIZZO, 2003).

As caldeiras aquatubulares têm como característica a circulação externa dos gases de combustão e a condução de água e vapor pelos tubos, tendo uma utilização mais ampla por

possuírem vasos pressurizados internamente e possuírem menores dimensões relativas, tornando, muitas vezes, a viabilidade técnica e econômica de aumentar as espessuras elevando a pressão de operação. Outro fator importante é a possibilidade de adaptação de acessórios como superaquecedor, que permite elevar a temperatura do vapor tornando-o superaquecido, com característica de menor porcentagem de água, sendo utilizado em funcionamento de turbinas (ALBERICHI, 2013).

Nessas caldeiras, a água a ser aquecida passa pelo interior de tubos que, por sua vez, são envolvidos por gases de combustão; os tubos podem estar organizados em feixes, como nos trocadores de calor, e as caldeiras que os contêm apresentam a forma de um corpo cilíndrico (ELEKTRO, 2017).

Figura 3: Caldeira aquatubular



Fonte: Manuais Elektro de Eficiência Energética Segmento Industrial (2017).

As caldeiras aquatubulares podem ser de tubos retos, que dificilmente ainda são empregados nos dias de hoje, ou curvados, proporcionando um arranjo de tubos completamente fechado por paredes de água. Com maior complexidade construtiva, são preferidas na aplicação de maiores capacidades de produção de vapor (ALBERICHI, 2013).

Segundo Alberichi (2013), caldeira com tubos curvados em suas concepções iniciais possuíam entre quatro e cinco tambores, sendo revestida por alvenaria. Atualmente, por motivos de segurança e custo, foi reduzido o número de peças de grande diâmetro no caso dos tambores, sendo utilizados dois ou uma única peça. E para redução de custos de instalações foram desenvolvidos estudos para melhor aproveitamento do calor irradiado, com aplicação de

paredes de água que eliminam o alto custo com refratários. Com maior eficiência e reduzindo o tamanho da caldeira, promove-se a mudança de estado da água de forma mais rápida e aumenta a vida do revestimento das câmaras de combustão.

De acordo com o Agência para Aplicação de Energia (1998), as curvas de rendimento das caldeiras apresentam valores entre 80 e 90% de sua capacidade nominal de produção de vapor. A operação acima desta capacidade pode comprometer a vida útil do equipamento. Por outro lado, a operação abaixo de 80% da capacidade nominal faz com que o rendimento global do ciclo termodinâmico decresça, devido ao aumento relativo das perdas decorrentes das trocas de calor ou condições inadequadas de combustão.

3.4 COGERAÇÃO DE ENERGIA

A necessidade de atender à demanda energética nas diversas áreas causando o mínimo de impacto, seja ele social ou ambiental, faz surgir a busca e exploração de fontes energéticas alternativas. As tecnologias que convertem a energia disponível na natureza, sejam do vento, da água, do sol ou dos combustíveis fósseis, permitem que o homem aumente sua capacidade de trabalho (GADANHA *et al.*, 1991).

Segundo Ferrari e Rodrigues (2013), o conceito de cogeração está relacionado à produção simultânea e sequencial de, no mínimo, duas utilidades. A cogeração não é algo exclusivo no segmento industrial, o fato de ser possível produzir energia de vários tipos de combustível torna a cogeração uma grande alternativa energética atualmente.

A geração de termelétrica é a principal fonte de energia elétrica do mundo, com ampla variedade de combustível nesta forma de geração. Combustíveis fósseis, biomassa, geotérmica e nuclear, considerando a geração a partir de óleos derivados do petróleo, gás natural, carvão mineral e combustíveis nucleares são responsáveis por aproximadamente 82% da produção de energia (JUNIOR, 2009).

Pode-se compreender de melhor maneira a importância das termelétricas ao comparar-se com outras fontes de energia como hidráulica, que tem baixo custo e é renovável, porém necessita de reservatórios de armazenagem de água que normalmente implicam inundar grandes áreas. Considerando os longos prazos para implantação de um sistema de geração hidráulico em contraste com a crescente demanda de energia para desenvolvimento econômico, foram necessárias fontes de energias alternativas como a de origem térmica, tendo característica de

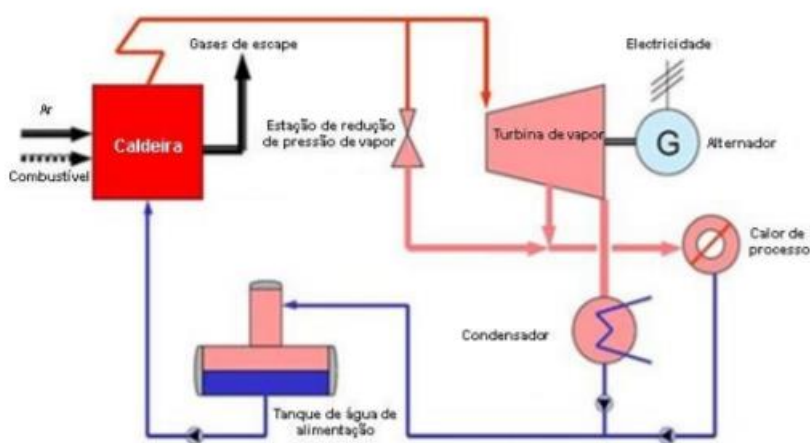
curto prazo necessário para implantação e pelo custo de operação, mesmo sendo maior que comparado a hidrelétricas, são menores que outras de origem não hidráulicas (JUNIOR, 2009).

As plantas de geração termelétricas que são baseadas no ciclo de Rankine são amplamente utilizadas para gerar grandes quantidades de energia elétrica, devido à quantidade instalada em todo mundo, tem grande confiabilidade e grandes recursos de manutenção disponíveis. Com a aplicação de melhorias desenvolvidas nos sistemas de combustão e os avanços tecnológicos, a poluição, que é uma das maiores preocupações da utilização de combustíveis fósseis, tem sido reduzida com grande significado (JUNIOR, 2009).

Em linhas, Ripoli & Ripoli (2009) definem cogeração como a produção combinada de calor útil e a energia mecânica de um sistema constituído de turbina de vapor, que aciona um gerador de corrente elétrica.

Nogueira e Santos (1995) descreveram vantagens no uso de sistemas de cogeração no setor terciário, a partir da redução acentuada das perdas térmicas decorrente da produção combinada de calor e energia elétrica. A Figura 4 demonstra um exemplar de cogeração:

Figura 4: Sistema cogeração



Fonte: Cogen Portugal (2016).

3.5 TURBINAS A VAPOR

Segundo Gref (2007), assim como motores a combustão interna, a turbina a vapor é um equipamento que converte energia do combustível em energia mecânica. Essa

transformação de energia necessita de uma substância para operar, em geral, a água que sofre no processo muda de estado líquido para vapor e vice-versa. Assim como em uma panela de pressão o vapor é liberado por uma diferença de pressão, no caso das caldeiras ele é conduzido até a turbina onde transfere parte da energia cinética, que, com conjunto de hélices, produz rotação no eixo da turbina, que faz o vapor diminuir de pressão e temperatura.

A turbina sofre deslocamento porque a pressão exercida sobre as partes superiores das hélices pelo vapor em alta temperatura é maior que a pressão exercida pelas partes inferiores pelo vapor de baixa temperatura, sem essa diferença de pressão a turbina não giraria. A existência da pressão sobre as partes inferiores das pás da turbina impede que o equipamento seja perfeitamente eficiente, mesmo sem a presença de atrito (HEWITT, 2015).

Para que a turbina tenha um movimento uniforme, é preciso garantir o fornecimento de vapor a alta pressão, que é fornecido pela caldeira enquanto houver água e combustível (GREF, 2007).

A roda de turbina é o meio mais eficaz para transformar a energia de um gás de alta pressão e temperatura, o gás perde temperatura e pressão à medida que se expande transformando sua energia em trabalho. A grande maioria das turbinas empregadas em turbinas a gás é do tipo axial por apresentar maior eficiência entorno de 75 a 90%. A turbina pode ser equipada com diferentes estágios de palhetas estatoras e rotoras dependendo da aplicação e projeto. As primeiras turbinas a gás construídas para indústrias têm máquinas de construção pesada com projetos largamente das práticas utilizadas na fabricação de turbinas a vapor. Estas turbinas deram origem às turbinas atuais, que são chamadas de turbinas industriais para serviço pesado, e têm como características potência elevada, projetos com pouca restrição quanto a peso e tamanho, mancais de deslizamento e boa durabilidade com fácil acesso para inspeção e manutenção. Suas principais vantagens são a longa vida útil, eficiência térmica, baixo ruído, agregando confiabilidade operacional, e tendo como desvantagem o aumento de peso e tamanho (QUEIROZ; MATIAS, 2003).

3.6 CICLO RANKINE

O ciclo de Rankine é um ciclo ideal de potência, como sendo ideal não apresenta degradação da energia, chamada de Entropia, que é a quantidade de energia que não é convertida em trabalho mecânico. E possui quatro etapas básicas: fornecimento de calor na caldeira à pressão constante, expansão isentrópica na turbina, perda de calor no condensador à

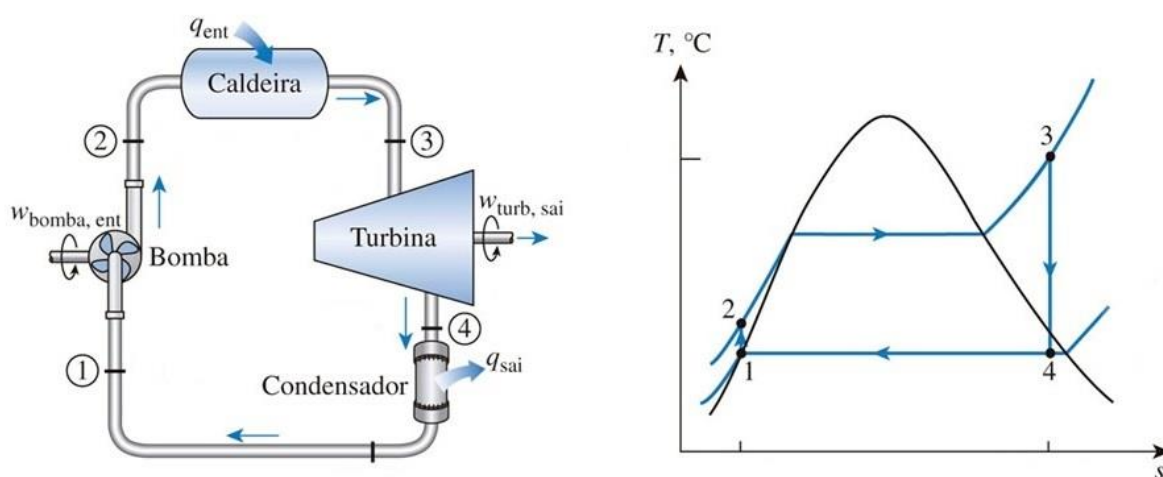
pressão constante e compressão isentrópica na bomba. A água, sendo fluido de trabalho, é injetada na caldeira no estado termodinâmico de líquido comprimido, para ser aquecida e sair como vapor superaquecido (ÇENGEL; BOLES, 2013).

O vapor carrega alto conteúdo energético na entalpia, é utilizado para movimentar a turbina e gera trabalho; neste processo, há perda de energia do fluido, assim formando uma mistura saturada líquido-vapor, que segue para condensador, ou até mesmo para outros processos em que seja necessária utilização da mistura (ÇENGEL; BOLES, 2013).

Para melhorar a eficiência deste ciclo, foram criadas alternativas e inovações, como o reaquecimento da água, ciclo de Rankine com reaquecimento. Nesta situação, a água que sai da turbina retorna à caldeira, onde ocorre novamente o aquecimento, sendo direcionada para outra turbina ou até para a mesma para gerar mais trabalho (ÇENGEL; BOLES, 2013).

Atualmente, o ciclo de Rankine é o mais utilizado em setores industriais para produção de trabalho mecânico ou de eixo, para produção de energia elétrica, que pode ser observado na Figura 5, além de ser utilizado para aproveitar o vapor ou subprodutos que servem como combustível, gerados durante o processo produtivo, utilizado para geração de energia elétrica (GRANET, 1990).

Figura 5: Aplicação ciclo Rankine



Fonte: Çengel e Boles (2013).

3.7 CALOR DISPONIBILIZADO E RENDIMENTO

Uma individualidade característica de regime de trabalho das centrais termoelétricas consiste em que a produção calorífica de energia elétrica através da caldeira deve corresponder com regularidade em sua utilização. Com objetivo de garantir o funcionamento e a segurança de uma central elétrica, é necessário conhecer a variação de consumo de energia em relação a tempo. Em regime de serviço, as centrais elétricas são avaliadas mediante o coeficiente de utilização da potência instalada (também chamado de fator de capacidade) e coeficiente o fator de carga (BAZZO, 1992).

Segundo Çengel e Boles toda experiência efetuada conduz à verificação da primeira lei, diretamente ou não, equação 1:

$$Q = \Delta E + W \quad (1)$$

Onde:

Q – Energia;

W - Trabalho realizado;

ΔE - Toda energia representada no sistema;

3.7.1 Temperatura do fluido na entrada do sistema.

A lei da conservação da energia segundo Çengel e Boles (2013), um sistema termodinâmico fechado, isto é, sem trocar calor com outros meios, todo calor transferido por um corpo e absorvido pelos demais, logo a Equação 2:

$$\dot{m}_1 T_1 + \dot{m}_2 T_2 = \dot{m}_3 T_3 \quad (2)$$

Em que:

$\dot{m}_1$ – Massa água;

T – Temperatura.

3.7.2 Energia fornecida ao fluido pela caldeira

Conforme a primeira lei da termodinâmica segundo Pankrátov (1987), a energia proveniente da caldeira pode ser calculada através da energia carregada pelo vapor, adquirida pela Equação 1, levando em consideração a entalpia na temperatura e pressão conforme Anexo A.

$$Q = \dot{m}(h_s - h_e) \quad (3)$$

Onde:

Q – Energia;

h_s - Entalpia vapor de saída;

h_e - Entalpia vapor de entrada;

$\dot{m}$ - Vazão mássica.

3.7.3 Rendimento da caldeira.

Para avaliar o rendimento das unidades geradoras de vapor, é a relação entre a energia fornecida ao fluido e a quantidade de energia gasta para realizar esta tarefa. Pode ser definido a partir da fórmula de Pankrátov (1987). Equação 4:

$$\eta_c = \frac{Q}{M.PCI} \quad (4)$$

η_c = Rendimento caldeira;

Q = Energia saída caldeira;

M = Massa combustível;

PCI= Poder calorífico do combustível.

3.7.4 Trabalho realizado na turbina

Considerando o processo em regime permanente, desprezando a transferência de calor entre turbina e vizinhanças, assim como variação de energia cinética potencial, a equação 5 em

função da conservação da massa e a primeira lei da termodinâmica para volume de controle levam a seguinte equação abaixo (Çengel e boles, 2013).

$$W = \dot{m}(h_e - h_s) \quad (5)$$

onde:

W - Trabalho realizado;

$\dot{m}$ - Vazão mássica;

h_e - Entalpia entrada;

h_s - Entalpia saída.

3.7.5 Rendimento térmico da turbina

Conforme Pankrátov (1987), o cálculo que determina a eficiência do equipamento térmico, neste caso a turbina pode ser determinada pela equação 6:

$$\eta_{tt} = \frac{w}{Q} \quad (6)$$

Em que:

η_{tt} - Rendimento térmico da turbina;

w - Energia transformada;

Q - Energia entrada.

3.7.6 Massa combustível para CCE

Ainda segundo Pankrátov (1987), a massa de combustível utilizada no gerador de vapor necessária para elevar a energia transformada na turbina, levando em consideração a eficiência do equipamento, pode ser definida na equação 7:

$$be = \frac{(h_e - h_s) \cdot \dot{m}}{PCI \cdot \eta_c} \quad (7)$$

be - Consumo combustível;

h_e - Entalpia entrada;

h_s - Entalpia saída.

$\dot{m}$ - Vazão mássica;

PCI= Poder calorífico do combustível.

η_c = Rendimento caldeira.

3.7.7 Cálculo da produção de energia elétrica

Dentro de um sistema de cogeração, há diversos componentes que utilizam da energia produzida para autoalimentar-se, assim, a real quantidade de energia produzida pode ser calculada pela equação 8: (PANKRÁTOV,1987)

$$E^d = E^{gen} - E^{n.i} \quad (8)$$

Onde:

E^d = Energia produzida;

E^{gen} = Energia gerada;

$E^{n.i}$ = Energia consumida.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi realizado em uma empresa privada de produção de queijos, localizada na cidade de Planalto, Paraná, durante o período de julho a novembro do ano de 2020, em busca do dimensionamento de um conjunto a vapor para produção de energia, comparando sistema proposto com sistema atual.

A pesquisa realizada é de cunho descritivo. Segundo Gil (2002), as pesquisas descritivas têm como objetivo a descrição das características de determinado fenômeno, ou o estabelecer de relações entre variáveis, com característica na utilização de técnicas padronizadas na coleta de dados. É de caráter qualitativo, pois todos os dados coletados têm formato numérico, para posteriormente serem utilizados em cálculos que também apresentarão resultados numéricos. É de cunho transversal, pois foi realizada em um curto período de 4 meses.

O início da pesquisa foi realizado por meios bibliográficos, em livros científicos que abordam os temas de caldeiras e turbinas a vapor, como principais autores Çengel e Pankrátov, para buscar entender os conceitos e a dinâmica desses sistemas, além de utilizar cálculos e equações disponíveis, e citados no trabalho, para determinar variáveis-chaves para conclusão do estudo.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Informações do laticínio

A empresa estudada opera em regime permanente, com consumo de 1.120 kw/h, em horários de pico entre as 18h e 21h. A instalação é alimentada por geradores estacionários, alimentados com combustível diesel comum, com valor aproximado de 3 reais por litro. Abaixo é possível verificar, de acordo com a Tabela 1, os geradores com sua respectiva capacidade de produção de energia.

Tabela 1: Dados dos geradores.

	Consumo de combustível	Produção
Gerador 1	19 L/hora	300Kw/h
Gerador 2	19 L/hora	300Kw/h
Gerador 3	19 L/hora	300Kw/h
Gerador 4	12 L/hora	220kw/h
Geradores 1,2,3,4	6.210L/mês	33.600Kw/mês

Fonte: Próprio Autor (2020).

Como demonstra a tabela, o custo do kw/h nos horários entre as 18 e 21 horas é de 0,55446 centavos por kw.

Com os dados fornecidos pela empresa estudada, será possível uma comparação do sistema proposto e o sistema que opera atualmente. Na tabela 2 abaixo, é possível verificar dados de trabalho da caldeira, relação de operação e consumo de combustível.

Tabela 2: Dados da caldeira do laticínio

MODELO	CAF-GF-4000	
PRESSÃO TRABALHO	10,6	Kgf/cm ²
PRESSÃO OPERAÇÃO	10	Kgf/cm ²
CAPACIDADE PRODUÇÃO	4000	kgv/h
PRODUÇÃO	4000	kgv/h
REGIME TRABALHO	24	horas/dia
CONSUMO CAVACO	237,5	kg/h
VALOR CAVACO	14	centavos/kg

Fonte: Próprio Autor (2020).

Através da tabela 3, é possível notar a relação de vapor consumido e leite processado na indústria.

Tabela 3: Dados de produção do laticínio

VAPOR	4000	Kgv/h
LEITE	150.000	L
VAPOR POR LITRO DE LEITE	0,64	Kgv/L
CUSTO 1 KW	48,1614	Centavos/kW
CUSTO 2 KW	55,446	Centavos/kW

Fonte: Próprio Autor (2020).

4.1.2 Nova caldeira

A partir do catálogo do fabricante selecionado, foram extraídas informações necessárias para cálculos que serão realizados posteriormente, dados mais essenciais podem ser encontrados abaixo. A tabela 4 apresenta informações nova caldeira:

Tabela 4: Informações caldeira proposta

MODELO	SCHM-15.0	
PRODUÇÃO DE VAPOR	15.000	kgv/h
PRESSÃO DE OPERAÇÃO	30	Kgf/cm ²
SUPERFÍCIE DE TROCA TÉRMICA	652	M ²
CAPACIDADE CALORIFICA	9.670.500	Kcal/h
CONSUMO CAVACO	4.600	Kg/h

Fonte: O autor adaptado de Secamaq (2020).

4.2 MÉTODOS

Para a realização do projeto, foram levados em conta todos os cálculos a serem feitos segundo as fórmulas já citadas anteriormente. Para cálculo e obtenção de informações, foi necessário todo o período letivo 2020/2 do calendário acadêmico do Centro Acadêmico Assis Gurgacz, pois as atividades do projeto foram conciliadas com as disciplinas cursadas no décimo período de Engenharia Mecânica.

4.2.1 Cálculo da temperatura de entrada da água na caldeira

Levando em consideração retorno de consensado da indústria em 50% com temperatura de 90°C, e os demais 50% fornecidos a uma temperatura de 25°C, tendo relação de equilíbrio de entrada e saída de massa, temos seguinte equilíbrio:

$$\begin{aligned}\dot{m}_1 T_1 C_{p1} + \dot{m}_2 T_2 C_{p2} &= \dot{m}_3 T_3 C_{p3} \\ 7.500 \frac{kg}{h} * 90^\circ C * 1 + 7.500 \frac{kg}{h} * 70^\circ C * 1 &= 15.000 \frac{kg}{h} T_3 * 1 \\ 675.000 \frac{kg}{h} ^\circ C + 525.000 \frac{kg}{h} ^\circ C &= 15.000 \frac{kg}{h} T_3 \\ T_3 &= 80^\circ C\end{aligned}$$

4.2.2 Cálculo da energia fornecida pela caldeira ao fluido

Energia fornecida através da caldeira pode ser calculada através da variação de entalpias (anexo A), de entrada e saída do fluido, em seu determinado estado termodinâmico através da relação de pressão e temperatura (Anexo B). Assim com entrada de líquido comprimido e saída de vapor superaquecido ambas a 30kpa, temos a seguinte resolução:

$$\begin{aligned}Q &= m(h_s - h_e) \\ Q &= 15.000 \frac{kg}{h} (3.138,364 \frac{kJ}{kg} - 334,73 \frac{kJ}{kg}) \\ Q &= 42.054.510 \frac{kJ}{h}\end{aligned}$$

4.2.3 Cálculo eficiência da caldeira

O cálculo que determina a eficiência do equipamento é a relação da energia fornecida ao fluido e a massa de combustível para realizar esta ação.

$$\eta_c = \frac{Q}{m.PCI}$$

$$\eta_c = \frac{42.054.510 \frac{kJ}{h}}{4.600 \frac{kg}{h} * 10.032 \frac{kJ}{kg}}$$

$$\eta_c = 91\%$$

4.2.4 Cálculo trabalho realizado pela turbina

Calculando o trabalho realizado pela turbina, novamente em funções de variação de entalpias e vazão mássica, tendo que o fluido entra no estado de vapor superaquecido a uma pressão de 3.000 Kpa com 360°C, e sai a uma pressão de 500 Kpa em temperatura 206°C no estado de superaquecido, temos a seguinte solução:

$$W = \dot{m}(h_e - h_s)$$

$$W = 4.167 \frac{kg}{s} (3.138,364 \frac{kJ}{kg} - 2.868 \frac{kJ}{kg})$$

$$W = 1.126,60 \text{ KW}$$

Levando em consideração um rendimento para turbina de 90% estipulada pelo orientador, a turbina realiza trabalho de 1.013,94 KW.

4.2.5 Rendimento térmico da turbina

Aplicando a equação de rendimento para máquinas térmica, temos o seguinte desenvolvimento:

$$\eta_{tt} = \frac{w}{Q}$$

$$\eta_{tt} = \frac{4.055.460 \frac{kJ}{h}}{42.054.510 \frac{kJ}{h}}$$

$$\eta_{tt} = 9,64\%$$

4.2.6 Massa de combustível para alimentar o CCE

Calculando massa de combustível para alimentar o CCE, através da equação 7:

$$Be = \frac{(3.138,364 - 2.868) \frac{KJ}{kg} \cdot 15.000 \frac{kg}{h}}{10.041,66 \frac{KJ}{kg} * 0,91}$$

$$Be = 443,8 \frac{kg}{h}$$

4.2.7 Cálculo da produção de energia elétrica

Levando em consideração o consumo de energia interna do sistema, estimada em 6%, obtém-se o valor de energia produzida para fora do sistema com a equação 8:

$$E^d = E^{gen} - E^{n.i}$$

$$E^d = (1.013.94 \frac{KW}{h}) - (1000 \frac{KW}{h} * 0,06)$$

$$E^d = 953 \frac{KW}{h}$$

4.2.8 Comparação de custos entre sistema proposto e o sistema atual

A partir dos dados compilados e obtidos através das equações, pode-se fazer uma comparação de operação em relação à produção do laticínio, para isso, através da dedução simples, obtemos a equação 8 e 9:

Caldeira proposta (9)

$$= \frac{[(consumo\ de\ cavaco) * (custo)] - [(produçãoenergia1) * (valor1) + (produçãoenergia2) * (valor2)]}{leite\ processado}$$

Onde:

consumo de cavaco = consumo caldeira (kg/dia)

custo = valor pago cavaco (real/kg)

produçãoenergia1 = produção gerador (kw/dia)

produçãoenergia2 = produção gerador durante horário de pico (kw/dia)

valor1 = custo da energia (centavos/kw)

valor2 = custo da energia horário de pico (centavos/kw)

leite processado = quantidade de leite processada com a caldeira (L)

Logo:

$$\text{Caldeira proposta} = \frac{\left(110.400 \frac{\text{kg}}{\text{dia}} * 0,14 \frac{\text{real}}{\text{kg}}\right) - \left[\left(20.013 \frac{\text{kw}}{\text{dia}} * 0,481614 \frac{\text{real}}{\text{kw}}\right) + \left(2.859 \frac{\text{kw}}{\text{dia}} * 0,55446 \frac{\text{real}}{\text{kw}}\right)\right]}{562.500 \frac{\text{L}}{\text{dia}}}$$

$$\text{Caldeira proposta} = 0,00752 \frac{\text{real}}{\text{L}}$$

Para obter o custo da caldeira atual, pode-se calcular pela equação 8:

$$\text{Caldeira atual} = \frac{[(\text{consumo de cavaco}) * (\text{custo})]}{\text{leite processado}} \quad (10)$$

Onde:

consumo de cavaco = consumo caldeira (kg/dia)

custo = valor pago cavaco (centavos/kg)

leite processado = quantidade de leite processada com a caldeira (L)

Logo:

$$\text{Caldeira atual} = \frac{\left[5.700 \frac{\text{kg}}{\text{dia}} * 0,14 \frac{\text{real}}{\text{kg}}\right]}{150.000 \frac{\text{L}}{\text{dia}}}$$

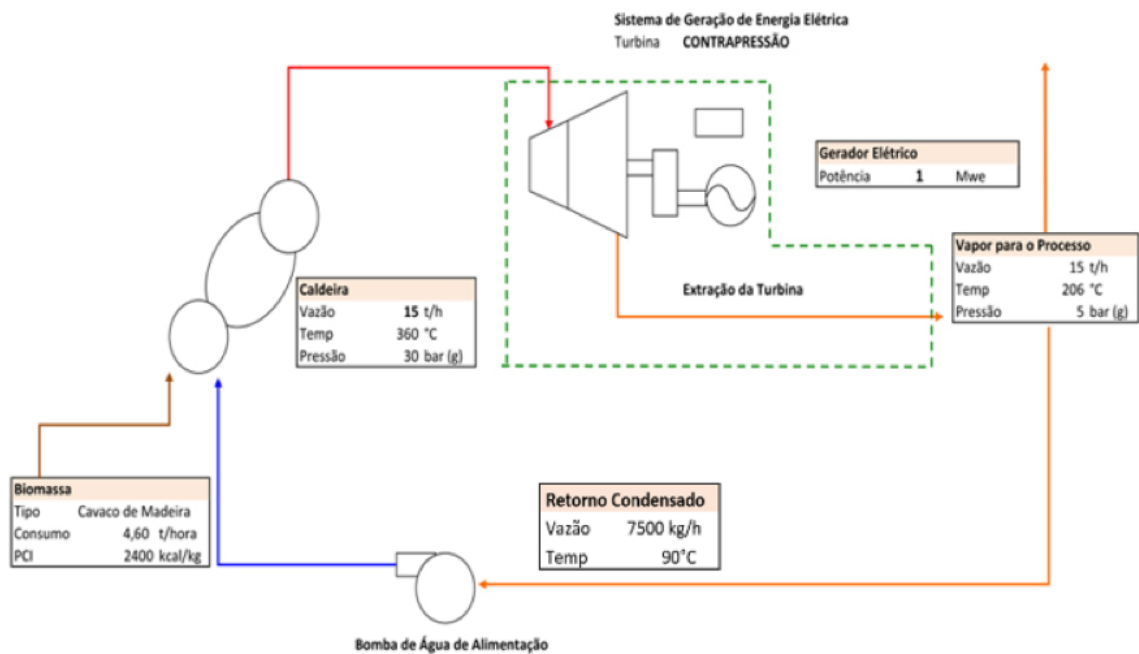
$$\text{Caldeira atual} = 0,00532 \frac{\text{real}}{\text{L}}$$

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 SISTEMA PROPOSTO

A Figura 6 demonstra uma prévia do sistema formado pela caldeira, turbina e gerador, junto com informações técnicas de cada equipamento, contendo o ciclo do vapor:

Figura 6: Fluxograma Vapor



Fonte: Próprio autor (2020).

Após o término dos cálculos e levantamento de informações descritos no trabalho, foi possível obter os dados para análise de uma prévia viabilidade de trabalho entre dois equipamentos térmicos. A tabela 5 descreve alguns resultados:

Tabela 5: Resultados

	Caldeira atual	Caldeira proposta
Consumo cavaco (kg/dia)	5.700	110.400
Capacidade industrialização leite (L/dia)	150.000	562.500
Produção de energia (kw/h)	0	940
Gasto operação por litro de leite (real/L)	0,00532	0,00752

Fonte: Próprio autor, 2020

Através dessa tabela, podemos observar que, mesmo o novo sistema proposto podendo gerar energia atendendo a certa demanda do laticínio, ainda não se provou ser mais rentável em condições de operações, levando somente em consideração que o custo por litro de leite processado se tornaria mais caro, apesar do aumento de capacidade deste novo equipamento.

Vários fatores podem ter contribuído para estes resultados, como o valor do combustível, que sofre variações entre regiões e fornecedores, assim como o valor pago pela energia elétrica, pelo fato de ser necessária uma grande quantidade de combustível para elevar a temperatura da água até que carregue energia suficiente para movimentar turbina e consequentemente o gerador.

Outro fator importante que pode influenciar os resultados é levar em consideração a presença e operação dos geradores no horário sazonal, que justificam um custo de energia mais baixo do que cobrado em regimes de pico.

5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando este trabalho se iniciou, o entusiasmo acadêmico pela pesquisa de tecnologias tão promissoras, para aplicação na minha área de formação e de atuação profissional, permitia antever um cenário pronto para grandes aplicações. Foi possível, após os estudos e cálculos, obter valores de custo de operação para ambas caldeiras, a proposta e a atual operando no laticínio, chegando à conclusão que não se torna viável a instalação do equipamento para geração de energia nesse caso, nesta linha de produção, com estes equipamentos em específico, pois o custo de operação se demonstrou ser mais alto em relação ao sistema atual devido principalmente ao fato do custo do insumo necessário (combustível) que a empresa tem que adquirir de terceiros e não tem disponibilidade como resíduo do processo industrial.

5.3 CONTRIBUIÇÕES

Por fim, constatamos que o sistema de cogeração pode ser um método alternativo para geração de energia, porém este ainda pode não ser viável devido a seu alto custo e baixo desempenho, pois este não fornece grande quantidade de energia que justifique a operação da caldeira. Outro ponto negativo é o custo do cavaco em regiões isoladas, onde se tem poucos fornecedores, aumentando assim a demanda.

5.4 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Comparação do sistema levando em consideração que não haja produção de energia por geradores no horário sazonal;
- Comparação do mesmo sistema em indústrias que possam produzir próprio combustível de alimentação como usinas de etanol;
- Verificação do sistema alterando a turbina.

REFERÊNCIAS

- ALBERICHI, Mariano. **Estudo das instalações e operações de caldeiras de uma indústria de produtos químicos do estado do Paraná, sob ótica da NR-13 e NR-28.** 2013. Trabalho de Conclusão de Curso (Especialização) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2013.
- BACHA, C. J. C. **Economia e política agrícola no Brasil.** São Paulo: Atlas, 2004.
- BAZZO, E. **Geração de Vapor.** Florianópolis: Editora da UFSC, 1992.
- BIZZO, A. V. **Geração, distribuição e utilização de vapor.** Campinas: Unicamp, 2003.
- BRASIL. **Balanço energético nacional 2009-Ano base 2008.** Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética, 2009.
- CEMIG. **Estudo de otimização energética: setoriais laticínios.** Belo Horizonte: 1989.
- COGEN – **Associação da Indústria de Cogeração de Energia.** Disponível em: www.cogen.com.br/datacogen. Acesso em: 10 set. 2020.
- ÇENGEL, A. Y.; BOLES, A. M. **Termodinâmica.** 4. ed. Porto Alegre: AGMH. 2013.
- ÇENGEL. A. Y., GHAJAR. J. A. **Transferência de calor e massa.** 4. ed. 2012.
- ELEKTRO, 2017. Disponível em: <https://www.elektro.com.br> . Acesso em 15 out. 2020.
- FERRARINI, S. R.; RODRIGUES. S. R. **Avaliação termodinâmica preliminar da influência do vácuo do condensador no desempenho de uma central de cogeração típica da indústria siderúrgica.** Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória. 2013.
- GADANHA, C. D.; MOLIN. J. P.; COELHO, J. L. D.; TOMIMORI, S. M. A. W. **Máquinas e implementos agrícolas do Brasil.** São Paulo 1991.
- GRANET. I. **Termodinâmica e energia térmica.** [s.l.]: Editora Prentice Hale do Brasil, 1990.
- GIL. C. A. **Como elaborar projetos de pesquisa.** 4. ed. São Paulo: Atlas S.A. 2002.
- REF. **Física 2, física térmica, óptica.** 5. ed. São Paulo, 2007.
- INCORPERA. P. K., DEWITT. P. D., BERGAMAN. L.T. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 6. ed. Rio de Janeiro: Editora S.A., 2008.
- INFOESCOLA, **Ponto triplo de uma substância.** Disponível em: <https://www.infoescola.com/fisica/ponto-triplo-de-uma-substancia/>. Acesso em 03 out. 2020.

CARVALHO. R. V. **Indústria de laticínios no Rio Grande do Sul: um panorama após o movimento de fusões e aquisições.** 2002.

JUNIOR, O. B. V. **Modelagem de central termelétrica a vapor para simulação dinâmica.** Vitória, 2009.

NASCIMENTO, J. G. A.; RENNÓ, I. V. C.; SALOMON, L. B. R.; AMARAL, C. A. A Cogeração no Brasil. Situação Atual e Possibilidades Futuras. **Revista Eletricidade Moderna.** p. 84-95. 1997.

NOGUEIRA. L. A. H., SANTOS. A. H. M. Co-geração no setor terciário. Possibilidades, Vantagens e Limitações. **Revista Eletricidade Moderna**, p. 50-58. 1995.

PANKRÁTOV. G. **Problemas de termotécnica.** [s.l.], Editorial Mir Moscú, 1987.

HEWITT. P. **Física conceitual.** 12. ed. Agosto. 2015

QUEIROZ, Manoel; MATIAS, José Augusto. **Básico de Turbinas a Gás. Manual da PETROBRAS.** Rio de Janeiro, 2003.

RIPOLI. T. C. C., RIPOLI. M. L. C. **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente.** Piracicaba: os autores, 2009.

SAREV. S. A. **Máquinas térmicas I. Características e tratamento de água para geradores de vapor.** 1992

SCHMIDT. W. F., HENDERSON. E. R., WOLGEMUTH. H. C. **Introdução as ciências térmicas, termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor.** 2. ed. Editora: Edgard Blucher Ltda. São Paulo, 2018.

ANEXO

Anexo A – Tabelas propriedades da água em função da pressão e temperatura Çengel e Boles 2013

Água saturada: tabela em função da temperatura												
Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m ³ /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v_f	v_g	u_f	u_{fg}	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0,00	2375,33	2375,33	0,00	2501,35	2501,35	0,0000	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,27	2382,24	20,98	2489,57	2510,54	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,16	2389,15	41,99	2477,75	2519,74	0,1510	8,7498	8,9007
15	1,705	0,001001	77,925	62,98	2333,06	2396,04	62,98	2465,93	2528,91	0,2245	8,5569	8,7813
20	2,339	0,001002	57,7897	83,94	2318,98	2402,91	83,94	2454,12	2538,06	0,2966	8,3706	8,6671
25	3,169	0,001003	43,3593	104,86	2304,90	2409,76	104,87	2442,30	2547,17	0,3673	8,1905	8,5579
30	4,246	0,001004	32,8922	125,77	2290,81	2416,58	125,77	2430,48	2556,25	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,628	0,001006	25,2158	146,65	2276,71	2423,36	146,66	2418,62	2565,28	0,5052	7,8478	8,3530
40	7,384	0,001008	19,5229	167,53	2262,57	2430,11	167,54	2406,72	2574,26	0,5724	7,6845	8,2569
45	9,593	0,001010	15,2581	188,41	2248,40	2436,81	188,42	2394,77	2583,19	0,6386	7,5261	8,1647
50	12,350	0,001012	12,0318	209,30	2234,17	2443,47	209,31	2382,75	2592,06	0,7037	7,3725	8,0762
55	15,758	0,001015	9,56835	230,19	2219,89	2450,08	230,20	2370,66	2600,86	0,7679	7,2234	7,9912
60	19,941	0,001017	7,67071	251,09	2205,54	2456,63	251,11	2358,48	2609,59	0,8311	7,0784	7,9095
65	25,03	0,001020	6,19656	272,00	2191,12	2463,12	272,03	2346,21	2618,24	0,8934	6,9375	7,8309
70	31,19	0,001023	5,04217	292,93	2176,62	2469,55	292,96	2333,85	2626,80	0,9548	6,8004	7,7552
75	38,58	0,001026	4,13123	313,87	2162,03	2475,91	313,91	2321,37	2635,28	1,0154	6,6670	7,6824
80	47,39	0,001029	3,40715	334,84	2147,36	2482,19	334,88	2308,77	2643,66	1,0752	6,5369	7,6121
85	57,83	0,001032	2,82757	355,82	2132,58	2488,40	355,88	2296,05	2651,93	1,1342	6,4102	7,5444
90	70,14	0,001036	2,36056	376,82	2117,70	2494,52	376,90	2283,19	2660,09	1,1924	6,2866	7,4790
95	84,55	0,001040	1,98186	397,86	2102,70	2500,56	397,94	2270,19	2668,13	1,2500	6,1659	7,4158
100	101,3	0,001044	1,67290	418,91	2087,58	2506,50	419,02	2257,03	2676,05	1,3068	6,0480	7,3548
105	120,8	0,001047	1,41936	440,00	2072,34	2512,34	440,13	2243,70	2683,83	1,3629	5,9328	7,2958
110	143,3	0,001052	1,21014	461,12	2056,96	2518,09	461,27	2230,20	2691,47	1,4184	5,8202	7,2386
115	169,1	0,001056	1,03658	482,28	2041,44	2523,72	482,46	2216,50	2698,96	1,4733	5,7100	7,1832
120	198,5	0,001060	0,89186	503,48	2025,76	2529,24	503,69	2202,61	2706,30	1,5275	5,6020	7,1295
125	232,1	0,001065	0,77059	524,72	2009,91	2534,63	524,96	2188,50	2713,46	1,5812	5,4962	7,0774
130	270,1	0,001070	0,66850	546,00	1993,90	2539,90	546,29	2174,16	2720,46	1,6343	5,3925	7,0269
135	313,0	0,001075	0,58217	567,34	1977,69	2545,03	567,67	2159,59	2727,26	1,6869	5,2907	6,9777
140	361,3	0,001080	0,50885	588,72	1961,30	2550,02	589,11	2144,75	2733,87	1,7390	5,1908	6,9298
145	415,4	0,001085	0,44632	610,16	1944,69	2554,86	610,61	2129,65	2740,26	1,7906	5,0926	6,8832
150	475,9	0,001090	0,39278	631,66	1927,87	2559,54	632,18	2114,26	2746,44	1,8417	4,9960	6,8378
155	543,1	0,001096	0,34676	653,23	1910,82	2564,04	653,82	2098,56	2752,39	1,8924	4,9010	6,7934
160	617,8	0,001102	0,30706	674,85	1893,52	2568,37	675,53	2082,55	2758,09	1,9426	4,8075	6,7501
165	700,5	0,001108	0,27269	696,55	1875,97	2572,51	697,32	2066,20	2763,53	1,9924	4,7153	6,7078
170	791,7	0,001114	0,24283	718,31	1858,14	2576,46	719,20	2049,50	2768,70	2,0418	4,6244	6,6663
175	892,0	0,001121	0,21680	740,16	1840,03	2580,19	741,16	2032,42	2773,58	2,0909	4,5347	6,6256
180	1002,2	0,001127	0,19405	762,08	1821,62	2583,70	763,21	2014,96	2778,16	2,1395	4,4461	6,5857

Água saturada: tabela em função da temperatura

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m³/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v_f	v_g	u_f	u_{fg}	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
185	1122,7	0,001134	0,17409	784,08	1802,90	2586,98	785,36	1997,07	2782,43	2,1878	4,3586	6,5464
190	1254,4	0,001141	0,15654	806,17	1783,84	2590,01	807,61	1978,76	2786,37	2,2358	4,2720	6,5078
195	1397,8	0,001149	0,14105	828,36	1764,43	2592,79	829,96	1959,99	2789,96	2,2835	4,1863	6,4697
200	1553,8	0,001156	0,12736	850,64	1744,66	2595,29	852,43	1940,75	2793,18	2,3308	4,1014	6,4322
205	1723,0	0,001164	0,11521	873,02	1724,49	2597,52	875,03	1921,00	2796,03	2,3779	4,0172	6,3951
210	1906,3	0,001173	0,10441	895,51	1703,93	2599,44	897,75	1900,73	2798,48	2,4247	3,9337	6,3584
215	2104,2	0,001181	0,09479	918,12	1682,94	2601,06	920,61	1879,91	2800,51	2,4713	3,8507	6,3221
220	2317,8	0,001190	0,08619	940,85	1661,49	2602,35	943,61	1858,51	2802,12	2,5177	3,7683	6,2860
225	2547,7	0,001199	0,07849	963,72	1639,58	2603,30	966,77	1836,50	2803,27	2,5639	3,6863	6,2502
230	2794,9	0,001209	0,07158	986,72	1617,17	2603,89	990,10	1813,85	2803,95	2,6099	3,6047	6,2146
235	3060,1	0,001219	0,06536	1009,88	1594,24	2604,11	1013,61	1790,53	2804,13	2,6557	3,5233	6,1791
240	3344,2	0,001229	0,05976	1033,19	1570,75	2603,95	1037,31	1766,50	2803,81	2,7015	3,4422	6,1436
245	3648,2	0,001240	0,05470	1056,69	1546,68	2603,37	1061,21	1741,73	2802,95	2,7471	3,3612	6,1083
250	3973,0	0,001251	0,05013	1080,37	1522,00	2602,37	1085,34	1716,18	2801,52	2,7927	3,2802	6,0729
255	4319,5	0,001263	0,04598	1104,26	1496,66	2600,93	1109,72	1689,80	2799,51	2,8382	3,1992	6,0374
260	4688,6	0,001276	0,04220	1128,37	1470,64	2599,01	1134,35	1662,54	2796,89	2,8837	3,1181	6,0018
265	5081,3	0,001289	0,03877	1152,72	1443,87	2596,60	1159,27	1634,34	2793,61	2,9293	3,0368	5,9661
270	5498,7	0,001302	0,03564	1177,33	1416,33	2593,66	1184,49	1605,16	2789,65	2,9750	2,9551	5,9301
275	5941,8	0,001317	0,03279	1202,23	1387,94	2590,17	1210,05	1574,92	2784,97	3,0208	2,8730	5,8937
280	6411,7	0,001332	0,03017	1227,43	1358,66	2586,09	1235,97	1543,55	2779,53	3,0667	2,7903	5,8570
285	6909,4	0,001348	0,02777	1252,98	1328,41	2581,38	1262,29	1510,97	2773,27	3,1129	2,7069	5,8198
290	7436,0	0,001366	0,02557	1278,89	1297,11	2575,99	1289,04	1477,08	2766,13	3,1593	2,6227	5,7821
295	7992,8	0,001384	0,02354	1305,21	1264,67	2569,87	1316,27	1441,78	2758,05	3,2061	2,5375	5,7436
300	8581,0	0,001404	0,02167	1331,97	1230,99	2562,96	1344,01	1404,93	2748,94	3,2533	2,4511	5,7044
305	9201,8	0,001425	0,01995	1359,22	1195,94	2555,16	1372,33	1366,38	2738,72	3,3009	2,3633	5,6642
310	9856,6	0,001447	0,01835	1387,03	1159,37	2546,40	1401,29	1325,97	2727,27	3,3492	2,2737	5,6229
315	10547	0,001472	0,01687	1415,44	1121,11	2536,55	1430,97	1283,48	2714,44	3,3981	2,1821	5,5803
320	11274	0,001499	0,01549	1444,55	1080,93	2525,48	1461,45	1238,64	2700,08	3,4479	2,0882	5,5361
325	12040	0,001528	0,01420	1474,44	1038,57	2513,01	1492,84	1191,13	2683,97	3,4987	1,9913	5,4900
330	12845	0,001561	0,01300	1505,24	993,66	2498,91	1525,29	1140,56	2665,85	3,5506	1,8909	5,4416
335	13694	0,001597	0,01186	1537,11	945,77	2482,88	1558,98	1086,37	2645,35	3,6040	1,7863	5,3903
340	14586	0,001638	0,01080	1570,26	894,26	2464,53	1594,15	1027,86	2622,01	3,6593	1,6763	5,3356
345	15525	0,001685	0,00978	1605,01	838,29	2443,30	1631,17	964,02	2595,19	3,7169	1,5594	5,2763
350	16514	0,001740	0,00881	1641,81	776,58	2418,39	1670,54	893,38	2563,92	3,7776	1,4336	5,2111
355	17554	0,001807	0,00787	1681,41	707,11	2388,52	1713,13	813,59	2526,72	3,8427	1,2951	5,1378
360	18651	0,001892	0,00694	1725,19	626,29	2351,47	1760,48	720,52	2481,00	3,9146	1,1379	5,0525
365	19807	0,002011	0,00599	1776,13	526,54	2302,67	1815,96	605,44	2421,40	3,9883	0,9487	4,9470
370	21028	0,002213	0,00493	1843,84	384,69	2228,53	1890,37	441,75	2332,12	4,1104	0,6868	4,7972
374,1	22089	0,003155	0,00315	2029,58	0,00	2029,58	2089,26	0,00	2089,26	4,4297	0,0000	4,4297

Água saturada: tabela em função da pressão

Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico (m ³ /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
<i>P</i>	<i>T</i>	<i>v_f</i>	<i>v_g</i>	<i>u_f</i>	<i>u_{fg}</i>	<i>u_g</i>	<i>h_f</i>	<i>h_{fg}</i>	<i>h_g</i>	<i>s_f</i>	<i>s_{fg}</i>	<i>s_g</i>
0,6113	0,01	0,001000	206,132	0	2375,3	2375,3	0,00	2501,30	2501,30	0,0000	9,1562	9,1562
1	6,98	0,001000	129,20802	29,29	2355,69	2384,98	29,29	2484,89	2514,18	0,1059	8,8697	8,9756
1,5	13,03	0,001001	87,98013	54,70	2338,63	2393,32	54,70	2470,59	2525,30	0,1956	8,6322	8,8278
2	17,50	0,001001	67,00385	73,47	2326,02	2399,48	73,47	2460,02	2533,49	0,2607	8,4629	8,7236
2,5	21,08	0,001002	54,25385	88,47	2315,93	2404,40	88,47	2451,56	2540,03	0,3120	8,3311	8,6431
3	24,08	0,001003	45,66502	101,03	2307,48	2408,51	101,03	2444,47	2545,50	0,3545	8,2231	8,5775
4	28,96	0,001004	34,80015	121,44	2293,73	2415,17	121,44	2432,93	2554,37	0,4226	8,0520	8,4746
5	32,88	0,001005	28,19251	137,79	2282,70	2420,49	137,79	2423,66	2561,45	0,4763	7,9187	8,3950
7,5	40,29	0,001008	19,23775	168,76	2261,74	2430,50	168,77	2406,02	2574,79	0,5763	7,6751	8,2514
10	45,81	0,001010	14,67355	191,79	2246,10	2437,89	191,81	2392,82	2584,63	0,6492	7,5010	8,1501
15	53,97	0,001014	10,02218	225,90	2222,83	2448,73	225,91	2373,14	2599,06	0,7548	7,2536	8,0084
20	60,06	0,001017	7,64937	251,35	2205,36	2456,71	251,38	2358,33	2609,70	0,8319	7,0766	7,9085
25	64,97	0,001020	6,20424	271,88	2191,21	2463,08	271,90	2346,29	2618,19	0,8930	6,9383	7,8313
30	69,10	0,001022	5,22918	289,18	2179,22	2468,40	289,21	2336,07	2625,28	0,9439	6,8247	7,7686
40	75,87	0,001026	3,99345	317,51	2159,49	2477,00	317,55	2319,19	2636,74	1,0258	6,6441	7,6700
50	81,33	0,001030	3,24034	340,42	2143,43	2483,85	340,47	2305,40	2645,87	1,0910	6,5029	7,5839
75	91,77	0,001037	2,21711	394,29	2112,39	2496,67	384,36	2278,59	2662,96	1,2129	6,2434	7,4563
100	99,62	0,001043	1,69400	417,33	2088,72	2506,06	417,44	2258,02	2675,46	1,3025	6,0568	7,3593
125	105,99	0,001048	1,37490	444,16	2069,32	2513,48	444,30	2241,05	2685,35	1,3739	5,9104	7,2843
150	111,37	0,001053	1,15933	466,92	2052,72	2519,64	467,08	2226,46	2693,54	1,4335	5,7897	7,2232
175	116,06	0,001057	1,00363	486,78	2038,12	2524,90	486,97	2213,57	2700,53	1,4848	5,6868	7,1717
200	120,23	0,001061	0,88573	504,47	2025,02	2529,49	504,68	2201,96	2706,63	1,5300	5,5970	7,1271
225	124,00	0,001064	0,79325	520,45	2013,10	2533,56	520,69	2191,35	2712,04	1,5705	5,5173	7,0878
250	127,43	0,001067	0,71871	535,08	2002,14	2537,21	535,34	2181,55	2716,89	1,6072	5,4455	7,0526
275	130,60	0,001070	0,65731	548,57	1991,95	2540,53	548,87	2172,42	2721,29	1,6407	5,3801	7,0208
300	133,55	0,001073	0,60582	561,13	1982,43	2543,55	561,45	2163,85	2725,30	1,6717	5,3201	6,9918
325	136,30	0,001076	0,56201	572,88	1973,46	2546,34	573,23	2155,76	2728,99	1,7005	5,2646	6,9651
350	138,88	0,001079	0,52425	583,93	1964,98	2548,92	584,31	2148,10	2732,40	1,7274	5,2130	6,9404
375	141,32	0,001081	0,49137	594,38	1956,93	2551,31	594,79	2140,79	2735,58	1,7527	5,1647	6,9174
400	143,63	0,001084	0,46246	604,29	1949,26	2553,55	604,73	2133,81	2738,53	1,7766	5,1193	6,8958
450	147,93	0,001088	0,41398	622,75	1934,87	2557,62	623,24	2120,67	2743,91	1,8206	5,0359	6,8565
500	151,86	0,001093	0,37489	639,66	1921,57	2561,23	640,21	2108,47	2748,67	1,8606	4,9606	6,8212
550	155,48	0,001097	0,34268	655,30	1909,17	2564,47	655,91	2097,04	2752,94	1,8972	4,8920	6,7892
600	158,85	0,001101	0,31567	669,88	1897,52	2567,40	670,54	2086,26	2756,80	1,9311	4,8289	6,7600
650	162,01	0,001104	0,29268	683,55	1886,51	2570,06	684,26	2076,04	2760,30	1,9627	4,7704	6,7330
700	164,97	0,001108	0,27286	696,43	1876,07	2572,49	697,20	2066,30	2763,50	1,9922	4,7158	6,7080
750	167,77	0,001111	0,25560	708,62	1866,11	2574,73	709,45	2056,89	2766,43	2,0199	4,6647	6,6846
800	170,43	0,001115	0,24043	720,20	1856,58	2576,79	721,10	2048,04	2769,13	2,0461	4,6166	6,6627

Água saturada: tabela em função da pressão

Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico (m³/kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
P	T	v_f	v_g	u_f	u_{fg}	u_g	h_f	h_{fg}	h_g	s_f	s_{fg}	s_g
850	172,96	0,001118	0,22698	731,25	1847,45	2578,69	732,20	2039,43	0,2771,63	2,0709	4,5711	6,6421
900	175,38	0,001121	0,21497	741,81	1838,65	2580,46	742,82	2031,12	2773,94	2,0846	4,5280	6,6225
950	177,69	0,001124	0,20419	751,94	1830,17	2582,11	753,00	2023,08	2776,08	2,1171	4,4869	6,6040
1000	179,91	0,001127	0,19444	761,67	1821,97	2583,64	762,79	2015,29	2778,08	2,1386	4,4478	6,5864
1100	184,09	0,001133	0,17753	780,08	1806,32	2586,40	781,32	2000,36	2781,68	2,1791	4,3744	6,5535
1200	187,99	0,001139	0,16333	797,27	1791,55	2588,82	798,64	1986,19	2784,82	2,2165	4,3067	6,5233
1300	191,64	0,001144	0,15125	813,42	1777,53	2590,95	814,91	1972,67	2787,58	2,2514	4,2438	6,4953
1400	195,07	0,001149	0,14084	828,68	1764,15	2592,83	830,29	1959,72	2790,00	2,2842	4,1850	6,4692
1500	198,32	0,001154	0,13177	843,14	1751,30	2594,50	844,87	1947,28	2792,15	2,3150	4,1298	6,4448
1750	205,76	0,001166	0,11349	876,44	1721,39	2597,83	878,48	1917,95	2796,43	2,3851	4,0044	6,3895
2000	212,42	0,001177	0,09963	906,42	1693,84	2600,26	908,77	1890,74	2799,51	2,4473	3,8935	6,3408
2250	218,45	0,001187	0,08875	933,81	1668,18	2601,98	936,48	1865,19	2801,67	2,5034	3,7938	6,2971
2500	223,99	0,001197	0,07998	959,09	1644,04	2603,13	962,09	1840,98	2803,07	2,5546	3,7028	6,2574
2750	229,12	0,001207	0,07275	982,65	1621,16	2603,81	985,97	1817,89	2803,86	2,6018	3,6190	6,2208
3000	233,90	0,001216	0,06668	1004,76	1599,34	2604,10	1008,41	1795,73	2804,14	2,6456	3,5412	6,1869
3250	238,38	0,001226	0,06152	1025,62	1578,43	2604,04	1029,60	1774,37	2803,97	2,6866	3,4685	6,1551
3500	242,60	0,001235	0,05707	1045,41	1558,29	2603,70	1049,73	1753,70	2803,43	2,7252	3,4000	6,1252
4000	250,40	0,001252	0,04978	1082,28	1519,99	2602,27	1087,29	1714,09	2801,38	2,7963	3,2737	6,0700
5000	263,99	0,001286	0,03944	1147,78	1449,34	2597,12	1154,21	1640,12	2794,33	2,9201	3,0532	5,9733
6000	275,64	0,001319	0,03244	1205,41	1384,27	2589,69	1213,32	1571,00	2784,33	3,0266	2,8625	5,8891
7000	285,88	0,001351	0,02737	1257,51	1322,97	2580,48	1266,97	1505,10	2772,07	3,1210	2,6922	5,8132
8000	295,06	0,001384	0,02352	1305,54	1264,25	2569,79	1316,61	1441,33	2757,94	3,2067	2,5365	5,7431
9000	303,40	0,001418	0,02048	1350,47	1207,28	2557,75	1363,23	1378,88	2742,11	3,2857	2,3915	5,6771
10000	311,06	0,001452	0,01803	1393,00	1151,40	2544,41	1407,53	1317,14	2724,67	3,3595	2,2545	5,6140
11000	318,15	0,001489	0,01599	1433,68	1096,06	2529,74	1450,05	1255,55	2705,60	3,4294	2,1233	5,5527
12000	324,75	0,001527	0,01426	1472,92	1040,76	2513,67	1491,24	1193,59	2684,83	3,4961	1,9962	5,4923
13000	330,93	0,001567	0,01278	1511,09	984,99	2496,08	1531,46	1130,76	2662,22	3,5604	1,8718	5,4323
14000	336,75	0,001611	0,01149	1548,53	928,23	2476,76	1571,08	1066,47	2637,55	3,6231	1,7485	5,3716
15000	342,24	0,001658	0,01034	1585,58	869,85	2455,43	1610,45	1000,04	2610,49	3,6847	1,6250	5,3097
16000	347,43	0,001711	0,00931	1622,63	809,07	2431,70	1650,00	930,59	2580,59	3,7460	1,4995	5,2454
17000	352,37	0,001770	0,00836	1660,16	744,80	2404,96	1690,25	856,90	2547,15	3,8078	1,3698	5,1776
18000	357,06	0,001840	0,00749	1698,86	675,42	2374,28	1731,97	777,13	2509,09	3,8713	1,2330	5,1044
19000	361,54	0,001924	0,00666	1739,87	598,18	2338,05	1776,43	688,11	2464,54	3,9387	1,0841	5,0227
20000	365,81	0,002035	0,00583	1785,47	507,58	2293,05	1826,18	583,56	2409,74	4,0137	0,9132	4,9269
21000	369,89	0,002206	0,00495	1841,97	388,74	2230,71	1888,30	446,42	2334,72	4,1073	0,6942	4,8015
22000	373,80	0,002808	0,00353	1973,16	108,24	2081,39	2034,92	124,04	2158,97	4,3307	0,1917	4,5224
22089	374,14	0,003155	0,00315	2029,58	0,00	2029,58	2089,26	0,00	2089,26	4,4297	0,0000	4,4297

Vapor d'água superaquecido

T	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
$P = 10 \text{ kPa (45,81)}$				$P = 50 \text{ kPa (81,33)}$				$P = 100 \text{ kPa (99,62)}$				
Sat.	14,67355	2437,89	2584,63	8,1501	3,24034	2483,85	2645,87	7,5939	1,69400	2506,06	2675,46	7,3593
50	14,86920	2443,87	2592,56	8,1749	-	-	-	-	-	-	-	-
100	17,19561	2515,50	2687,46	8,4479	3,41833	2511,61	2682,52	7,6947	-	-	-	-
150	19,51251	2587,86	2782,99	8,6881	3,88937	2585,61	2780,08	7,9400	1,93636	2582,75	2776,38	7,6133
200	21,82507	2661,27	2879,52	8,9037	4,35595	2659,85	2877,64	8,1579	2,17226	2658,05	2875,27	7,8342
250	24,13559	2735,95	2977,31	9,1002	4,82045	2734,97	2975,99	8,3555	2,40604	2733,73	2974,33	8,0332
300	26,44508	2812,06	3076,51	9,2812	5,28391	2811,33	3075,52	8,5372	2,63876	2810,41	3074,28	8,2157
400	31,06252	2968,89	3279,51	9,6076	6,20929	2968,43	3278,89	8,8641	3,10263	2967,85	3278,11	8,5434
500	35,67896	3132,26	3489,05	9,8977	7,13364	3131,94	3488,62	9,1545	3,56547	3131,54	3488,09	8,8341
600	40,29488	3302,45	3705,40	10,1608	8,05748	3302,22	3705,10	9,4177	4,02781	3301,94	3704,72	9,0975
700	44,91052	3479,63	3928,73	10,4028	8,98104	3479,45	3928,51	9,6599	4,48986	3479,24	3928,23	9,3398
800	49,52599	3663,84	4159,10	10,6281	9,90444	3663,70	4158,92	9,8852	4,95174	3663,53	4158,71	9,5652
900	54,14137	3855,03	4396,44	10,8395	10,82773	3854,91	4396,30	10,0967	5,41353	3854,77	4396,12	9,7767
1000	58,75669	4053,01	4640,58	11,0392	11,75097	4052,91	4640,46	10,2964	5,87526	4052,78	4640,31	9,9764
1100	63,37198	4257,47	4891,19	11,2287	12,67418	4257,37	4891,08	10,4858	6,33696	4257,25	4890,95	10,1658
1200	67,98724	4467,91	5147,78	11,4090	13,59737	4467,82	5147,69	10,6662	6,79863	4467,70	5147,56	10,3462
1300	72,60250	4683,68	5409,70	11,5810	14,52054	4683,58	5409,61	10,8382	7,26030	4683,47	5409,49	10,5182
$P = 200 \text{ kPa (120,23)}$				$P = 300 \text{ kPa (133,55)}$				$P = 400 \text{ kPa (143,63)}$				
Sat.	0,88573	2529,49	2706,63	7,1271	0,60582	2543,55	2725,30	6,9918	0,46246	2553,55	2738,53	6,8958
150	0,95964	2576,87	2768,80	7,2795	0,63388	2570,79	2760,95	7,0778	0,47084	2564,48	2752,82	6,9299
200	1,08034	2654,39	2870,46	7,5066	0,71629	2650,65	2865,54	7,3115	0,53422	2646,83	2860,51	7,1706
250	1,19880	2731,22	2970,98	7,7085	0,79636	2728,69	2967,59	7,5165	0,59512	2726,11	2964,16	7,3788
300	1,31616	2808,55	3071,79	7,8926	0,87529	2806,69	3069,28	7,7022	0,65484	2804,81	3066,75	7,5661
400	1,54930	2966,69	3276,55	8,2217	1,03151	2965,53	3274,98	8,0329	0,77262	2964,36	3273,41	7,8984
500	1,78139	3130,75	3487,03	8,5132	1,18669	3129,95	3485,96	8,3250	0,88934	3129,15	3484,89	8,1912
600	2,01297	3301,36	3703,96	8,7769	1,34136	3300,79	3703,20	8,5892	1,00555	3300,22	3702,44	8,4557
700	2,24426	3478,81	3927,66	9,0194	1,49573	3478,38	3927,10	8,8319	1,12147	3477,95	3926,53	8,6987
800	2,47539	3663,19	4158,27	9,2450	1,64994	3662,85	4157,83	9,0575	1,23722	3662,51	4157,40	8,9244
900	2,70643	3854,49	4395,77	9,4565	1,80406	3854,20	4395,42	9,2691	1,35288	3853,91	4395,06	9,1361
1000	2,93740	4052,53	4640,01	9,6563	1,95812	4052,27	4639,71	9,4689	1,46847	4052,02	4639,41	9,3360
1100	3,16834	4257,01	4890,68	9,8458	2,11214	4256,77	4890,41	9,6585	1,58404	4256,53	4890,15	9,5255
1200	3,39927	4467,46	5147,32	10,0262	2,26614	4467,23	5147,07	9,8389	1,69958	4466,99	5146,83	9,7059
1300	3,63018	4683,23	5409,26	10,1982	2,42013	4682,99	5409,03	10,0109	1,81511	4682,75	5408,80	9,8780
$P = 500 \text{ kPa (151,86)}$				$P = 600 \text{ kPa (158,85)}$				$P = 800 \text{ kPa (170,43)}$				
Sat.	0,37489	2561,23	2748,67	6,8212	0,31567	2567,40	2756,80	6,7600	0,24043	2576,79	2769,13	6,6627
200	0,42492	2642,91	2855,37	7,0592	0,35202	2638,91	2850,12	6,9665	0,26080	2630,61	2839,25	6,8158
250	0,47436	2723,50	2960,68	7,2708	0,39383	2720,86	2957,16	7,1816	0,29314	2715,46	2949,97	7,0384
300	0,52256	2802,91	3064,20	7,4598	0,43437	2801,00	3061,63	7,3723	0,32411	2797,14	3056,43	7,2327
350	0,57012	2882,59	3167,65	7,6328	0,47424	2881,12	3165,66	7,5463	0,35439	2878,16	3161,68	7,4088
400	0,61728	2963,19	3271,83	7,7937	0,51372	2962,02	3270,25	7,7078	0,38426	2959,66	3267,07	7,5715
500	0,71093	3128,35	3483,82	8,0872	0,59199	3127,55	3482,75	8,0020	0,44331	3125,95	3480,60	7,8672
600	0,80406	3299,64	3701,67	8,3521	0,66974	3299,07	3700,91	8,2673	0,50184	3297,91	3699,38	8,1332
700	0,89691	3477,52	3925,97	8,5952	0,74720	3477,08	3925,41	8,5107	0,56007	3476,22	3924,27	8,3770
800	0,98959	3662,17	4156,96	8,8211	0,82450	3661,83	4156,52	8,7367	0,61813	3661,14	4155,65	8,6033
900	1,08217	3853,63	4394,71	9,0329	0,90169	3853,34	4394,36	8,9485	0,67610	3852,77	4393,65	8,8153
1000	1,17469	4051,76	4639,11	9,2328	0,97883	4051,51	4638,81	9,1484	0,73401	4051,00	4638,20	9,0153
1100	1,26718	4256,29	4889,88	9,4224	1,05594	4256,05	4889,61	9,3381	0,79188	4255,57	4889,08	9,2049
1200	1,35964	4466,76	5146,58	9,6028	1,13302	4466,52	5146,34	9,5185	0,84974	4466,05	5145,85	9,3854
1300	1,45210	4682,52	5408,57	9,7749	1,21009	4682,28	5408,34	9,6906	0,90758	4681,81	5407,87	9,5575

Vapor d'água superaquecido

T	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
$P = 1000 \text{ kPa (179,91)}$				$P = 1200 \text{ kPa (187,99)}$				$P = 1400 \text{ kPa (195,07)}$				
Sat.	0,19444	2583,64	2778,08	6,5864	0,16333	2588,82	2784,82	6,5233	0,14084	2592,83	2790,00	6,4692
200	0,20596	2621,90	2827,86	6,6939	0,16930	2612,74	2815,90	6,5898	0,14302	2603,09	2803,32	6,4975
250	0,23268	2709,91	2942,59	6,9246	0,19235	2704,20	2935,01	6,8293	0,16350	2698,32	2927,22	6,7467
300	0,25794	2793,21	3051,15	7,1228	0,21382	2789,22	3045,80	7,0316	0,18228	2785,16	3040,35	6,9533
350	0,28247	2875,18	3157,65	7,3010	0,23452	2872,16	3153,59	7,2120	0,20026	2869,12	3149,49	7,1359
400	0,30659	2957,29	3263,88	7,4650	0,25480	2954,90	3260,66	7,3773	0,21780	2952,50	3257,42	7,3025
500	0,35411	3124,34	3478,44	7,7621	0,29463	3122,72	3476,28	7,6758	0,25215	3121,10	3474,11	7,6026
600	0,40109	3296,76	3697,85	8,0289	0,33393	3295,60	3696,32	7,9434	0,28596	3294,44	3694,78	7,8710
700	0,44779	3475,35	3923,14	8,2731	0,37294	3474,48	3922,01	8,1881	0,31947	3473,61	3920,87	8,1160
800	0,49432	3660,46	4154,78	8,4996	0,41177	3659,77	4153,90	8,4149	0,3528	3659,09	4153,03	8,3431
900	0,54075	3852,19	4392,94	8,7118	0,45051	3851,62	4392,23	8,6272	0,38606	3851,05	4391,53	8,5555
1000	0,58712	4050,49	4637,60	8,9119	0,48819	4049,98	4637,00	8,8274	0,41924	4049,47	4636,41	8,7558
1100	0,63345	4255,09	4888,55	9,1016	0,52783	4254,61	4888,02	9,0171	0,45239	4254,14	4887,49	8,9456
1200	0,67977	4465,58	5145,36	9,2821	0,56646	4465,12	5144,87	9,1977	0,48552	4464,65	5144,38	9,1262
1300	0,72608	4681,33	5407,41	9,4542	0,60507	4680,86	5406,95	9,3698	0,51864	4680,39	5406,49	9,2983
$P = 1600 \text{ kPa (201,40)}$				$P = 1800 \text{ kPa (207,15)}$				$P = 2000 \text{ kPa (212,42)}$				
Sat.	0,12380	2595,95	2794,02	6,4217	0,11042	2598,38	2797,13	6,3793	0,09963	2600,26	2799,51	6,3408
250	0,14184	2692,26	2919,20	6,6732	0,12497	2686,02	2910,96	6,6066	0,11144	2679,58	2902,46	6,5452
300	0,15862	2781,03	3034,83	6,8844	0,14021	2776,83	3029,21	6,8226	0,12547	2772,56	3023,50	6,7663
350	0,17456	2866,05	3145,35	7,0693	0,15457	2862,95	3141,18	7,0099	0,13857	2859,81	3136,96	6,9562
400	0,19005	2950,09	3254,17	7,2373	0,16847	2947,66	3250,90	7,1793	0,15120	2945,21	3247,60	7,1270
450	-	-	-	-	-	-	-	-	0,16353	3030,41	3357,48	7,2844
500	0,22029	3119,47	3471,93	7,5389	0,19550	3117,84	3469,75	7,4824	0,17568	3116,20	3467,55	7,4316
600	0,24998	3293,27	3693,23	7,8080	0,22199	3292,10	3691,69	7,7523	0,19960	3290,93	3690,14	7,7023
700	0,27937	3472,74	3919,73	8,0535	0,24818	3471,87	3918,59	7,9983	0,22323	3470,99	3917,45	7,9487
800	0,30859	3658,40	4152,15	8,2808	0,27420	3657,71	4151,27	8,2258	0,24668	3657,03	4150,40	8,1766
900	0,33772	3850,47	4390,82	8,4934	0,30012	3849,90	4390,11	8,4386	0,27004	3849,33	4389,40	8,3895
1000	0,36678	4048,96	4635,81	8,6938	0,32598	4048,45	4635,21	8,6390	0,29333	4047,94	4634,61	8,5900
1100	0,39581	4253,66	4886,95	8,8837	0,35180	4253,18	4886,42	8,8290	0,31659	4252,71	4885,89	8,7800
1200	0,42482	4464,18	5143,89	9,0642	0,37761	4463,71	5143,40	9,0096	0,33984	4463,25	5142,92	8,9606
1300	0,45382	4679,92	5406,02	9,2364	0,40340	4679,44	5405,56	9,1817	0,36306	4678,97	5405,10	9,1328
$P = 2500 \text{ kPa (223,99)}$				$P = 3000 \text{ kPa (233,90)}$				$P = 4000 \text{ kPa (250,40)}$				
Sat.	0,07998	2603,13	2803,07	6,2574	0,06668	2604,10	2804,14	6,1869	0,04978	2602,27	2801,38	6,0700
250	0,08700	2662,55	2880,06	6,4084	0,07058	2644,00	2855,75	6,2871	-	-	-	-
300	0,09890	2761,56	3008,81	6,6437	0,08114	2750,05	2993,48	6,5389	0,05884	2725,33	2960,68	6,3614
350	0,10976	2851,84	3126,24	6,8402	0,09053	2843,66	3115,25	6,7427	0,06645	2826,65	3092,43	6,5820
400	0,12010	2939,03	3239,28	7,0147	0,09936	2932,75	3230,82	6,9211	0,07341	2919,88	3213,51	6,7689
450	0,13014	3025,43	3350,77	7,1745	0,10787	3020,38	3344,00	7,0833	0,08003	3010,13	3330,23	6,9362
500	0,13998	3112,08	3462,04	7,3233	0,11619	3107,92	3456,48	7,2337	0,08643	3099,49	3445,21	7,0900
600	0,15930	3287,99	3686,25	7,5960	0,13243	3285,03	3682,34	7,5084	0,09885	3279,06	3674,44	7,3688
700	0,17832	3468,80	3914,59	7,8435	0,14838	3466,59	3911,72	7,7571	0,11095	3462,15	3905,94	7,6198
800	0,19716	3655,30	4148,20	8,0720	0,16414	3653,58	4146,00	7,9862	0,12287	3650,11	4141,59	7,8502
900	0,21590	3847,89	4387,64	8,2853	0,17980	3846,46	4385,87	8,1999	0,13469	3843,59	4382,34	8,0647
1000	0,23458	4046,67	4633,12	8,4860	0,19541	4045,40	4631,63	8,4009	0,14645	4042,87	4628,65	8,2661
1100	0,25322	4251,52	4884,57	8,6761	0,21098	4250,33	4883,26	8,5911	0,15817	4247,96	4880,63	8,4566
1200	0,27185	4462,08	5141,70	8,8569	0,22652	4460,92	5140,49	8,7719	0,16987	4458,60	5138,07	8,6376
1300	0,29046	4677,80	5403,95	9,0291	0,24206	4676,63	5402,81	8,9442	0,18156	4674,29	5400,52	8,8099

Agua líquida comprimida												
T °C	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
$P = 500 \text{ kPa (151,86)}$				$P = 2000 \text{ kPa (212,42)}$				$P = 5000 \text{ kPa (263,99)}$				
Sat.	0,001093	639,66	640,21	1,8606	0,001177	906,42	908,77	2,4473	0,001286	1147,78	1154,21	2,9201
0	-	-	-	-	-	-	-	-	0,000998	0,03	5,02	0,0001
0,01	0,000999	0,01	0,51	0,0000	0,000999	0,03	2,03	0,0001	-	-	-	-
20	0,001002	83,91	84,41	0,2965	0,001001	83,82	85,82	0,2962	0,001000	83,64	88,64	0,2955
40	0,001008	167,47	167,98	0,5722	0,001007	167,29	169,30	0,5716	0,001006	166,93	171,95	0,5705
60	0,001017	251,00	251,51	0,8308	0,001016	250,73	252,77	0,8300	0,001015	250,21	255,28	0,8284
80	0,001029	334,73	335,24	1,0749	0,001028	334,38	336,44	1,0739	0,001027	333,69	338,83	1,0719
100	0,001043	418,80	419,32	1,3065	0,001043	418,36	420,45	1,3053	0,001041	417,50	422,71	1,3030
120	0,001060	503,37	503,90	1,5273	0,001059	502,84	504,96	1,5259	0,001058	501,79	507,07	1,5232
140	0,001080	588,66	589,20	1,7389	0,001079	588,02	590,18	1,7373	0,001077	586,74	592,13	1,7342
160	-	-	-	-	0,001101	674,14	676,34	1,9410	0,001099	672,61	678,10	1,9374
180	-	-	-	-	0,001127	761,46	763,71	2,1382	0,001124	759,62	765,24	2,1341
200	-	-	-	-	0,001156	850,30	852,61	2,3301	0,001153	848,08	853,85	2,3254
220	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001187	938,43	944,36	2,5128
240	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001226	1031,34	1037,47	2,6978
260	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001275	1127,92	1134,30	2,8829
$P = 10\,000 \text{ kPa (311,06)}$				$P = 15\,000 \text{ kPa (342,24)}$				$P = 20\,000 \text{ kPa (365,81)}$				
Sat.	0,001452	1393,00	1407,53	3,3595	0,001658	1585,58	1610,45	3,6847	0,002035	1785,47	1826,18	4,0137
0	0,000995	0,10	10,05	0,0003	0,000993	0,15	15,04	0,0004	0,000990	0,20	20,00	0,0004
20	0,000997	83,35	93,32	0,2945	0,000995	83,05	97,97	0,2934	0,000993	82,75	102,61	0,2922
40	0,001003	166,33	176,36	0,5685	0,001001	165,73	180,75	0,5665	0,000999	165,15	185,14	0,5646
60	0,001013	249,34	259,47	0,8258	0,001011	248,49	263,65	0,8231	0,001008	247,66	267,82	0,8205
80	0,001025	332,56	342,81	1,0687	0,001022	331,46	346,79	1,0655	0,001020	330,38	350,78	1,0623
100	0,001039	416,09	426,48	1,2992	0,001036	414,72	430,26	1,2954	0,001034	413,37	434,04	1,2917
120	0,001055	500,07	510,61	1,5188	0,001052	498,39	514,17	1,5144	0,001050	496,75	517,74	1,5101
140	0,001074	584,67	595,40	1,7291	0,001071	582,64	598,70	1,7241	0,001068	580,67	602,03	1,7192
160	0,001195	670,11	681,07	1,9316	0,001092	667,69	684,07	1,9259	0,001089	665,34	687,11	1,9203
180	0,001120	756,63	767,83	2,1274	0,001116	753,74	770,48	2,1209	0,001112	750,94	773,18	2,1146
200	0,001148	844,49	855,97	2,3178	0,001143	841,04	858,18	2,3103	0,001139	837,70	860,47	2,3031
220	0,001181	934,07	945,88	2,5038	0,001175	929,89	947,52	2,4952	0,001169	925,89	949,27	2,4869
240	0,001219	1025,94	1038,13	2,6872	0,001211	1020,82	1038,99	2,6770	0,001205	1015,94	1040,04	2,6673
260	0,001265	1121,03	1133,68	2,8698	0,001255	1114,59	1133,41	2,8575	0,001246	1108,53	1133,45	2,8459
280	0,001322	1220,90	1234,11	3,0547	0,001308	1212,47	1232,09	3,0392	0,001297	1204,69	1230,62	3,0248
300	0,001397	1328,34	1342,31	3,2468	0,001377	1316,58	1337,23	3,2259	0,001360	1306,10	1333,29	3,2071
320	-	-	-	-	0,001472	1431,05	1453,13	3,4246	0,001444	1415,66	1444,53	3,3978
340	-	-	-	-	0,001631	1567,42	1591,88	3,6545	0,001568	1539,64	1571,01	3,6074
360	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001823	1702,78	1739,23	3,8770

Anexo B – Diagrama de fases