

**UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PROPOSTA DE UM MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA  
ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE UTILIDADES INDUSTRIAIS**

**GABRIEL DE OLIVEIRA PAPA**

**ORIENTADOR: PROF. DR. ALEXANDRE TADEU SIMON**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção

**SANTA BÁRBARA D'OESTE**

**2018**

## **AGRADECIMENTOS**

A CAPES/PROSUC pela bolsa de estudos que tornou possível a realização deste trabalho.

A UNIMEP, professores e Marta Helena Teixeira Bragaglia, pelo suporte durante o período de estudos, com estrutura, ensinamentos e suporte acadêmico.

Ao meu orientador Prof. Dr. Alexandre Tadeu Simon, que contribuiu com sua imensa bagagem de conhecimento na realização do trabalho, sua parceria e amizade.

Aos meus pais e minha irmã, Clara de Oliveira Papa, que são meus maiores incentivadores de vida, e nunca se furtaram em apoiar e incentivar na conclusão desse trabalho.

A minha noiva, Talita Farias, pela paciência, companheirismo e incentivo nesse período.

PAPA, Gabriel de Oliveira. **Proposta de um método de avaliação de eficiência energética em sistemas de utilidades industriais**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d’Oeste.

## RESUMO

Para que os sistemas de produção cumpram seus objetivos de produzir bens ou serviços, eles dependem de insumos que são produzidos e fornecidos pelo sistema de utilidades. Os insumos que compõem um sistema de utilidades são: água, vapor, ar comprimido e eletricidade, e sua produção causa impactos econômicos e ambientais, que devem ser avaliados e minimizados. A avaliação desses impactos depende, na maioria das vezes, da medição de variáveis que compõem os indicadores de eficiência de cada um dos insumos, ou então de parâmetros dos modelos de avaliação o que geralmente impõe dificuldades aos profissionais envolvidos. O objetivo deste trabalho é propor um método de avaliação da eficiência energética em sistemas de utilidades industriais que torne o gerenciamento destes indicadores mais prático e acessível, permitindo que sejam tomadas ações de melhoria, por meio do monitoramento de indicadores individuais para cada insumo. O método foi proposto a partir de uma revisão bibliográfica e posteriormente submetido para a avaliação de profissionais da área industrial e acadêmica, que contribuíram para finalização do mesmo. O método foi aplicado em uma planta de uma empresa do setor sucroenergético para o monitoramento dos indicadores propostos. Os resultados da aplicação mostraram que o método permite gerenciar os indicadores de eficiência energética na produção e distribuição dos insumos. O monitoramento é feito de forma remota e, portanto, pode ser realizado por meio de dispositivos móveis.

**PALAVRAS-CHAVE:** Sistema de utilidades industriais; eficiência energética; indicadores de eficiência.

PAPA, Gabriel de Oliveira. **Proposal of a method to evaluate the energy efficiency in industrial utilities system**. 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

### ***ABSTRACT***

Manufacturing systems are dependents of utilities that are produced and distributed by the utilities system to produce services and goods. The utilities system are composed by water, steam, compressed air and electricity. Economic and environmental impacts are related to its utilities production and it must be evaluated and reduced. The problem is that this evaluation depends, in most cases, on the measurement of variables that compose the efficiency indicators of each of the inputs, or parameters of the evaluation models. With the purpose of making the management of these indicators easy, allowing for the quick adoption of actions to improve the efficiency of this system, the objective of this study is the proposition of a method for the evaluation of energy efficiency in industrial utility systems, through the monitoring of individual indicators for each industrial input. This method was proposed from a bibliographical review and later submitted for the evaluation of professionals from the industrial and academic area. The method was applied in a plant of a company of the sugar-energy sector to the monitoring of the proposed indicators. The results of the application show that the method allows to manage the indicators of energy efficiency in the production and distribution of this industrial inputs. In addition, this monitoring is done remotely, and it can be performed through mobile devices.

***KEYWORDS:*** Industrial utilities system; energy efficiency; efficiency indicators.

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1.	OBJETIVO DO TRABALHO .....	5
1.2.	DELIMITAÇÕES DO TRABALHO.....	5
1.3.	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	5
<b>2.</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>7</b>
2.1.	SISTEMA DE UTILIDADES INDUSTRIAIS.....	7
2.1.1.	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA GERAÇÃO DE VAPOR E ELETRICIDADE .....	8
2.1.2.	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA PRODUÇÃO DE AR COMPRIMIDO .....	18
2.1.3.	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA CAPTAÇÃO DE ÁGUA .....	22
2.2.	MODELOS E INDICADORES PARA AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE UTILIDADES.....	27
<b>3.</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>32</b>
3.1.	ETAPAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO .....	34
3.1.1.	ETAPA 1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	34
3.1.2.	ETAPA 2: DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO .....	36
3.2.	ETAPA 3: APLICAÇÃO DE ILUSTRAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO .....	37
<b>4.</b>	<b>DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO</b> .....	<b>40</b>
4.1.	SISTEMA DE UTILIDADES INDUSTRIAIS – PRODUÇÃO .....	40
4.2.	DEMANDA INDUSTRIAL – DISTRIBUIÇÃO DE INSUMOS DE UTILIDADES .....	44
4.2.1.	REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR.....	44
4.2.2.	REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	45
4.2.3.	REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO .....	47
4.2.4.	REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	48
4.3.	COLETA DE DADOS DO SISTEMA DE UTILIDADES .....	49
4.4.	SUGESTÕES DOS ESPECIALISTAS DA ACADEMIA E INDÚSTRIA SOBRE O MÉTODO PROPOSTO .....	49
4.5.	MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE UTILIDADES INDUSTRIAIS .....	51
4.6.	APLICAÇÃO DE ILUSTRAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO .....	53
4.6.1.	EFICIÊNCIA TÉRMICA .....	53
4.6.2.	EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.....	57
4.6.3.	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA CAPTAÇÃO DE ÁGUA .....	60
4.6.4.	EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA PRODUÇÃO DE AR COMPRIMIDO .....	62
4.6.5.	EFICIÊNCIA DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR .....	63
4.6.6.	EFICIÊNCIA DA REDE DE ENERGIA ELÉTRICA DE UTILIDADES E INDUSTRIAL .....	63
4.6.7.	EFICIÊNCIA DA REDE DE ÁGUA.....	65
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>67</b>
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>69</b>

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: CALDEIRA DE GERAÇÃO DE VAPOR (ELEKTRO, 2014) – ADAPTADO .....	8
FIGURA 2: PROCESSO DE COGERAÇÃO DE ENERGIA (LORA E NASCIMENTO, 2004).....	12
FIGURA 3: APROVEITAMENTO EM CASCATA DA ENERGIA DOS COMBUSTÍVEIS (KIKUCHI, KANEMATSU, ET AL., 2016).....	13
FIGURA 4: FRONTEIRA PARA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENTRE PLANTA INDUSTRIAL E SISTEMA (BUHLER, NGUYEN E ELMEGAARD, 2016). ....	15
FIGURA 5: FLUXOGRAMA DE PROCESSOS DE ENERGIA NO SISTEMA DE UTILIDADES (BUHLER, NGUYEN E ELMEGAARD, 2016). ....	15
FIGURA 6: FLUXOGRAMA DE PERDAS ENERGÉTICA NO SISTEMA DE UTILIDADES (BUHLER, NGUYEN E ELMEGAARD, 2016). ....	16
FIGURA 7: ANÁLISE DE POTÊNCIA NO TEMPO NO NÍVEL OPERACIONAL DAS MÁQUINAS DE MANUFATURA (MOUSAVI, KARA E KORNFELD, 2016).....	17
FIGURA 8: COMPONENTES DA PRODUÇÃO DE AR COMPRIMIDO (EUROPEAN COMMISSION, 2009) – ADAPTADO.....	18
FIGURA 9: PROCESSO DE CAPTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA (PAPA E SIMON, 2017).....	23
FIGURA 10: POTENCIAL DE ECONOMIA DE ÁGUA NOS PRINCIPAIS SETORES INDUSTRIAIS (GU, TENG E WANG, 2014). ....	25
FIGURA 11: PROPORÇÃO DAS ECONOMIAS RELACIONADAS AO CONSUMO DE ÁGUA ENTRE OS SETORES (GU, TENG E WANG, 2014).....	26
FIGURA 12: ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA.....	33
FIGURA 13: RESUMO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	35
FIGURA 14: ELEMENTOS DO DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE UTILIDADES INDUSTRIAIS.....	36
FIGURA 15: APLICAÇÃO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO.....	39
FIGURA 16: SISTEMA DE UTILIDADES INDUSTRIAIS.....	40
FIGURA 17: COGERAÇÃO DE ENERGIA: VARIÁVEIS DO PROCESSO E INDICADORES DE EFICIÊNCIA. ....	41
FIGURA 18: PRODUÇÃO DE AR COMPRIMIDO, VARIÁVEIS DO PROCESSO E INDICADOR DE EFICIÊNCIA.....	42

FIGURA 19: CAPTAÇÃO DE ÁGUA: VARIÁVEIS DE PROCESSO E INDICADOR DE EFICIÊNCIA .....	43
FIGURA 20: REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR.....	44
FIGURA 21: REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ELETRICIDADE .....	46
FIGURA 22: REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO .....	47
FIGURA 23: REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA.....	48
FIGURA 24: PROPOSTA DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE UTILIDADES INDUSTRIAIS.....	52
FIGURA 25: MONITORAMENTO DO PCI DO BAGAÇO DE QUEIMA NAS CALDEIRAS.....	54
FIGURA 26: MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DE ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DAS CALDEIRAS.....	55
FIGURA 27: MONITORAMENTO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DAS CALDEIRAS 1, 2, 3, 4 E 5 .....	56
FIGURA 28: EFICIÊNCIA TÉRMICA DAS CALDEIRAS .....	57
FIGURA 29: PROCESSO DE COGERAÇÃO DE ENERGIA: VAPOR E ELETRICIDADE .....	58
FIGURA 30: MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS DE COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....	58
FIGURA 31: MONITORAMENTO DA EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA ....	59
FIGURA 32: EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA .....	60
FIGURA 33: PROCESSO DE CAPTAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUAS INDUSTRIAIS .....	61
FIGURA 34: MONITORAMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA CAPTAÇÃO DE ÁGUA. ....	62
FIGURA 35: MONITORAMENTO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E CONSUMO INDUSTRIAL .....	64
FIGURA 36: EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA REDE DE ENERGIA ELÉTRICA.....	65
FIGURA 37: EFICIÊNCIA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA .....	66

**LISTA DE TABELAS**

TABELA 1: PODER CALORÍFICO DOS COMBUSTÍVEIS (ASCO, 2018). .....	10
TABELA 2: ENTALPIA ESPECÍFICA (BERMO, 2018) – ADAPTADO.....	11
TABELA 3: EFICIÊNCIA DO GERADOR DE VAPOR .....	54



**LISTA DE QUADROS**

QUADRO 1: ARTIGOS IDENTIFICADOS NA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA.....	27
QUADRO 2 VARIÁVEIS MEDIDAS E INDICADORES DO SISTEMA DE UTILIDADES.....	49

## 1. INTRODUÇÃO

Para que os sistemas de produção cumpram seus objetivos de produzir bens ou serviços, eles dependem de insumos que são produzidos e fornecidos pelo sistema de utilidades. Segundo Festel e Würmseher (2014), os insumos que compõem um sistema de utilidades são: água, vapor, ar comprimido e eletricidade. A produção destes insumos, na sua essência, causa impactos econômicos e ambientais. Do ponto de vista ambiental, destaca-se a alteração no ecossistema devido a captação da água, a emissão de gases de efeito estufa pela produção de vapor e o consumo elevado de energia. Do ponto de vista econômico, tem-se os altos custos agregados aos sistemas de produção.

Segundo FAO (2016), o setor industrial demanda 19% de toda a água disponível para consumo no mundo, o que equivale a 768 km<sup>3</sup>/ano. Desse montante, a América do Sul é responsável por 12% do consumo, o que corresponde a 26 km<sup>3</sup>/ano, sendo que o Brasil sozinho consome 12,7 km<sup>3</sup>/ano. Com relação ao consumo de energia elétrica, o setor industrial é responsável por 31% do consumo da energia disponível no mundo, além disso, o setor industrial é responsável por um 33% da emissão dos gases de efeito estufa (EPA, 2012). No Brasil, o consumo de energia elétrica necessário para a captação e tratamento de água representa entre 15% e 19% do custo operacional total de um sistema industrial (ABESCO, 2017).

Percebe-se que esse impacto é significativo, pois a União Europeia, por exemplo, pretende economizar 20% do consumo de energia até 2020, sendo que a principal estratégia para alcançar esta meta é a eficiência energética (*European Commission*, 2013). A mesma estratégia foi anunciada pelo departamento de energia norte americano, com o objetivo de aumentar a produtividade (DOE, 2014)

Portanto, reduzir a demanda de energia que é aplicada à indústria é indispensável para o desenvolvimento sustentável, nas dimensões econômica,

social e ambiental, especialmente para minimizar os impactos negativos ao meio ambiente causados pela sua geração e consumo. No entanto, a energia não pode ser substituída ou eliminada dos processos industriais, e a redução na demanda de energia é limitada pelas saídas dos processos. Assim, melhorar a razão entre entrada de energia e saída dos processos de produção, por meio da eficiência energética, é o objetivo central da sustentabilidade na indústria (GAHM, DENZ, *et al.*, 2016).

De acordo com o IEA (2016), a eficiência energética é a forma mais rápida para reduzir os impactos relacionados com a utilização de energia em sistemas de produção e de utilidades industriais, por ser menos oneroso, aumentar a confiabilidade do setor, e reduzir impactos ambientais.

Para Giacone e Manco (2011), a avaliação da eficiência energética de um sistema ou processo pode ser feita por meio de três indicadores: (i) eficiência térmica, (ii) consumo específico de energia, (iii) intensidade de consumo. Além destes indicadores, Li e Tao (2017) dividem a avaliação da eficiência energética em duas formas: também por meio de indicadores, quais sejam, termodinâmicos, termo físicos, termo econômicos e econômicos e por meio de modelos baseados nas metodologias de Análise estocástica de fronteira (*SFA*), análise por envoltória de dados (*DEA*), e análise de exergia.

Os indicadores termodinâmicos são compostos exclusivamente por parâmetros provenientes da ciência termodinâmica, enquanto que os indicadores termo físicos, são ditos híbridos por serem compostos por parâmetros da ciência termodinâmica e da física. Os indicadores termo econômicos também são híbridos, compostos por variáveis de natureza monetária e da ciência termodinâmica. Já os indicadores econômicos, as variáveis são, exclusivamente, de natureza monetária (PATTERSON, 1996).

A utilização prática destes indicadores é observada em diversos estudos, como por exemplo, na avaliação da eficiência energética de um processo de utilidades, por meio de indicadores termodinâmicos com o objetivo de recuperar calor de

processos (KERMANI, WALLERAND, *et al.*, 2018). Por sua vez, Mehr e Mosayebnezhad *et al.* (2018) utilizaram os indicadores termodinâmicos em softwares de modelagem de processos para avaliar a eficiência energética em unidades de tratamento de água, por meio do relacionamento do consumo de combustível, a geração de energia elétrica e a eficiência térmica.

Os indicadores termodinâmicos foram usados por Sanjay (2018) para avaliar a eficiência energética de dois tipos diferentes de turbinas a gás que produzem eletricidade em um sistema de utilidades. Os indicadores termo econômicos foram usados para avaliar a regulamentação do setor de utilidades energética no Brasil, na geração de eletricidade distribuída por fonte solar (FERREIRA, KUNH, *et al.*, 2018). Grassian, Bahatem e Scott (2017) usaram os indicadores termo econômicos, termo físicos e econômicos em conjunto para propor uma metodologia para melhorar o desempenho de operações de óleo e gás visando reduzir o consumo dos insumos dos processos de produção e operações.

Diferentemente dos indicadores que avaliam a eficiência energética de partes de um sistema de utilidades, os métodos *SFA* e *DEA* consideram na análise todas as variáveis envolvidas no sistema, na busca de métodos operacionais mais eficientes do ponto de vista energético. Esses métodos também são aplicados para realizar comparativos entre diferentes sistemas de utilidades ou unidades industriais (HASANBEIGI, 2016).

Com o objetivo de propor uma rede integrada para otimizar a distribuição e consumo de vapor em um sistema de utilidades e avaliar a emissão de gases de efeito estufa sob cenários de incertezas de demanda da produção, Ahn e Han (2018) utilizaram o modelo *SFA* que foi aplicado em dois estágios e utilizaram 50 parâmetros, 57 variáveis para propor 18 cenários diferentes.

O método *DEA* foi aplicado por Longo, Lema, *et al.* (2018) para avaliar de eficiência energética em um sistema de captação de água, caracterizado como *Robust Energy Efficiency (REED)*, que tem como entradas do processo os

parâmetros de eletricidade e a dosagem de produtos químicos, e como saída, a quantidade de poluentes retirados contidos na água.

A avaliação da eficiência energética por análise de exergia, está restrita ao nível dos equipamentos industriais que a empresa possui, não sendo possível esse tipo de análise de forma integrada aos processos, pois tradicionalmente ela avalia os equipamentos individualmente (ASL, TAHOUNI e PANJESHAHI, 2018). Para realizar esta análise de forma integrada, Ataei e Yoo (2010) propuseram um método de avaliação da eficiência energética, por meio da análise de exergia combinada com o *Pinch analysis*, o método proposto pelos autores foi denominado de *CPEA (combined Pinch and Exergy Analysis)*. O método *CPEA* foi aplicado em uma indústria de óleo e gás para avaliar a eficiência energética na rede de troca térmica de uma refinaria. Para isso, os autores avaliaram 100 variáveis diferentes.

No entanto, a utilização dos indicadores descritos por Patterson (1996) e pelos modelos de avaliação de eficiência energética pelos métodos de *SCA*, *DEA* e a análise por exergia, possuem duas desvantagens. A primeira delas é a quantidade de parâmetros e variáveis que devem ser medidos para realizar a avaliação em aplicações de sistemas de utilidades reais e, a segunda desvantagem é que todos os indicadores e métodos tratam problemas específicos dos processos do sistema de utilidades, e não o sistema todo de utilidades.

Ambas as desvantagens se refletem na dificuldade de aplicar esses métodos em situações reais, especialmente, quando a avaliação da eficiência energética deve ser realizada no sistema todo, considerando todos os processos de produção e distribuição das utilidades. Além disso, os métodos não possibilitam o monitoramento prático em tempo real das variáveis para identificar as perdas de desempenho durante a operação da produção e distribuição do sistema de utilidades.

### **1.1. OBJETIVO DO TRABALHO**

Este trabalho tem como objetivo geral a proposição de um método de avaliação da eficiência energética em sistemas de utilidades industriais, divididos em indicadores dos processos de produção e de distribuição de cada insumo, para compor a gestão das utilidades pelo monitoramento contínuo das variáveis envolvidas, e em tempo real monitorar o desempenho operacional.

Como objetivos específicos tem-se a identificação dos métodos existentes de avaliação de eficiência energética em sistemas de utilidades, as respectivas variáveis e indicadores, como também a ilustração do método proposto.

### **1.2. DELIMITAÇÕES DO TRABALHO**

Não é foco deste estudo o detalhamento da medição e da modelagem de todas as variáveis do processo, mas apenas as variáveis que estão diretamente associadas aos parâmetros monitorados pelo método. Nem identificar e quantificar as fontes de perdas inerentes aos processos de produção e distribuição das utilidades.

### **1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO**

Este trabalho está estruturado em 5 Capítulos, começando com a Introdução, que busca contextualizar o trabalho, destacando a sua relevância e justificativa, além do o objetivo do trabalho e respectivas delimitações.

O Capítulo 2 traz os conceitos teóricos que são necessários para entender e desenvolver este estudo, os quais estão relacionados com a eficiência energética na produção e distribuição de utilidades industriais. Este Capítulo apresenta também os métodos de análise da eficiência energética que foram identificados na literatura.

O Capítulo 3 apresenta o método de pesquisa deste estudo, que estabelece as etapas que devem ser desenvolvidas para a proposição do modelo deste estudo, bem como o detalhamento das atividades que devem ser desenvolvidas. O Capítulo 4 apresenta o método de avaliação, com o detalhamento das suas etapas, bem como a apresentação detalhada da sua aplicação. No Capítulo 5 estão apresentadas as conclusões do trabalho, que visam responder aos objetivos gerais e específicos declarados na introdução, além da descrição de propostas de estudos futuros, derivadas das questões que foram identificadas durante este estudo.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

Neste capítulo estão descritos os resultados de uma revisão teórica-conceitual que foi desenvolvida referente a avaliação de eficiência energética aplicados aos processos de produção e distribuição dos insumos em sistemas de utilidades industriais. Como conceitos teóricos importantes para este estudo estão apresentados os processos de captação de água, geração de vapor e de eletricidade, e produção de ar comprimido.

Além desta parte conceitual, este Capítulo apresenta artigos que foram obtidos da revisão sistemática da literatura sobre métodos e indicadores que são aplicados na análise da eficiência energética de sistemas de utilidades, que serão utilizados como a base conceitual para a proposição do modelo de avaliação.

### **2.1. SISTEMA DE UTILIDADES INDUSTRIAIS**

O sistema de utilidades industriais é composto pelos equipamentos que produzem e distribuem os insumos industriais, matéria prima e ferramentas necessários para o funcionamento de todos os sistemas de produção, sendo que esses insumos são de alto poder energético (MOUSAVI, KARA e KORNFELD, 2016). Para ZHANG, LUO, *et al.*, (2013) esse sistema de utilidades funciona como uma reserva de fonte de energia e controle energético nas unidades industriais, e são responsável por assegurar a operação de todos os processos de produção. Dessa maneira, o sistema de utilidades deve ser flexível para atender as variações de demanda dos insumos por estes sistemas de produção industrial (SUN, GAI e SMITH, 2016).

A caracterização de um sistema de utilidades é feita por FESTEL e WÜRMSEHER, (2014) que descrevem estes sistemas como sendo formado pelos processos que garantem os insumos de vapor, eletricidade, ar comprimido



e água, todos importantes para a produção industrial. Sendo assim, os próximos tópicos descrevem estes insumos e as respectivas técnicas para análise da eficiência energética.

### 2.1.1. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA GERAÇÃO DE VAPOR E ELETRICIDADE

Cogeração de energia é a combinação simultânea de diferentes formas de energia útil, por exemplo a combinação de energia térmica e energia eletromagnética. Esta prática de cogeração de energia é utilizada em diversos setores industriais (BALESTIERE, 2002). O principal equipamento utilizado para a cogeração de energia é a caldeira, na qual o vapor gerado é expandido nas turbinas para a geração de eletricidade (BARMA, SAIDUR, *et al.*, 2017), como exemplificado na Figura 1.

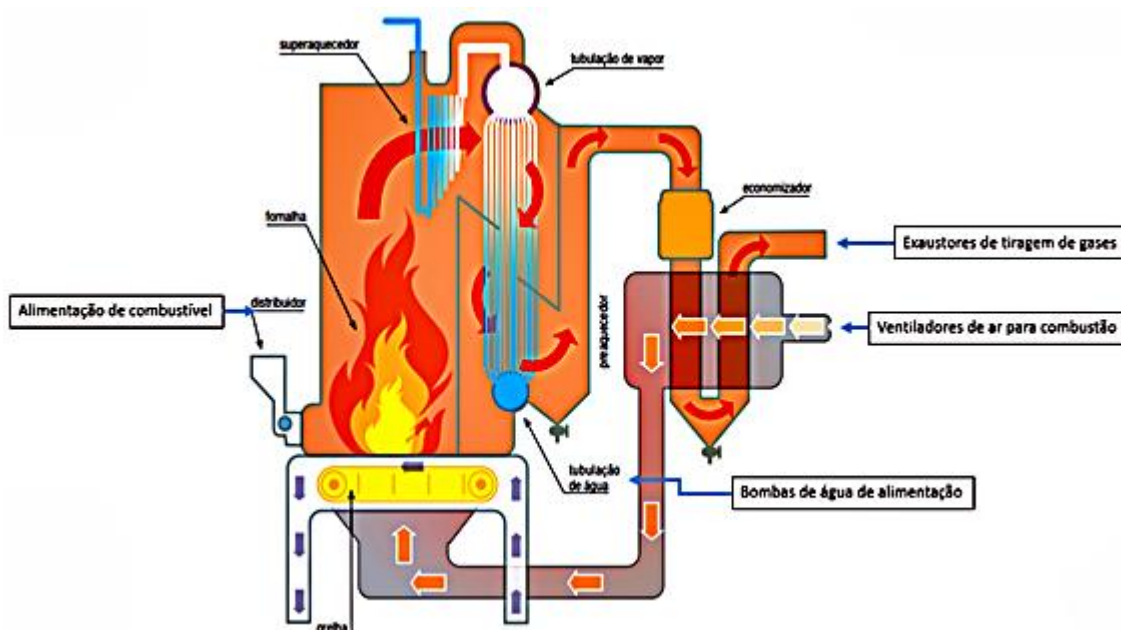


FIGURA 1: CALDEIRA DE GERAÇÃO DE VAPOR (ELEKTRO, 2014) – ADAPTADO

As bombas de alimentação de água, ventiladores e exaustores das caldeiras podem ser acionadas por motores elétricos, turbinas a vapor ou ambos, quando necessária atenção a segurança de processo (PERA, 1990). Segundo Barma *et al.* (2017) os acionamentos elétricos na geração de vapor representam 48% do consumo total de eletricidade dessa operação. BUHLER, NGUYEN e

ELMEGAARD, (2016) destacam que em auditorias energéticas, o levantamento dos ativos consumidores de eletricidade é uma etapa fundamental para entender o comportamento do processo de produção, no que diz respeito aos respectivos consumos. Neste caso, a eficiência energética dos acionamentos elétricos pode ser obtida por meio da avaliação das cargas de demanda do processo e operação dos acionamentos (EUROPEAN COMMISSION, 2009).

O método de combustão direto em caldeiras para a geração de vapor é a aplicação mais comum para produzir este insumo, e a eficiência da produção de vapor depende intrinsecamente da qualidade do combustível aplicado, como por exemplo, óleo, biomassa, gás natural, dentre outros (GEBREEGZIABHER, OYEDUN, *et al.*, 2014). BLESS, ARPAGAUS, *et al.*, (2017) complementam que a eficiência da produção também depende do volume de água transformado em vapor, da temperatura e da pressão de operação da caldeira.

Barma *et al* (2017) salientam que a eficiência energética na produção de vapor envolve a performance da queima de combustível. De acordo com Pera (1990), o rendimento térmico no desempenho de queima de combustíveis de um gerador de vapor é a fração do poder calorífico do combustível que é absorvido pela água e transformada em vapor, sendo obtida pela equação 1.

$$Ef_{t\acute{e}rmica} = \frac{PCI \times Efici\acute{e}ncia\ do\ gerador\ de\ vapor}{h_v - temperatura\ da\ \acute{a}gua\ de\ alimenta\c{c}\~{a}o} \quad (1)$$

No qual,

$EF_{t\acute{e}rmica}$  dado em kg de vapor/kg de bagaço,

$PCI$  é o poder calorífico inferior do combustível em kcal/kg

$Efici\acute{e}ncia\ do\ gerador\ de\ vapor$  é medido em porcentagem

$Temperatura\ da\ \acute{a}gua\ de\ alimenta\c{c}\~{a}o$  em °C

$h_v$  a entalpia do vapor em kcal/kg.

A Tabela 1 apresenta os valores do poder calorífico dos combustíveis mais utilizados em caldeiras para geração de vapor d'água, e que são utilizados para os cálculos de eficiência térmica da queima, de acordo com a Equação 1.

Combustível	PCI	Combustível	PCI
<b>Gasosos</b>	<b>kcal/kg</b>		<b>kcal/kg</b>
Gás Natural	11259	Diesel Renovável II (UOP-HDO)	10504
Hidrogênio	28712	Gasolina Renovável	10328
Gás Refinaria	11201	Hidrogênio Líquido	28678
<b>Líquidos</b>	<b>kcal/kg</b>	Metil terciário butil éter (MTBE)	8385
Petróleo Cru	10195	Etil terciário butil éter (ETBE)	8674
Gasolina	10377	Terciário amil metil éter (TAME)	8692
Gasolina reform. baixo enxofre	10117	Butano	10814
CA reform. Gasolina	10151	Isobutano	10715
Diesel	10221	Isobutileno	10706
Diesel baixo enxofre	10178	Propano	11057
Nafta de petróleo	10733	<b>Sólidos</b>	<b>kcal/kg</b>
NG-base FT nafta	10601	Carvão seco [6]	5429
Óleo Residual	9426	Carvão betuminoso seco [7]	6239
Metanol	4799	Carvão coque seco	6833
Etanol	6437	Arvores florestais secas	4670
Butanol	8208	Biomassa Herbácea seca	4110
Acetona	7067	Palha de milho seca	3910
E-Diesel Additives	10377	Resíduos florestais secos	3679
Gas Líq. Petrol – LPG	11132	Bagaço de cana	3596
Gás Nat Líq. - (LNG)	11616	Ester Metílico - BD biodiesel	8963
Dimetil éter (DME)	6898	Fischer-Tropsch diesel (FTD)	10329
Dimetoxymetano (DMM)	5590	Diesel Renovável (Super Cetano)	10405

TABELA 1: PODER CALORÍFICO DOS COMBUSTÍVEIS (ASCO, 2018).

No entanto, a propriedade de cada combustível é inerente às suas propriedades químicas e de queima, para o caso do bagaço de cana de açúcar, (HUGOT, 1966) determina que o PCI do bagaço é obtido pelas parcelas de fibra, açúcar, água produzida pela combustão do hidrogênio, e umidade, conforme Equação 2.

$$PCI = 4250 - (48,5 \times \text{umidade do bagaço}) - (12 \times \text{POL do bagaço}) \quad (2)$$

No qual,

PCI como anteriormente, obtido em kcal/Kg;

*Umidade do bagaço em porcentagem;*

*POL do bagaço obtido, também, em porcentagem.*

Além do poder calorífico, deve-se conhecer os valores da entalpia específica do vapor produzido, e água, conforme mostra a Tabela 2.

*TABELA 2: ENTALPIA ESPECÍFICA (BERMO, 2018) – ADAPTADO.*

<b>Pressão Absoluta (kgf/cm<sup>2</sup>)</b>	<b>Temperatura de Vaporização (°C)</b>	<b>Entalpia específica – Vapor (kcal/kg)</b>
21	320	710
100	530	824

A Tabela 2 mostra os valores de entalpia específica do vapor superaquecido para os níveis de pressão de 21 e 100 kgf/cm<sup>2</sup>, que são níveis de pressão utilizados no estudo.

O consumo específico na produção de vapor, considerando o consumo de bagaço de cana de açúcar para unidades de cogeração de energia tem média de 2,3 kgv/kgb, como valores normalmente entre 2,0 kgv/kgb e 2,5 kgv/kgb (NETO e RAMON, 2002).

Após a geração de vapor nas caldeiras, esse vapor é admitido na entrada das turbinas a vapor, para expandir e produzir energia elétrica. Em geral para uma unidade com alta eficiência energética medida pelo consumo específico de vapor na produção de energia elétrica é de 3,2 kgv/kWh para turbinas de condensação, e 5,2 kgv/kWh para turbinas de contrapressão/extração (RODRIGUES, 2005).

Como resultado da cogeração de energia, a geração de eletricidade é proveniente da expansão térmica do vapor nas turbinas e que movimentam o gerador elétrico, como ilustra a Figura 2.

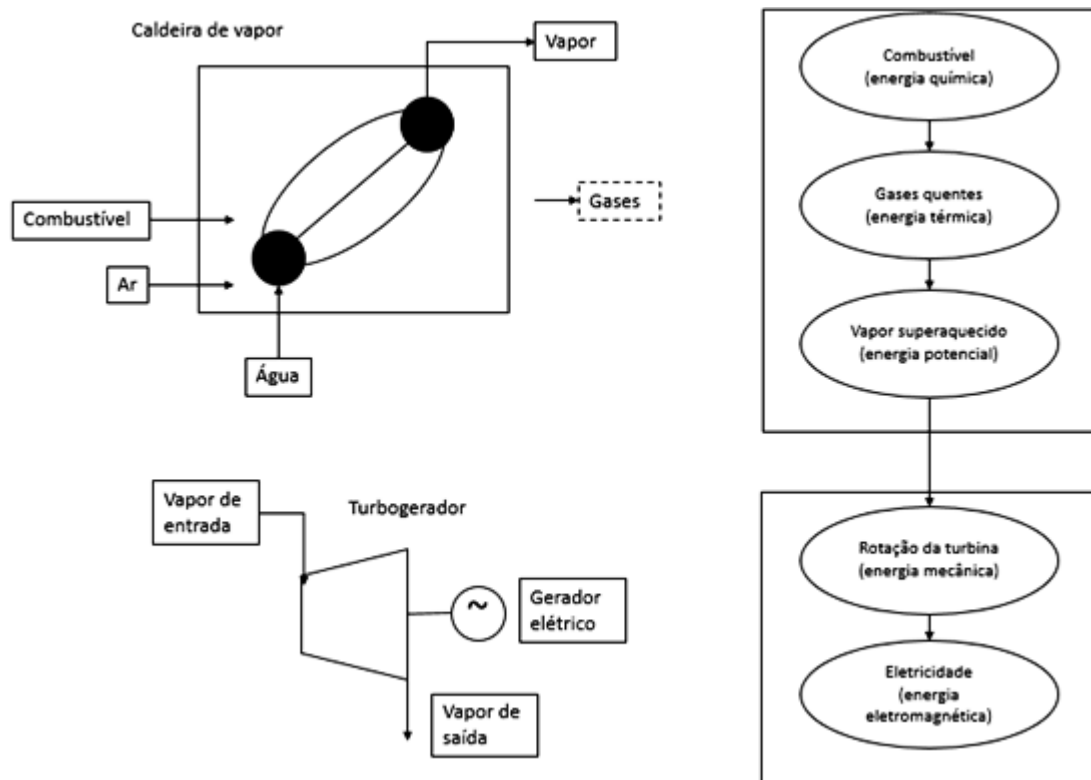


FIGURA 2: PROCESSO DE COGERAÇÃO DE ENERGIA (LORA E NASCIMENTO, 2004).

O processo de cogeração, iniciado na conversão de energia química contida nos combustíveis e transformada em energia térmica na forma de calor e em energia potencial pelo vapor superaquecido. O vapor superaquecido é expandido nas turbinas e convertido em energia mecânica, com a rotação do eixo, e finalmente convertido em energia eletromagnética e eletricidade como sua forma final (LORA e NASCIMENTO, 2004).

A análise da eficiência energética nesses ciclos combinados de geração de vapor e eletricidade foi realizada por KIKUCHI, KANEMATSU, *et al.*, (2016) com um método de aproveitamento em cascata da energia contida nos combustíveis e do calor dissipado no processo para ser reaproveitado nas caldeira. A Figura 3 mostra a ilustração do método desenvolvido pelos autores.

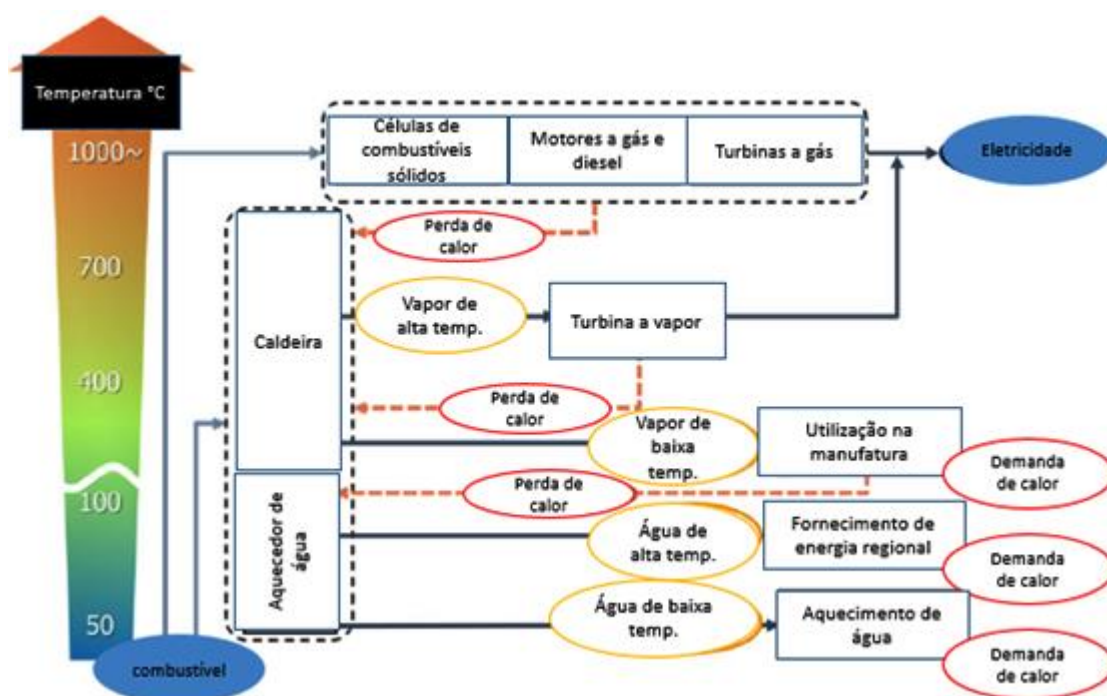


FIGURA 3: APROVEITAMENTO EM CASCATAS DA ENERGIA DOS COMBUSTÍVEIS (KIKUCHI, KANEMATSU, ET AL., 2016).

As altas temperaturas são requisito para a geração de eletricidade, e os retângulos na figura indicam aplicação de tecnologia, sendo que os retângulos pontilhados indicam comparativos entre tecnologias, os demais indicam os materiais utilizados ou informações (KIKUCHI, KANEMATSU, *et al.*, 2016).

O estudo de OLULEYE, SMITH e JOBSON, (2016) mostram que a eficiência energética em sistemas térmicos é dependente da redução de perdas de calor no processo, e ao não aproveitamento das temperaturas na integração total de energia no processo. Outra forma de considerar a eficiência energética foi apresentada por FESTEL e WÜRMESEHER, (2014), cujos estudos mostram que as empresas têm formando aglomerados para compartilhar a utilização desses insumos, o que permite que elas dividam os custos envolvidos no consumo de vapor e eletricidade.

Para as empresas que consomem eletricidade de fontes externas para complementar a geração interna, CHOUBINEH e MOHAGHEGHI, (2016) destacam o gerenciamento de energia da manufatura, considerando os períodos

de operação e a respectiva demanda de eletricidade, como grande impacto na eficiência energética.

No estudo desenvolvido por FESTEL e WÜRMESEHER, (2014) foi realizado um *benchmarking* com o objetivo de comparar diferentes unidades de uma mesma empresa, que considerou a produção e distribuição de eletricidade, e a comparação de 23 indicadores de eficiência energética do setor. Os resultados deste estudo mostraram que é necessário um fator de correção, que leva em consideração a realidade de cada unidade para a correta comparação entre as unidades pois, mesmo considerando o mesmo processo de produção, as realidades são distintas.

Outro estudo foi desenvolvido por BUHLER, NGUYEN e ELMGAARD, (2016) que avaliaram a eficiência energética e exergia de um sistema industrial, para isso, os autores definiram a eficiência de energia e exergia de acordo com as equações 3 e 4.

$$n = \frac{\text{energia no produto}}{\text{total de energia de entrada}} \quad (3)$$

$$\psi = \frac{\text{exergia no produto}}{\text{total de exergia de entrada}} \quad (4)$$

Sendo que as equações 3 e 4 são representadas respectivamente pela relação entre a soma de energia ou exergia no produto e a energia ou exergia total de entrada no sistema.

O método apresentado por BUHLER, NGUYEN e ELMGAARD, (2016) divide a análise de eficiência entre a planta industrial e sistema industrial, conforme mostra a Figura 4.

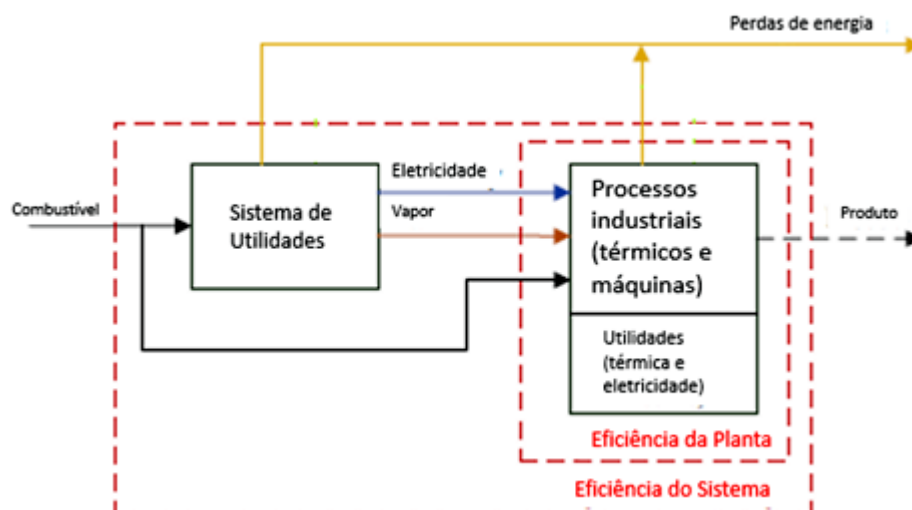


FIGURA 4: FRONTEIRA PARA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA ENTRE PLANTA INDUSTRIAL E SISTEMA (BUHLER, NGUYEN E ELMEGAARD, 2016).

Um sistema de utilidades está contido nos limites estabelecidos para o sistema Industrial, isso significa que o sistema de utilidades industriais é uma parte do sistema industrial, sendo definido pelo fluxograma da Figura 5.

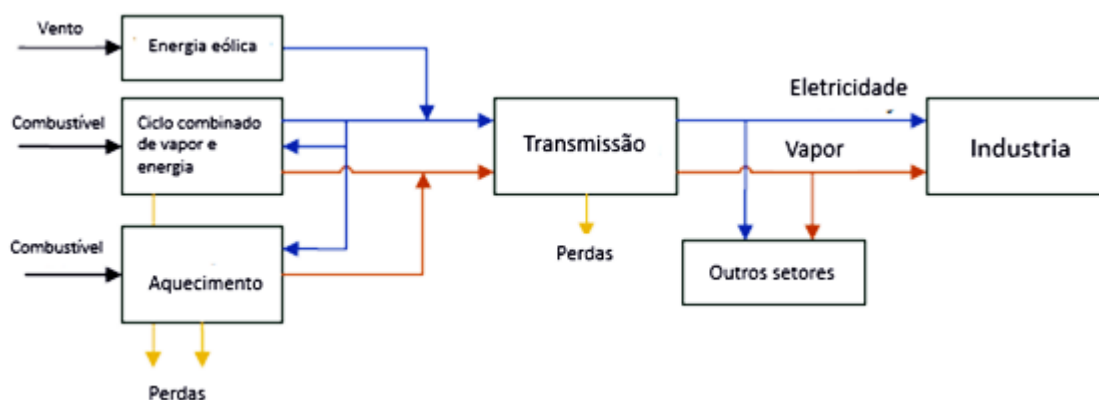
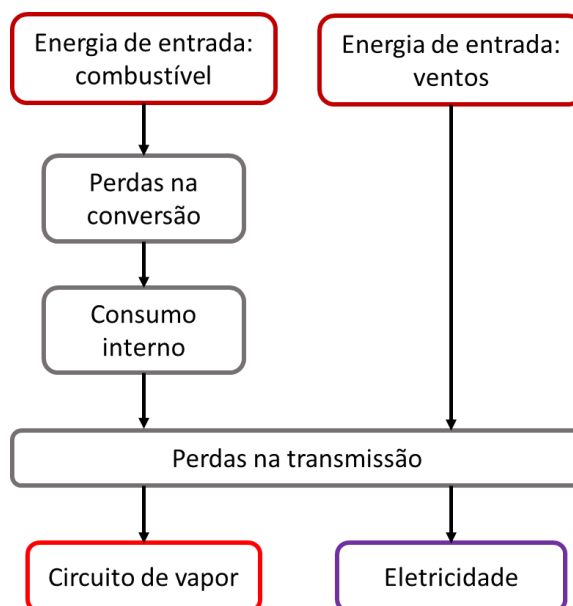


FIGURA 5: FLUXOGRAMA DE PROCESSOS DE ENERGIA NO SISTEMA DE UTILIDADES (BUHLER, NGUYEN E ELMEGAARD, 2016).

O estudo apresentado pelos autores, que utilizou o fluxograma da Figura 5, considerou, além do ciclo combinado de vapor e energia, também a força do vento como fonte alternativa para geração de energia elétrica. Foram analisadas as perdas na geração dos insumos e as perdas na respectiva distribuição. A análise global das perdas do sistema de utilidades industriais que envolve esses dois insumos é ilustrada na Figura 6.





*FIGURA 6: FLUXOGRAMA DE PERDAS ENERGÉTICA NO SISTEMA DE UTILIDADES (BUHLER, NGUYEN E ELMEGAARD, 2016).*

Conforme mostra a Figura 6, existem três fontes de perdas de energia: perdas na conversão, transmissão e de consumo interno. Na conversão de energia ocorrem as perdas químicas, que são inerentes ao processo de transformação. O consumo interno é responsável pela parcela de energia que o próprio sistema de utilidades consome, e as perdas na transmissão são atribuídas às perdas das linhas de transmissão dos insumos energéticos de vapor e eletricidade (BUHLER, NGUYEN e ELMEGAARD, 2016). Para quantificar a eficiência energética desse sistema de utilidades, os autores realizam o balanço energético da geração e transmissão dos insumos, os quais envolvem as equações 3 e 4.

Além da avaliação de eficiência energética em nível de processo, MOUSAVI, KARA e KORNFELD, (2016) apresentam um método em estrutura hierárquica para modelagem da eficiência do sistema de utilidades em um sistema de manufatura, com análise temporal de potência no nível das máquinas operacionais, como ilustra a Figura 7.

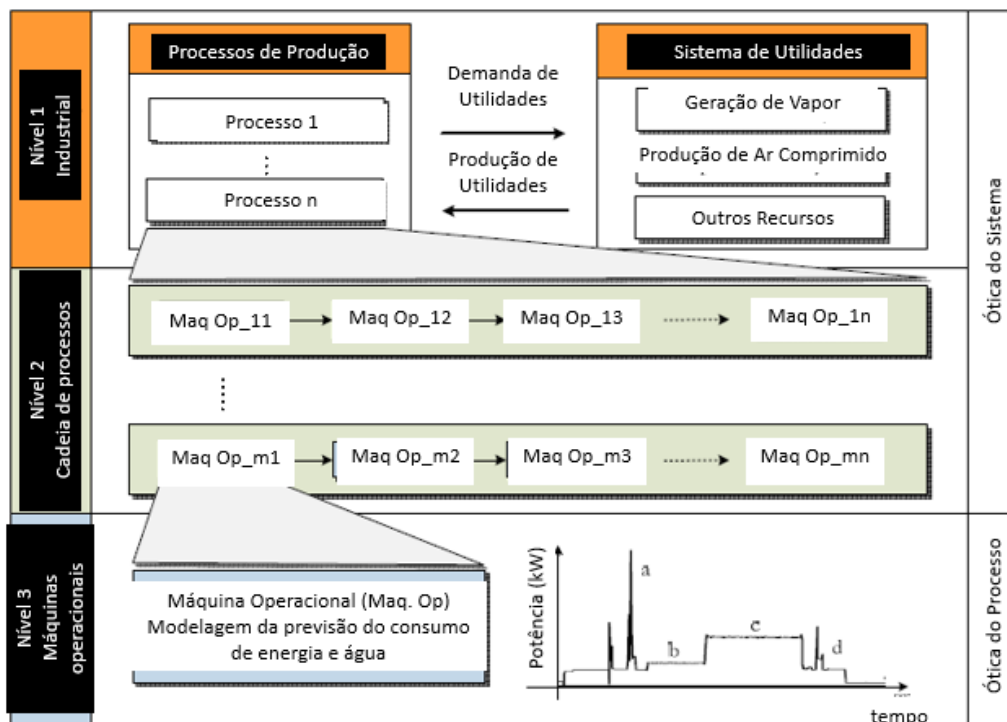


FIGURA 7: ANÁLISE DE POTÊNCIA NO TEMPO NO NÍVEL OPERACIONAL DAS MÁQUINAS DE MANUFATURA (MOUSAVI, KARA E KORNFELD, 2016).

De acordo com a Figura 7, a modelagem proposta por MOUSAVI, KARA e KORNFELD, (2016), o nível três de uma atividade de manufatura é representado pelas máquinas operacionais, nas quais são realizadas modelagem para prever o consumo de energia elétrica e água de cada máquina inserida no sistema do nível 2.

Para produzir os insumos de utilidades é necessário utilizar fonte de energia adicional, como por exemplo, eletricidade, gás natural, e óleo combustível, o que contribui para o consumo de energia da produção (MOUSAVI, KARA e KORNFELD, 2016). Esse consumo de energia está entre 35 e 40% do total da demanda da uma unidade industrial. Assim, esses sistemas apresentam potencial para economia de energia, seja pela utilização de equipamentos mais eficientes, com dimensionamento adequado, e estratégias de controle corretas, ou reduzindo as perdas nas linhas de distribuição das utilidades (HERRMANN, THIEDE, *et al.*, 2011).

### 2.1.2. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA PRODUÇÃO DE AR COMPRIMIDO

Para o EUROPEAN COMMISSION, (2009) os processos de produção de ar comprimido são divididos em: geração, armazenamento, tratamento e distribuição, conforme mostra a Figura 8.

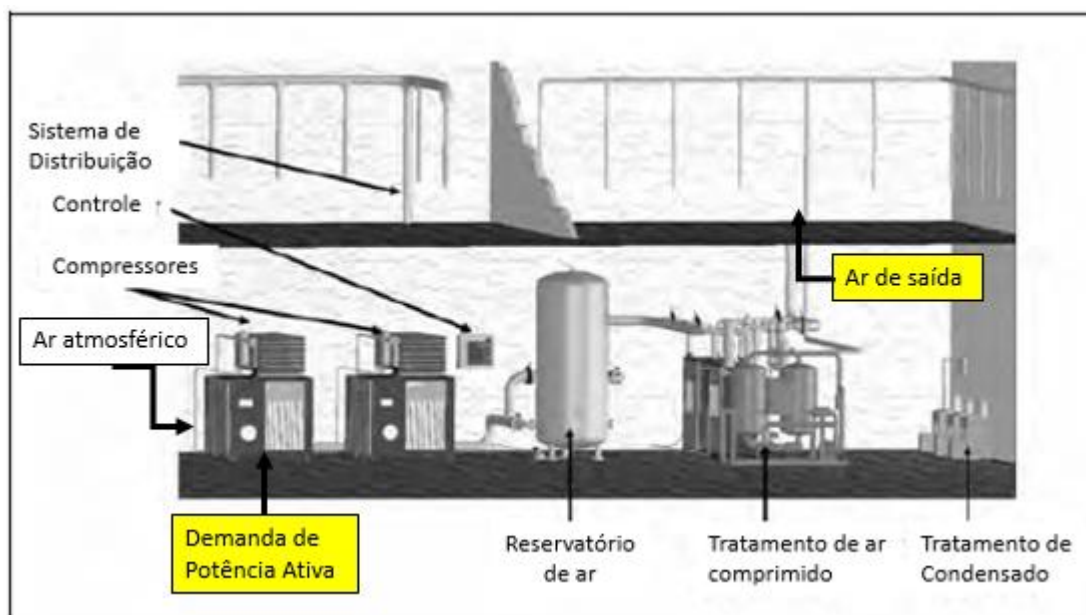


FIGURA 8: COMPONENTES DA PRODUÇÃO DE AR COMPRIMIDO (EUROPEAN COMMISSION, 2009) – ADAPTADO.

Conforme ilustra a Figura 8, o processo de produção de ar comprimido inicia-se com o ar atmosférico sendo insuflado pelos compressores à pressão atmosférica e comprimido na câmara dos compressores, armazenados em um reservatório de ar. Em seguida, realiza-se o tratamento do ar comprimido, em geral por meio de um separador de água e óleo, e de secadores de ar. Desse processo de secagem, o ar comprimido segue para a linha de distribuição e o condensado segue para tratamento (EUROPEAN COMMISSION, 2009).

Em média, o consumo de eletricidade na produção de ar comprimido representa 10% do total de eletricidade consumido em um sistema industrial. Além disso, os custos com eletricidade representam cerca de 75% dos custos totais do processo de geração de ar comprimido (CIPOLLONE, 2014).

A definição para a produção de ar comprimido é importante, pois de acordo com EUROPEAN COMMISSION (2009), é complexa a questão de estabelecer técnicas de avaliação de eficiência energética iguais para diferentes processos. O consumo específico como uma ferramenta de gerenciamento da eficiência energética em sistemas de ar comprimido, é dado pela Equação 5.  $SEC = \frac{\text{consumo de energia}}{\text{vazão de ar comprimido}}$  (5)

No qual,

$SEC$  é o consumo específico na produção de ar comprimido;

Consumo de energia é a eletricidade de entrada no acionamento do compressor, medido em kWh;

Vazão de ar comprimido é a produção entregue ao processo  $m^3/h$ .

Além disso, a FUPAI/EFFICIENTIA (2005) sugere que os parâmetros de vazão, pressão, temperatura, potência, energia consumida e custos são fundamentais para o gerenciamento dos processos de produção de ar comprimido.

Um estudo apresentado por CIPOLLONE (2014) mostra que a maioria das pesquisas sobre eficiência energética na produção de ar comprimido abordam as seguintes questões: vazamentos nas linhas de distribuição; adequação do dimensionamento; acionamentos elétricos e carga de recuperação do calor dissipado no processo. Ainda neste estudo, o autor defende a análise da eficiência energética por meio da inserção de novas tecnologias.

Já VITTORINI e CIPOLLONE, (2016) analisaram os tipos de compressores existentes, comparando a sua operação. Para isso, eles desenvolveram um experimento que comparou os resultados obtidos na operação com velocidades variadas com a operação com velocidade constante. Os resultados do estudo evidenciaram os ganhos com eficiência energética pelo controle de velocidade de compressores de ar já instalados. Porém, para produção de ar comprimido que operam com plena carga, os *drivers* para controle de velocidade representam uma fonte adicional de consumo de eletricidade (ELBURG e BOORN, 2014).

Segundo Hasangeigi e Price (2010), outra maneira de avaliar a eficiência energética nos processos de produção de ar comprimido é por meio de auditoria energética. Esta auditoria consiste de uma inspeção, pesquisa e análise dos fluxos de energia de um sistema, com o objetivo de reduzir o consumo de energia, sem impactar negativamente na produção.

Um estudo desenvolvido por Boharb, Allouhi, *et al.* (2017) utilizam os conceitos de auditoria energética, e as divide em cinco tópicos:

1. Coleta dos dados de cobrança de energia elétrica dos últimos três anos da empresa, com o objetivo de avalia-las para:
  - i. Reduzir a potência contratada, baseado no histórico de consumo de eletricidade e previsões de consumo futuro;
  - ii. Analisar a taxa de carga dos transformadores de potência, sendo considerada como carga máxima o montante de eletricidade contratada;
  - iii. Monitorar os custos relativos o fator de potência para identificar oportunidade de melhoria;
2. Elaborar uma lista dos equipamentos da planta industrial passíveis de auditoria (transformadores, compressores de ar, fornos, motores, sistemas de iluminação, bombas, ventiladores e sistemas de refrigeração) com relação às demandas de potência, fabricante e utilização;
3. Instalação de analisadores de energia no enrolamento secundário do transformador de potência da subestação elétrica, para monitoramento contínuo e medição dos parâmetros que impactam na não-qualidade de energia elétrica (tensão, corrente, desbalanceamento de fase, distorção harmônica total, etc);

4. Instalação de um analisador no circuito de ar comprimido, com monitoramento aos finais de semana em que a unidade esteja parada, para quantificar as perdas de energia nos processos de ar comprimido;
5. Aquisição e instalação de uma camera infra-vermelha para monitorar as superfícies externas das caldeiras e fornos para detectar perdas térmicas.

Para quantificar do consumo de energia da produção de ar comprimido, Hasangeigi e Price (2010) utilizam a Equação 6.

$$\text{Consumo de e. e.} = P_{\text{carga}} \times \text{horas}_{\text{carga}} + P_{\text{vazio}} \times \text{horas}_{\text{vazio}} \quad (6)$$

No qual,

o consumo de e.e. é o consumo anual de energia elétrica da produção de ar comprimido;

$P_{\text{carga}}$  é a potência consumida no período  $\text{horas}_{\text{carga}}$

$P_{\text{vazio}}$  é a potência consumida a vazio no período  $\text{horas}_{\text{vazio}}$ .

O consumo específico é medido de acordo com a Equação 7,

$$C.E_{PAC} = \frac{\text{consumo de energia elétrica}}{\text{Produção de ar comprimido}} \quad (7)$$

No qual,

$C.E_{PAC}$  é o consumo específico da produção de ar comprimido anual;

consumo de energia elétrica é medido em kWh;

produção de ar comprimido é medida em  $\text{Nm}^3/\text{ano}$ .

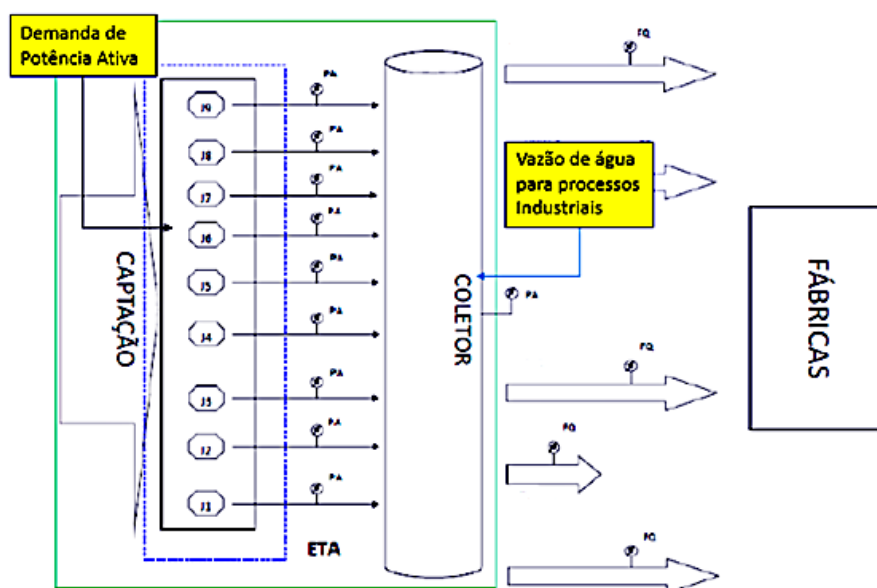
Esse estudo de Boharb, Allouhi, *et al.* (2017) quantifica o consumo específico da unidade de produção de ar comprimido em  $0,204 \text{ kWh/m}^3$ . Mas para CIPOLLONE (2014) uma operação de ar comprimido eficiente possui um consumo específico entre  $0,085$  e  $0,13 \text{ kWh/m}^3$ .

### 2.1.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA CAPTAÇÃO DE ÁGUA

Os processos industriais de captação, tratamento e distribuição de água são onerosos para as empresas, isso sugere que podem ser realizadas melhorias nestes processos, e gerar economias com a redução do consumo final de água, a partir da eliminação de perdas nas linhas de distribuição, adequação do bombeamento e operação do sistema (MONACHESI, 2005).

Neste sentido, Edwards e Finn (2015) destacam que os ganhos com eficiência energética em estações de captação e tratamento de água, está no controle efetivo do bombeamento, por meio da análise da demanda efetiva dos processos e do volume de água que é bombeado. Para quantificar os ganhos, Gu; Teng e Wang (2014) correlacionaram as economias de energia e combustível com a demanda industrial de água em função da produção.

Segundo Boharb; Allouhi, et al (2017) o processo de captação, tratamento e distribuição de água, consome grande quantidade de eletricidade, que pode ser medido por analisadores de energia instalados no acionamento dos processos. Para isso, pode-se relacionar a operação de bombeamento, a medição de consumo de energia elétrica e o volume bombeado para os processos de produção e fabricação, conforme mostra a Figura 9.



*FIGURA 9: PROCESSO DE CAPTAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA (PAPA E SIMON, 2017).*

A Figura 9 mostra o fluxograma dos processos de captação e distribuição de água para uma unidade genérica, destacando os pontos de medição da demanda de potência de entrada, e as medições de vazão de saída.

Ainda no estudo de Gu; Teng e Wang (2014), são feitas duas considerações sobre a utilização de água e eletricidade: a primeira é que a utilização de água consome eletricidade, e a segunda é que o consumo de energia elétrica implica no gerenciamento dos recursos hídricos. Neste sentido os autores apresentam um método de análise das entradas e saídas do processo para avaliar a relação entre energia elétrica e o uso de água, associado a economia no uso da água e redução no consumo de energia elétrica pela relação entre os dois insumos. O método quantifica os recursos necessários na entrada do processo para produzir uma determinada quantidade de produtos e a respectiva demanda das utilidades para a produção.

Ainda sobre a relação entre as entradas e saídas dos processos, Hortvath, (2006), analisa o ciclo de vida dos equipamentos de captação de água e identifica a dificuldade para a coleta de dados que compõem os parâmetros para análise de eficiência nesse insumo devido à pouca disponibilidade de dados e pelo fato das empresas não divulgarem informações referentes a este processo.

A saída do processo representa a quantidade de produtos que são produzidas por setor  $i$  e, em sequência utilizada pelo setor  $j$  para produzir uma unidade de produto. Se  $X_j$  indica a quantidade monetária total dos produtos produzidos pelo setor  $j$ ,  $X_{ij}$  indica o valor monetário total dos produtos produzidos pelo setor  $i$  e na sequência utilizado pelo setor  $j$  na produção. O coeficiente  $a_{ij}$  é denominado o coeficiente direto de saída para suprir o consumo da relação entre os setores  $i$  e  $j$ . Assumindo que a economia é composta por  $n$  setores, a relação entre as três variáveis é obtida pela Equação 8.

$$a_{ij} = \frac{X_{ij}}{X_j} \quad (i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (8)$$



Adicionalmente, para a entrada direta de um material, o processo de produção atual demanda uma saída indireta. Um completo coeficiente de entrada refere-se à quantidade total de produtos do setor  $i$  utilizada pelo setor  $j$ , direta ou indiretamente. Se  $b_{ij}$  representa o coeficiente total de entradas na relação entre os setores  $i$  e  $j$ , pode ser escrito de acordo com a Equação (9).

$$b_{ij} = a_{ij} + \sum_{k=1}^n a_{ik} a_{kj} + \sum_{s=1}^n \sum_{k=1}^n a_{is} a_{sk} a_{kj} + \sum_{t=1}^n \sum_{s=1}^n \sum_{k=1}^n a_{it} a_{st} a_{sk} a_{kj} +$$

$$(i, j = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

Se  $B$  representa a matriz  $b_{ij}$ , tem-se a Equação 10.

$$B = A + A^2 + A^3 + A^4 + \dots \quad (10)$$

Que pode ser reescrita conforme a Equação (11)

$$B = (I - A)^{-1} - I \quad (11)$$

Em que  $I$  é a matriz identidade.

Assumindo que  $e_i$  é o fator direto de utilização de água por setor  $i$  de saída, pode-se expressar esse fator pela Equação (12)

$$e_i = \frac{E_i}{X_i} \quad (12)$$

Em que,

$E_i$  representa a utilização de água do setor  $i$ ;

$X_i$  é a saída do setor  $i$ ,

O fator de utilização de água  $e_i$  representa o consumo direto de água  $1 \times n$  na matriz  $E$ .

O fator de incorporação no consumo de água, direto e indireto, é expresso pela Equação (13)

$$P = E(I - A)^{-1}Y \quad (13)$$

No qual,

$Y$  é a demanda final

$E(I-A)^{-1}$  é o coeficiente de consumo total de água na matriz.

Ainda no estudo de Gu; Teng e Wang, (2014) o método de análise de entrada e saída permite calcular a relação entre vários setores em uma cadeia de produção, em que se utiliza a relação de produção (fornecimento) e demanda (consumo) entre o setor primário de fornecimento de energia e água, para obter o consumo direto e indireto de água. Nesse estudo são consideradas indústrias de diferentes setores, e faz parte dos resultados deste estudo a indicação do potencial de economia de água nas indústrias avaliadas, conforme mostra a Figura 10.

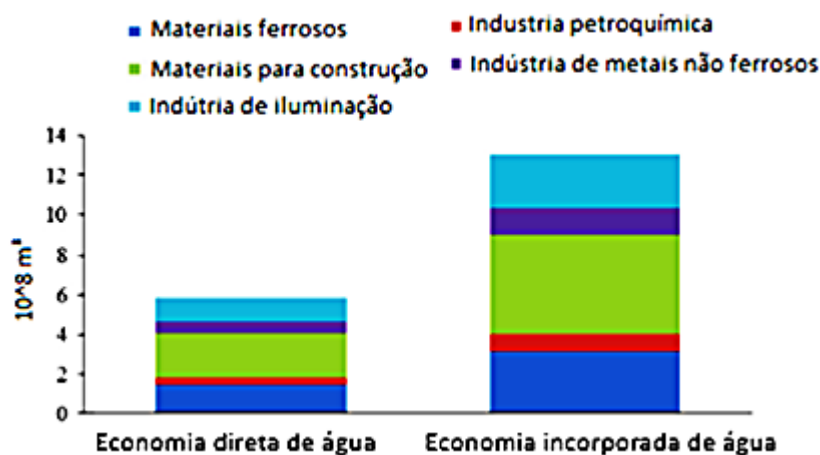
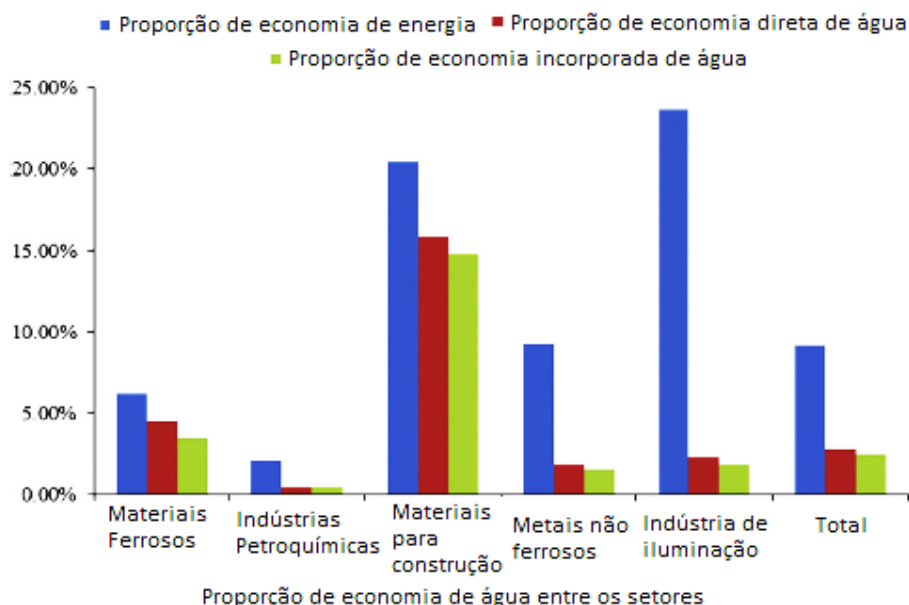


FIGURA 10: POTENCIAL DE ECONOMIA DE ÁGUA NOS PRINCIPAIS SETORES INDUSTRIAIS (GU, TENG E WANG, 2014).

A Figura 10 mostra o potencial de economia de água nas principais indústrias do setor secundário na China, considerando a economia direta de água pelo setor primário, e a economia de água incorporada dos setores de produção e setor primário. Para avaliar a economia de água associada a economia de energia elétrica, os dados diferem substancialmente entre os setores industriais, conforme mostra a Figura 11.



*FIGURA 11: PROPORÇÃO DAS ECONOMIAS RELACIONADAS AO CONSUMO DE ÁGUA ENTRE OS SETORES (GU, TENG E WANG, 2014).*

A Figura 11 mostra as economias de água associadas com a economia de energia, a maior relação está na indústria de materiais para construção. Isso ocorre devido aos processos do setor serem inerentes ao grande consumo de água e eletricidade. De forma geral, o método de entrada e saída desenvolvido pelos autores mostra a relação intrínseca entre economia de água e eletricidade.

Evidenciando ainda mais o alto consumo de energia na coleta, tratamento e distribuição de água, Tsutiya (1999) mostra que para o bombeamento de  $1\text{m}^3$  de água é necessário, em média consumir  $0,6\text{ kWh}$  de energia elétrica. O que indica que para essa operação, deve-se ter em média um consumo específico de  $0,6\text{ kWh/m}^3$ . Complementando este estudo, Festel e Würmseher, (2014) mostram que o potencial de economia no consumo de eletricidade no bombeamento de água varia entre  $1,14$  e  $18,66\text{ Reais/km}^3$  de água bombeada.

No entanto, para Verleye e Aghezzaf (2013), a eficiência energética em processos que envolvem a água como insumo são divididos em duas fases, a primeira é composta pelo desenvolvimento ótimo da linha de distribuição, atendendo os pontos de consumo de sem desperdícios de energia, e a segunda,

e mais desafiadora, garantir a performance das operações, e evitar o desperdício de energia ao longo do processo por motivos de desvios e falhas operacionais.

## 2.2. MODELOS E INDICADORES PARA AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE UTILIDADES

Os modelos e indicadores apresentados neste tópico resultaram da revisão bibliográfica que foi realizada com o objetivo de levantar estudos para embasamento teórico do método de avaliação proposto neste estudo. Desta forma, eles são resultado da identificação dos métodos de avaliação de eficiência energética em sistemas de utilidades industriais, que corresponde a primeira etapa do método de pesquisa deste estudo, apresentado no Capítulo 3. Como resultado final desta revisão tem-se 09 artigos identificados no tema do método proposto, conforme detalhado no Quadro 1.

QUADRO 1: ARTIGOS IDENTIFICADOS NA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

	<b>Título</b>	<b>Autores (ano)</b>	<b>Modelo/ indicador</b>	<b>Variáveis</b>
<b>Modelos</b>	Input–output performance efficiency measurement of an electricity distribution utility using super-efficiency data envelopment analysis	Bongo; Ocampo; Magallano; Manaban; Ramos (2018)	DEA e Super-efficiency analysis	2 variáveis de entrada e 3 variáveis de saída:
	A Nonparametric Economic Analysis of the US Natural Gas Transmission Infrastructure: Efficiency, Trade-Offs and Emerging Industry Configurations	Storto (2017)	DEA	4 variáveis de entrada e 4 de saídas
	Benchmarking energy efficiency in drinking water treatment plants: Quantification of potential savings	Molinos-Senante; Guzman (2018)	DEA	Variáveis estruturais e gerenciais
	Energy Benchmarking of Thermal Power Plants using Pinch Analysis	Asl; Tahouni, Panjeshahi (2017)	Pinch analysis	4 variáveis de entrada e 6 de saída

	Economic optimization of integrated network for utility supply and carbon dioxide mitigation with multi-site and multi-period demand uncertainties	Ahn e Han (2018)	SFA, modelo estocástico em dois estágios	18 configurações; 50 parâmetros e 57 variáveis
Indicadores	Thermoeconomic investigation of basic and intercooled gas turbine based power utilities incorporating air-film blade cooling	Sahu, Sanjay (2018)	Termo-econômico	Variáveis de duas turbinas de geração de energia elétrica para comparativo
	Optimal heat pump integration in industrial processes	Wallerand; Kermani; Kantor; Maréchal (2018)	Termodinâmico e Termo-econômico	Dados técnicos do processo
	Thermodynamic assessment of a novel SOFC based CCHP system in a wastewater treatment plant	Mehr; MosayebNezhad; Lanzini; Yari; Mahmoudi; Santarelli (2018)	Termodinâmico	Variáveis termodinâmicas do Sistema de utilidades aplicado a uma estação de tratamento de água.
	Development of and Energy Efficiency Improvement Methodology fo Upstream Oil and Gas Operations	Grassian; Bahatem; Scott (2017)	Termo-econômico e Termo-físico e economico	Variáveis envolvidas nos processos de utilidades do setor de óleo e gás

O Quadro 1 apresenta o resumo dos artigos que tratam da avaliação energética de sistemas de produção e distribuição de utilidades. Os artigos foram apresentados em dois grupos: os que consideram indicadores para a avaliação e os que consideram modelos matemáticos.

O estudo apresentado por Bongo, Ocampo, *et al.* (2018) apresenta uma aplicação que utilizou o método *DEA* de forma convencional em conjunto com a análise de supereficiência na medição de eficiência do processo de distribuição de eletricidade com 12 linhas de potência. O *DEA* possibilita realizar comparação entre unidades de decisão *DMUs* (*Decision Making Unitis*), para então avaliar a eficiência individual de cada unidade e a comparação da eficiência entre elas. Neste estudo, os autores consideraram cada uma das 12 linhas como unidades individuais e independentes para então avaliá-las e compará-las. Os resultados deste estudo mostraram que 4 das 12 linhas são ineficientes e precisam de intervenções com ações de melhoria. Além disso, este estudo resultou em um método para aplicação do modelo e endereçamento das ineficiências envolvidas

no processo. O método proposto pelos autores permite avaliar diferentes processos de forma comparativa para identificar quais deles são ineficientes.

O mesmo modelo foi aplicado por Storto (2018) que também analisa as linhas de distribuição em sistemas de utilidades para um caso da distribuição de gás natural nos EUA. O autor apresenta uma abordagem econômica, pois compara as unidades, linhas de distribuição, em termos financeiros. Os resultados evidenciaram que há ineficiências em termos econômicos na rede de distribuição de gás para o sistema de utilidades Norte Americano.

Outro estudo que utilizou o *DEA* foi apresentado por Molinos-Senante e Guzmán (2018), que analisaram dados de um sistema real de tratamento de água, para planejamento operacional da unidade e para a redução do consumo de energia elétrica associada à captura e tratamento da água. Para isso, os autores estabelecem variáveis estruturais e gerenciais que afetam a eficiência energética a serem exploradas. Como resultado comparativo entre unidades de tratamento de água, os autores identificaram que o tempo de operação e a companhia que fornece a utilidade têm impacto direto na eficiência energética do processo avaliado.

Para estimar o consumo de energia elétrica e a eficiência energética na distribuição de vapor em uma planta industrial, Asl, Tahouni e Panjeshahi (2018) desenvolveram um método matemático-conceitual construindo uma ferramenta para identificar oportunidades de melhoria na unidade avaliada. Com os resultados obtidos pelo modelo, os autores realizaram uma análise comparativa entre as plantas de geração termoelétrica. Para este estudo os autores usaram as variáveis do ambiente, como por exemplo as do ar, e as variáveis relativas às cargas de gás para o ciclo combinado de geração de vapor e eletricidade real dessas outras plantas industriais. O modelo apresentado pelos autores permitiu estabelecer padrões para os parâmetros funcionais da unidade avaliada. Para validar o modelo proposto, os autores utilizam dados de outras empresas.

Expandindo o conceito de planta industrial para um complexo de indústrias, Ahn e Han, (2018) desenvolvem um estudo baseado na metodologia do SCA de dois estágios, para modelagem da rede integrada de utilidades entre indústrias. O objetivo deste estudo foi a otimização simultânea da alocação ótima de vapor e mitigação da emissão de gases de efeito estufa durante período de incerteza de demanda. Como resultados, os autores mostram que os benefícios para a rede de distribuição de utilidades, nesse caso são mais efetivas para a alocação dos recursos do que para a mitigação da emissão de gases de efeito estufa.

Com relação aos estudos que utilizaram indicadores, Sahu e Sanjay (2018) utilizam indicadores termo-econômicos em uma unidade de geração termoelétrica para avaliar dois ciclos de operação diferentes para dois tipos de turbinas a gás: intercooler e simples. Para desenvolver o estudo, os autores desenvolvem um método analítico pela teoria do custo médio e mostram que o ciclo de turbinas intercooler requer 47,34% de combustível adicional para gerar energia elétrica em relação ao ciclo de turbina simples, porém produz 40% mais energia capacitada a realizar trabalho para a planta industrial.

O artigo apresentado por Wallerand; Kermani, *et al.* (2018) analisa uma superestrutura de bombas a vapor por meio de simulações computacionais, que decompõem a superestrutura como base para análise. Todas as características de bombeamento são inseridas no modelo computacional, por meio de dados técnicos e considerando todas as limitações da superestrutura. Como resultado tem-se diferentes cenários e configurações que permitem avaliar cada configuração simulada em função de parâmetros econômicos e termodinâmicos.

Mehr, Mosayebnezhad, *et al.* (2018) desenvolvem um modelo matemático que é usado para realizar simulações para avaliar a performance termodinâmica relacionada ao consumo de combustível, geração de energia elétrica e eficiência térmica. Os resultados deste estudo mostram que é possível aumentar em 17,2% a eficiência na planta industrial.

O objetivo do estudo desenvolvido por Grassian; Bahatem; Scott (2017) é desenvolver uma metodologia simples e eficiente para capturar, analisar e melhorar o uso intensivo de energia na indústria de óleo e gás. Neste estudo os autores avaliaram o consumo de energia em termos de indicadores termoeconômicos, termo físicos e econômicos. O método proposto pelos autores é baseado na decomposição e modelagem do sistema de utilidades, as variáveis referentes a energia para todas as utilidades, cálculo de todos os balanços energéticos do sistema. O resultado da modelagem indica as potenciais melhorias para o sistema de utilidades industriais. Apesar do método ser considerado pelos autores como simples, ele depende da medição de todas as variáveis e dados operacionais para o cálculo dos balanços energéticos.



### 3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Uma pesquisa é um conjunto de ações, propostas para encontrar a solução para um problema, que têm por base procedimentos racionais e sistemáticos. A pesquisa é realizada quando se tem um problema e não se têm informações para solucioná-lo (SILVA, 2005).

Classificada, do ponto de vista de sua natureza, como aplicada, pois o seu desenvolvimento e resultado geram conhecimentos para aplicações práticas e dirigida para a solução de um problema específico (SILVA, 2005). No que diz respeito a este aspecto específico, este estudo visa gerar um método para monitorar os indicadores para avaliar a eficiência energética em sistemas de utilidades industriais.

Por estar prioritariamente interessada em desenvolver uma estratégia e ações para aperfeiçoar os resultados já disponíveis na literatura sobre um problema específico, esta pesquisa é classificada quanto aos seus objetivos como normativa (BERTRAND e FRANSOO, 2002). Quanto à abordagem, esta pesquisa é classificada como quantitativa, pois busca traduzir em números as informações adquiridas pelo pesquisador, transformando informações em equações que geram dados para análise.

Além destas classificações, uma pesquisa deve ser classificada quanto ao seu método. Para Lakatos (2010) o método de pesquisa é o conjunto das atividades, também sistemáticas e racionais que, com maior segurança e economia, permite alcançar o objetivo de uma pesquisa. São conhecimentos válidos e verdadeiros que traçam o caminho a ser seguido para alcançar este objetivo, detectando erros e auxiliando as decisões do pesquisador (LAKATOS, 2010). Neste contexto, esta pesquisa é classificada como teórico/conceitual que, segundo Berto e Nakano (2000), resulta de discussões conceituais ou de revisões bibliográfica, sendo seu foco principal a modelagem conceitual baseada nas percepções e experiências do autor.

Sendo assim, o método desta pesquisa parte de uma revisão bibliográfica sobre os métodos previamente publicados na área de eficiência energética em sistemas de utilidades industriais, que fornecem informações a serem analisadas para a construção da proposta do método deste trabalho, que é entendido como a modelagem conceitual.

Para orientar o conjunto de atividades que compõem o método de pesquisa, a Figura 12 apresenta suas etapas que são detalhadas nesta seção.

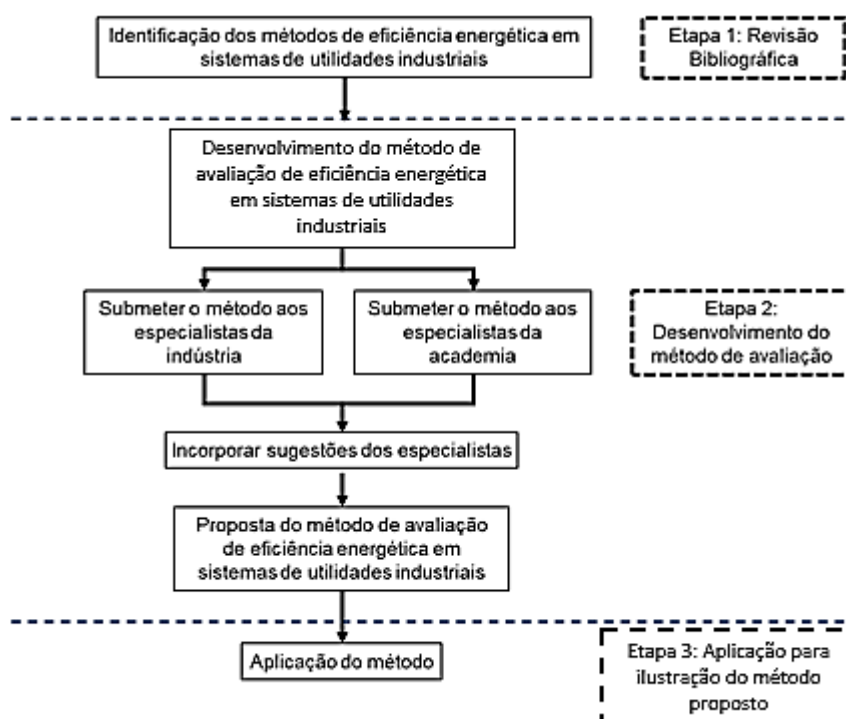


FIGURA 12: ETAPAS DO DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

A primeira etapa consiste da revisão bibliográfica para identificar e analisar os métodos de eficiência energética em sistemas de utilidades industriais. Os resultados desta etapa são importantes em dois aspectos, para sustentar a proposta do método de avaliação e para construir o referencial teórico apresentado no Capítulo 2.

A segunda etapa, desenvolvimento da pesquisa, está subdividida em 4 passos: (i) desenvolvimento da proposta inicial do método de avaliação de eficiência

energética em sistemas de utilidades industriais; (ii) no segundo passo, a proposta inicial do método será submetida para a análise de especialista com atuação prática em sistemas de utilidades e para acadêmicos que possuem pesquisas já desenvolvidas neste tema; (iii) neste passo, todas as sugestões e correções propostas pelos especialistas serão analisadas e, caso sejam pertinentes para o objetivo deste estudo, serão incorporadas ao modelo; (iv) finalmente neste último passo da etapa 2 tem-se o modelo de avaliação finalizado para ser aplicado em um sistema real

Na terceira etapa da Figura 12 tem-se a aplicação do método em um sistema de utilidades industriais real. Ainda nesta etapa devem ser descritos e discutidos todos os resultados da aplicação do método.

### **3.1. ETAPAS PARA O DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO**

Este tópico descreve como as etapas para o desenvolvimento do método de avaliação serão desenvolvidas.

#### **3.1.1. ETAPA 1: REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

O desenvolvimento do método de avaliação inicia-se com a uma proposta inicial baseada na revisão bibliográfica sobre os métodos de avaliação já propostos. Para identificar esses métodos na literatura foi realizada uma revisão sistemática da literatura. Esta revisão foi realizada nas bases de dados *web of Science*, *Scopus* e *Google Acadêmico*, por meio do Portal de Periódicos da CAPES. O resumo dos resultados obtidos nesta esta apresentado na Figura 13.

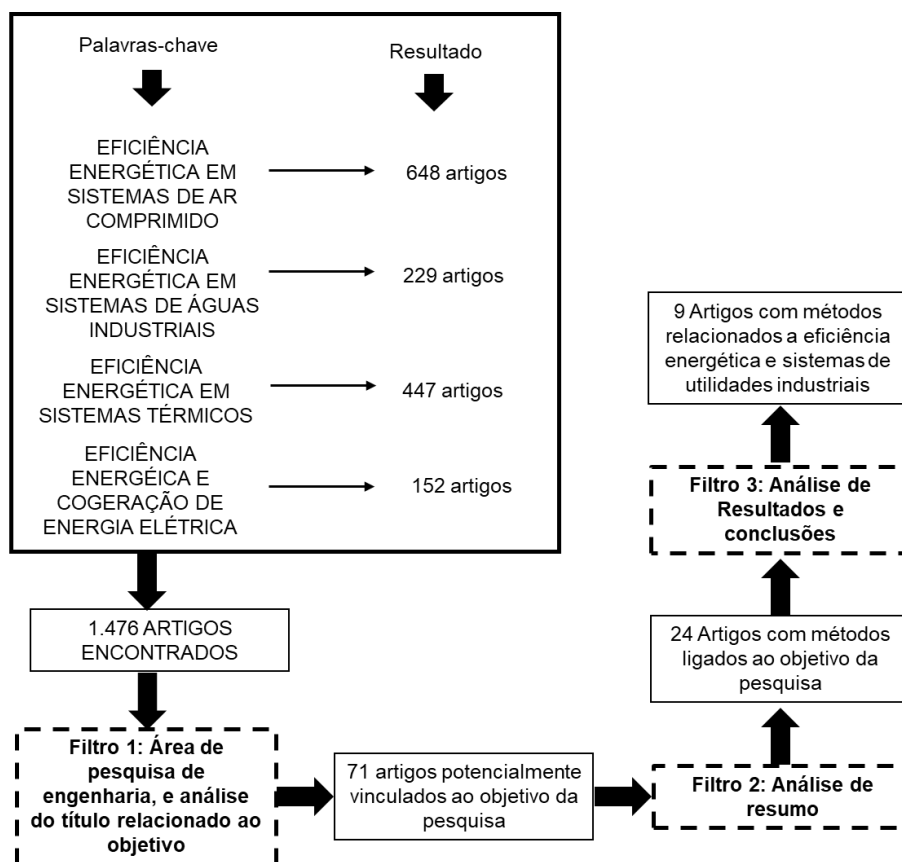


FIGURA 13: RESUMO DA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

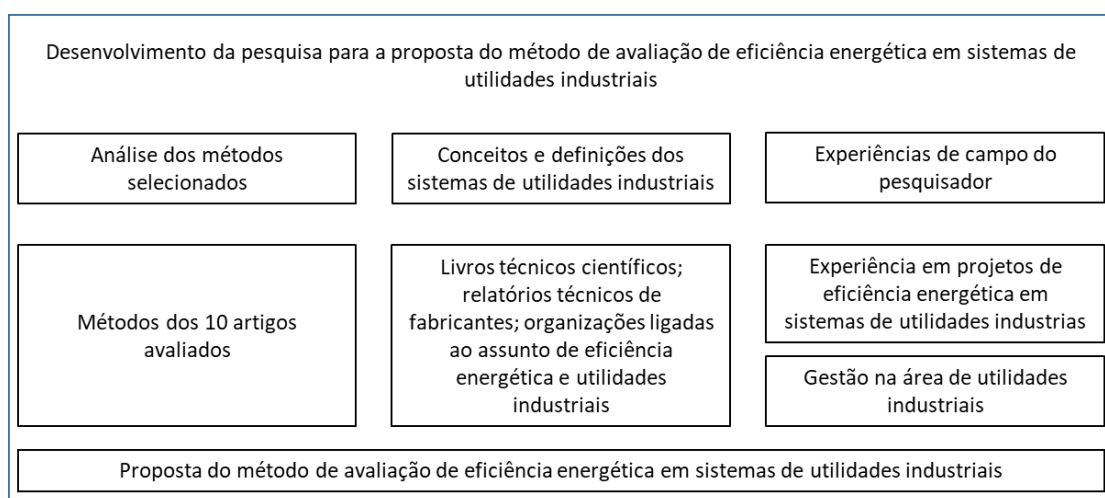
Conforme mostra a Figura 13, a revisão tem início com a definição das palavras-chave que fazem parte do tema deste trabalho. A pesquisa inicial resultou no total de 1476 artigos que relacionam eficiência energética, sistemas de ar comprimido, sistemas de águas industriais, sistemas térmicos e cogeração de energia elétrica. O primeiro filtro restringiu os artigos pela área de pesquisa em engenharia, foram identificados por meio da leitura de os títulos dos artigos identificados na primeira etapa, 71 artigos que potencialmente estão relacionados com o objetivo deste estudo.

O segundo filtro aplicado à pesquisa, consistiu da análise dos resumos dos 71 artigos resultantes do primeiro filtro, para identificar os métodos de avaliação de eficiência energética e com potencial para contribuir para o desenvolvimento do método de avaliação. Este segundo filtro resultou em 24 artigos, nos quais foi aplicado o terceiro e último filtro, com a análise dos resultados e as conclusões

destes 24 artigos. Este último filtro resultou em 10 artigos que apresentam métodos de avaliação de eficiência energética em sistemas de utilidades industriais, que estão apresentados no referencial teórico.

### 3.1.2. ETAPA 2: DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO

Os elementos considerados no desenvolvimento da proposta do método são apresentados na Figura 14.



**FIGURA 14: ELEMENTOS DO DESENVOLVIMENTO DA PROPOSTA DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE UTILIDADES INDUSTRIAIS**

A Figura 14 apresenta os elementos que formam a base para a proposta do método de avaliação, que consiste em agregar as informações sobre os métodos que já existentes em artigos recentes, os conceitos técnicos científicos, obtidos em livros e relatórios técnicos e a experiência prática do pesquisador, dada pela experiência em projetos de eficiência energética em sistemas de utilidades industriais.

Após desenvolvida a proposta do método, este é submetido à avaliação de 10 profissionais que possuam experiência prática ou no desenvolvimento de pesquisas relacionados com a eficiência energética em sistemas de utilidades industriais. Desses profissionais, 5 são doutores pesquisadores e/ou professores universitários com experiência de pesquisa de 8 a 30 anos na área de energia,

e 5 são gestores de sistemas de utilidades, com experiência profissional no cargo entre 4 e 15 anos, e que atuam em empresas do setor químico e sucro energético, situadas em diferentes regiões do Brasil, com objetivo de agregar ideias e sugestões distintas advindas de diferentes pontos de vistas desses profissionais, para enriquecer o modelo proposto e corrigir eventuais desvios. O material enviado para os profissionais se limita à proposta do método, antes da sua aplicação. O contato com estes profissionais ocorre via e-mail, telefone ou visitas que feitas pessoalmente pelo pesquisador aos profissionais.

As sugestões provenientes da avaliação dos profissionais serão avaliadas pelo pesquisador para verificar a pertinência ou a viabilidade de inclusão ao método de avaliação.

Essas sugestões são pertinentemente incorporadas ao método proposto, para preencher as lacunas do desenvolvimento da pesquisa. A Figura 14 mostra o caminho a ser percorrido no desenvolvimento da pesquisa (seção 4) para a proposta do método.

### **3.2. ETAPA 3: APLICAÇÃO DE ILUSTRAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO**

Esta etapa consiste em aplicar o método finalizado em um sistema de utilidades de uma planta industrial do setor sucroalcooleiro, de uma empresa nacional, com operações internacionais, de grande porte. O sistema de utilidades industriais da planta é composto pela geração de vapor, geração de energia elétrica, produção de ar comprimido e captação de água.

A capacidade instalada da geração de vapor é de 1090 toneladas de vapor hora, no qual o vapor é produzido a partir da queima da biomassa, em 5 caldeiras, com capacidades de 320 e 125 toneladas/hora de vapor. O sistema de vapor da planta industrial é dividido em vapor de alta pressão, 100 kgf/cm<sup>2</sup>, vapor de média pressão, 21 kgf/cm<sup>2</sup>, e vapor de baixa pressão, 1,5 kgf/cm<sup>2</sup>.

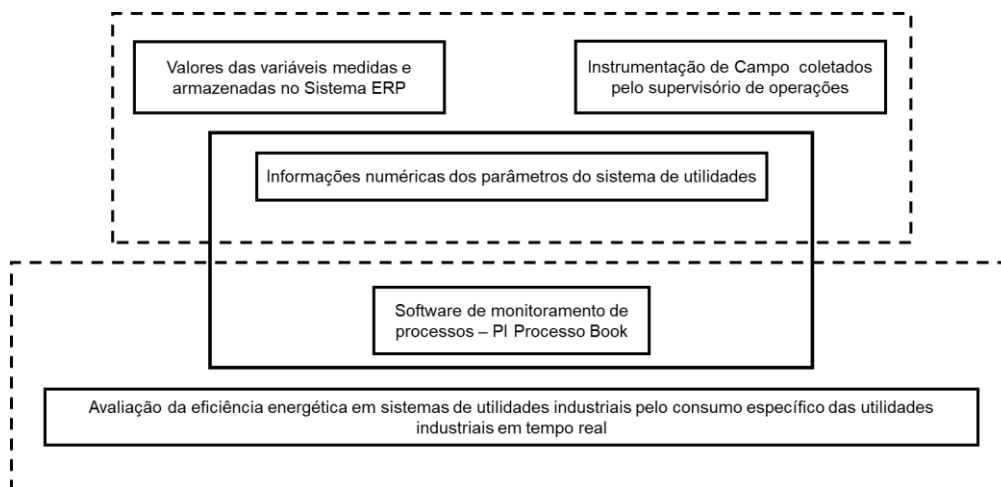
Duas caldeiras de alta pressão, e com capacidade de gerar 640 toneladas/hora de vapor, são exclusivas para a geração de energia elétrica, que move duas turbinas a vapor de contrapressão e duas turbinas de condensação, que acionam dois geradores de com capacidade de 33 MWh e outros dois com capacidade de 30 MWh, respectivamente. O vapor de média pressão é gerado em três caldeiras com capacidade de produção de 125 toneladas/hora de vapor, que é gerado para suprir a demanda dos acionamentos e processos a vapor.

A geração de energia elétrica da planta, é composta por uma unidade termoelétrica à biomassa, com capacidade de gerar 126 MWh de energia elétrica, na qual a demanda de energia é dividida em consumo interno da planta e exportação para o sistema elétrico interligado nacional.

A outorga de captação de água bruta da planta é de 1500 m<sup>3</sup>/h, sendo que a captação de água é composta por 3 bombas que são acionadas por motores de indução trifásico, com controle de velocidade. Essa água é bombeada para a indústria até a estação de tratamento de água e depois distribuída para os processos de fabricação, resfriamento, desmineralização, alimentação de caldeiras, limpeza, e uso geral.

A produção de ar comprimido é feita por 6 compressores de ar, divididos em duas centrais de ar, ambas com pressão de operação de 7 kgf/cm<sup>2</sup>. Esse ar comprimido é distribuído por toda a planta industrial, e utilizado para acionamentos pneumáticos de ferramentas e processos, e em instrumentos de medição.

A aplicação do método depende da medição de variáveis e de instrumentação de campo para gerar as informações numéricas que compõem os indicadores que serão monitorados, por meio de um software específico, conforme ilustra a Figura 15.



*FIGURA 15: APLICAÇÃO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO*



## 4. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO

O método de avaliação é desenvolvido a partir das etapas definidas na Figura 12, desde a concepção do modelo, a submissão aos especialistas e as respectivas contribuições, o modelo final e a aplicação do mesmo em um sistema de utilidades real de uma empresa do setor suco energético. O desenvolvimento aqui apresentado parte da concepção do modelo, pois os resultados da revisão de literatura já estão apresentados no referencial teórico do Capítulo 2.

### 4.1. SISTEMA DE UTILIDADES INDUSTRIAIS – PRODUÇÃO

O método está baseado na definição de sistemas de utilidades definido por Festel e Würmscher (2014), e composto pelos processos de geração de vapor, geração de energia elétrica, produção de ar comprimido e a captação de água, e ilustrado, na Figura 16.

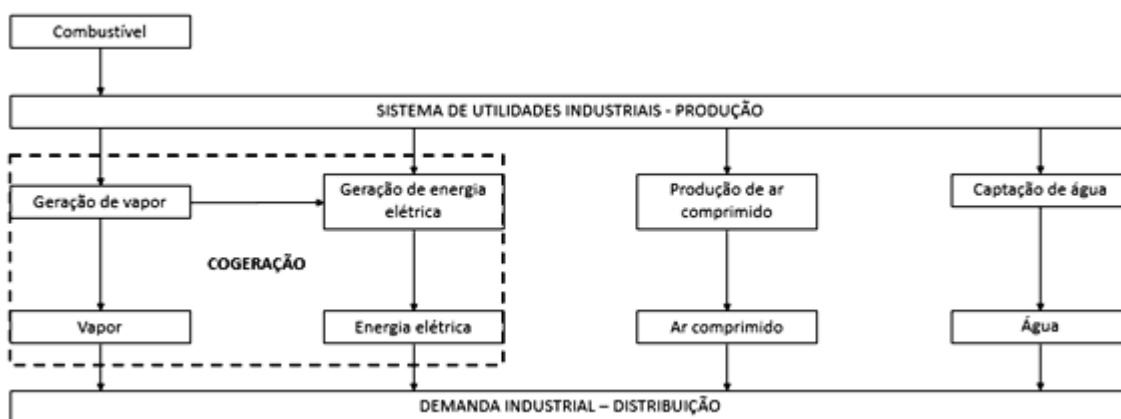


FIGURA 16: SISTEMA DE UTILIDADES INDUSTRIAIS

Pela Figura 16 observa-se que a primeira fonte de energia do sistema de utilidades é na forma de combustível, que alimenta a geração de vapor, onde é obtido o primeiro indicador de eficiência energética do processo, como desenvolvido no referencial teórico (2.1.1), e dado pela equação (1). Nesse aspecto, tem-se duas variáveis a serem medidas, que são, a alimentação de

combustível na caldeira (B) e a vazão do vapor produzido (D). Na geração de energia elétrica, tem-se mais duas variáveis a serem medidas, a eletricidade gerada e registrada pelo analisador de energia, e a vazão de vapor para processo, conforme ilustra a Figura 17.

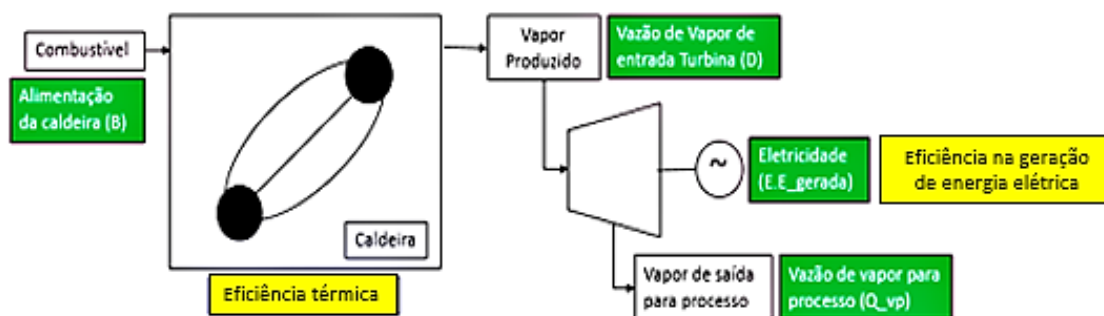


FIGURA 17: COGERAÇÃO DE ENERGIA: VARIÁVEIS DO PROCESSO E INDICADORES DE EFICIÊNCIA.

O sistema de medição de alimentação do combustível na caldeira depende do combustível utilizado, sendo inerente a cada processo de alimentação. A vazão de vapor de entrada na turbina (D) é o vapor produzido pela caldeira. A vazão de vapor para processo também é inerente a cada aplicação, sendo necessário definir os níveis de pressão requeridos pelo processo. A eletricidade é a energia elétrica medida na saída do gerador e registrada no analisador de energia, no painel de saída do gerador, sendo a eficiência na geração de energia dada pela Equação 14, para o caso de processos com somente uma máquina de geração de energia elétrica, ou a Equação 15 para o caso de processos de múltiplas máquinas

$$EF_{gee} = \frac{D}{E.E_{gerada}} \quad (14)$$

ou,

$$EF_{gee} = \sum \frac{D}{E.E_{gerada}} \quad (15)$$

No qual,

$EF_{gee}$  é a eficiência da geração de energia, medido em kW/kg;

$E.E_{gerada}$  a energia elétrica gerada na saída do gerador, medido em kWh;

$D$  é a vazão de vapor de saída da caldeira, e entrada da turbina, medido em kg/h.

Para a produção de ar comprimido vale a mesma relação do consumo específico entre a demanda de energia elétrica para o acionamento dos compressores de ar e a respectiva vazão de ar, dadas pelas Equações 16 e 17.

$$EF_{pac} = \frac{Q_{pac}}{E.E_{pac}} \quad (16)$$

ou,

$$EF_{pac} = \sum \frac{Q_{pac}}{E.E_{pac}} \quad (17)$$

Onde,

$EF_{pac}$  é a eficiência na produção de ar comprimido, medido em  $m^3/kw$ ;

$Q_{pac}$  a vazão de ar comprimido produzido pelo compressor, ou pelos compressores, medido em  $m^3/h$ ;

$E.E_{pac}$  energia elétrica no acionamento dos motores elétricos que acionam os compressores de ar, medido por um analisador de energia e registrado em kWh.

A Figura 18 apresenta a configuração da produção de ar comprimido, com a suas variáveis a serem medidas e o indicador de Eficiência.

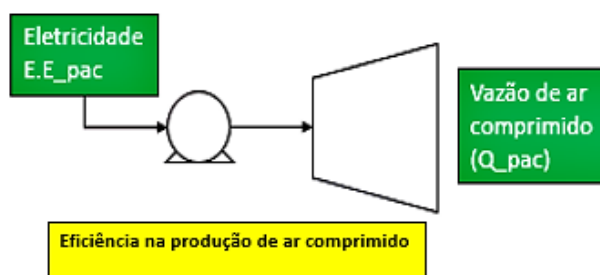


FIGURA 18: PRODUÇÃO DE AR COMPRIMIDO, VARIÁVEIS DO PROCESSO E INDICADOR DE EFICIÊNCIA

Dependendo da aplicação industrial, a produção de ar comprimido pode ser composta por mais de um compressor e, conseqüentemente, mais de um acionamento.

Para a captação de água, baseia-se no mesmo conceito do consumo específico, sendo a configuração do seu processo de captação dado pela Figura 19.

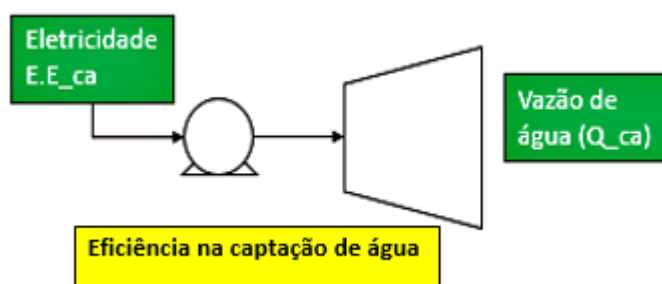


FIGURA 19: CAPTAÇÃO DE ÁGUA: VARIÁVEIS DE PROCESSO E INDICADOR DE EFICIÊNCIA

A eletricidade no acionamento das bombas de captação de água pode ser composta por uma única variável ou múltiplas, no caso de bombas operando em paralelo. Já para a vazão de água de saída, é possível medir a vazão na descarga da bomba ou em coletores de água, e a eficiência na captação de água é dada pela Equações 18 e 19.

$$EF_{ca} = \frac{Q_{ca}}{E.E_{ca}} \quad (18)$$

ou,

$$EF_{ca} = \sum \frac{Q_{ca}}{E.E_{ca}} \quad (19)$$

No qual,

$EF_{ca}$  é a eficiência na captação de água, medido em  $m^3/kw$ ;

$Q_{ca}$  a vazão de água para os processos de produção em  $m^3/h$ ;

$E.E_{ca}$  energia elétrica no acionamento dos motores elétricos que acionam as bombas de captação, medido por um analisador de energia e registrado em kWh.

## 4.2. DEMANDA INDUSTRIAL – DISTRIBUIÇÃO DE INSUMOS DE UTILIDADES

Uma vez determinados os indicadores de eficiência na produção de utilidades é necessário estabelecer as variáveis dos processos de distribuição, que devem ser medidas para compor os indicadores de monitoramento da eficiência na rede de distribuição do sistema de utilidades.

### 4.2.1. REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR

A rede de distribuição de vapor, é ilustrada pela Figura 20.

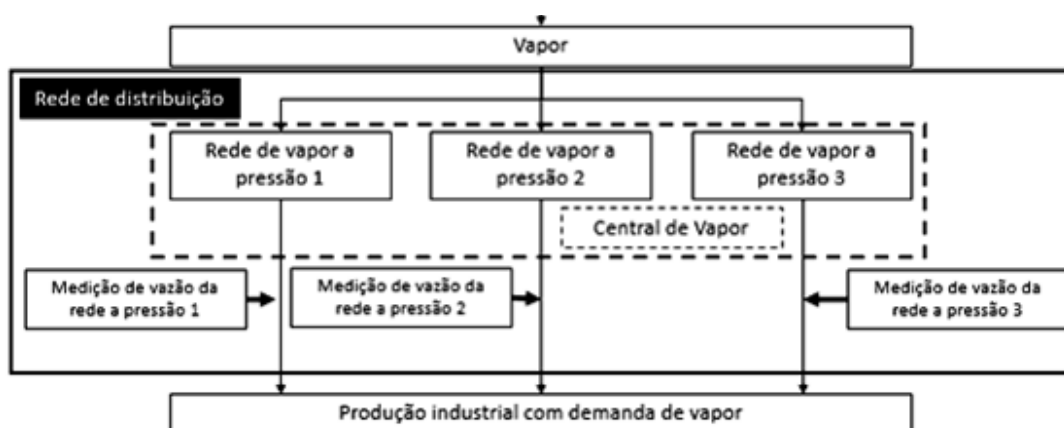


FIGURA 20: REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR

Conforme ilustra a Figura 20, a rede de distribuição de vapor inicia com o vapor gerado. Mesmo após a geração de eletricidade, ele é direcionado para uma central de vapor com diferentes níveis de pressão. Nesta central, a produção de vapor para cada um desses níveis de pressão é medida. Em seguida, o vapor segue para a rede de distribuição da unidade industrial para alimentar os processos de produção. Nesse ponto, novamente o consumo de vapor nos processos é medido. Da medição destas variáveis, pode-se analisar a eficiência industrial no consumo de vapor, para cada nível de pressão de operação por meio da Equação 20.

$$n_{IV(np_x)} = \frac{\sum \text{vazão de entrada de vapor nos processos industriais}}{\text{Total de vapor produzido}} \quad (20)$$

No qual

$n_{IV}$  é a eficiência energética industrial da rede de distribuição de vapor, adimensional;

$x$  é o índice que indica o nível de pressão de vapor na operação;

a vazão de entrada de vapor nos processos industriais é o somatório da vazão de entrada de vapor nos processos industriais em cada nível de pressão, medido em kg/h;

o total de vapor produzido é a vazão de saída do coletor em cada nível de pressão de operação, medidos em kg/h.

#### **4.2.2. REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

A eficiência na distribuição de energia elétrica considera a geração de energia elétrica, o consumo de energia elétrica do sistema de utilidades e o consumo industrial de energia elétrica. Visto que o sistema de utilidades também demanda energia para sua operação, seu fornecimento é dividido em energia para a indústria e para utilidades, sendo a sua performance quantificada esparsamente.

Pela Figura 21, observa-se os cubículos elétricos, que são os pontos nos quais a rede de distribuição entrega eletricidade para acionar os equipamentos de cada área. Esse é o ponto em que os analisadores de energia são instalados, exceto para o cubículo onde a energia elétrica gerada, pois este é ponto de entrada para a rede elétrica de distribuição.

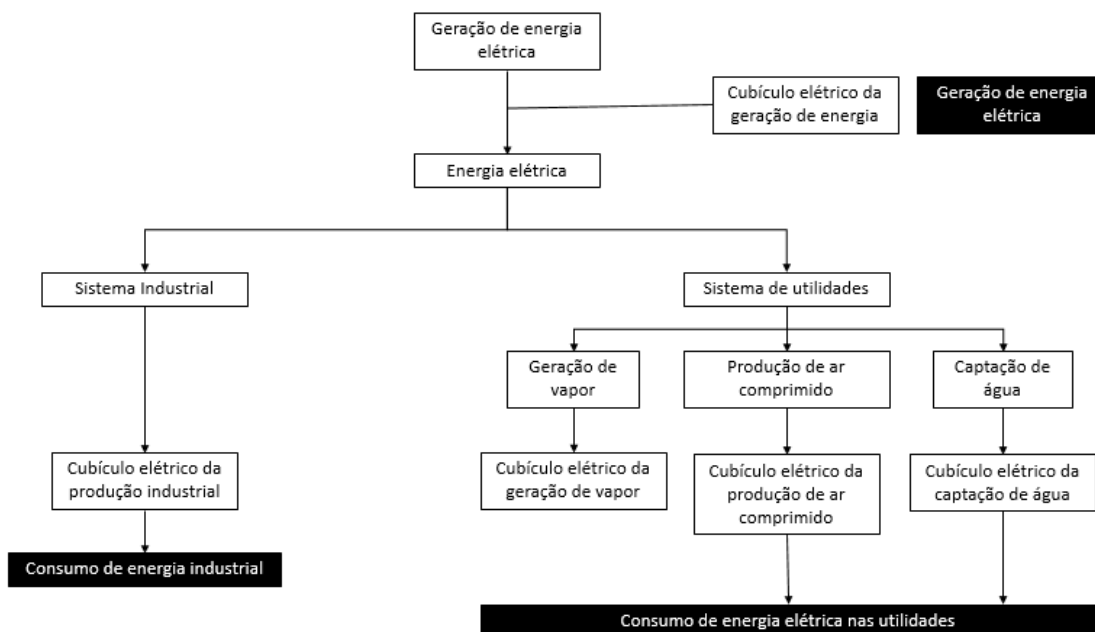


FIGURA 21: REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ELETRICIDADE

Assim, para a eficiência energética relacionada a utilização de energia elétrica, tem-se dois casos a serem avaliados. O primeiro é a eficiência energética na produção das utilidades dada pela Equação (21).

$$n_{PUTL} = \frac{\sum \text{consumo de energia elétrica nas utilidades}}{\text{Total de energia elétrica gerada}} \quad (21)$$

O consumo de energia elétrica nas utilidades, dados pelo consumo na geração de vapor, produção de ar comprimido e captação de água, medidos em kWh. O total de energia gerada corresponde a energia elétrica gerada e disponível para consumo interno da unidade, medido em kWh. O segundo caso é dado pelo indicador de performance de energia elétrica industrial, pela Equação 22.

$$n_{IEE} = \frac{\sum \text{consumo de energia elétrica industrial}}{\text{Total de energia elétrica gerada}} \quad (22)$$

O consumo de energia elétrica industrial é a demanda dos processos industriais, e o total de energia elétrica gerada, de acordo com a Equação (22), ambos medidos em kWh.

### 4.2.3. REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO

Para avaliar a performance na rede de distribuição de ar comprimido do sistema de utilidades, as variáveis medidas na produção devem ser obtidas, juntamente com o consumo de ar comprimido industrial para compor o indicador de eficiência da rede de distribuição de ar comprimido, que é medido conforme a Figura 22.

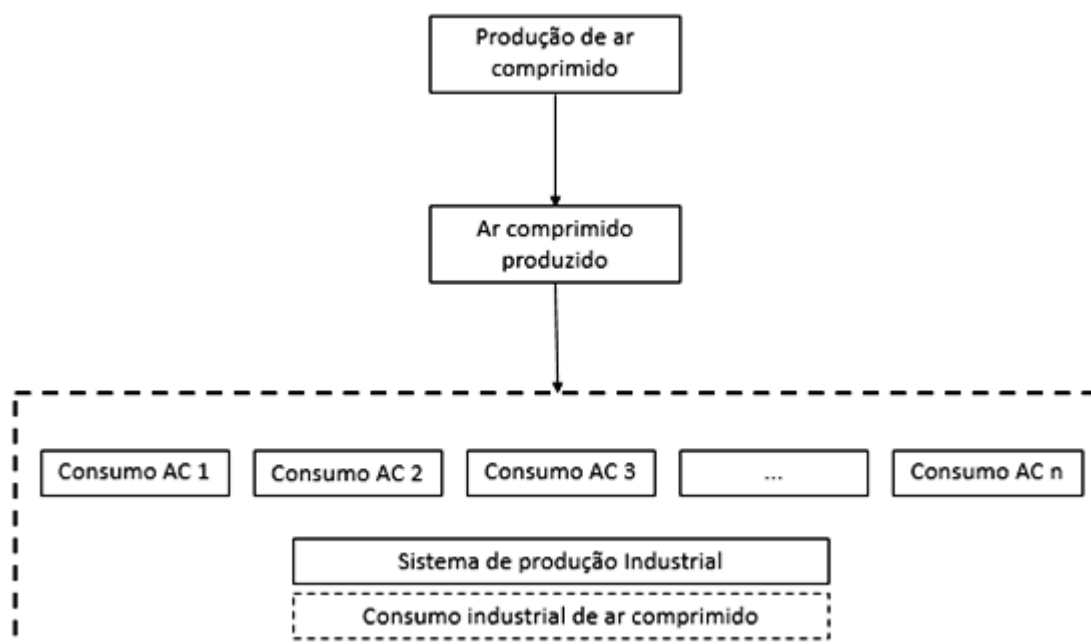


FIGURA 22: REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE AR COMPRIMIDO

As unidades de consumo AC 1 até AC n são os processos de produção do sistema industrial que consomem ar comprimido, sendo o indicador de performance da rede de distribuição do sistema de ar comprimido dado pela Equação 23.

$$n_{IAC} = \frac{\sum_1^n \text{Consumo AC}}{\text{Produção de ar comprimido}} \quad (23)$$

Em que

$n_{IAC}$  o indicador de performance industrial de ar comprimido, adimensional;

O somatório do consumo AC medido em m<sup>3</sup>/h, medido na entrada dos processos;

a produção de ar comprimido a produção total de ar, medido em m<sup>3</sup>/h.



#### 4.2.4. REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

Para a rede de distribuição de água, onde podem haver perdas por vazamentos ou desvios de água ao longo do processo de distribuição, tem-se que é importante medir a performance da rede entre a captação e as unidades de consumo, como na Figura 23.

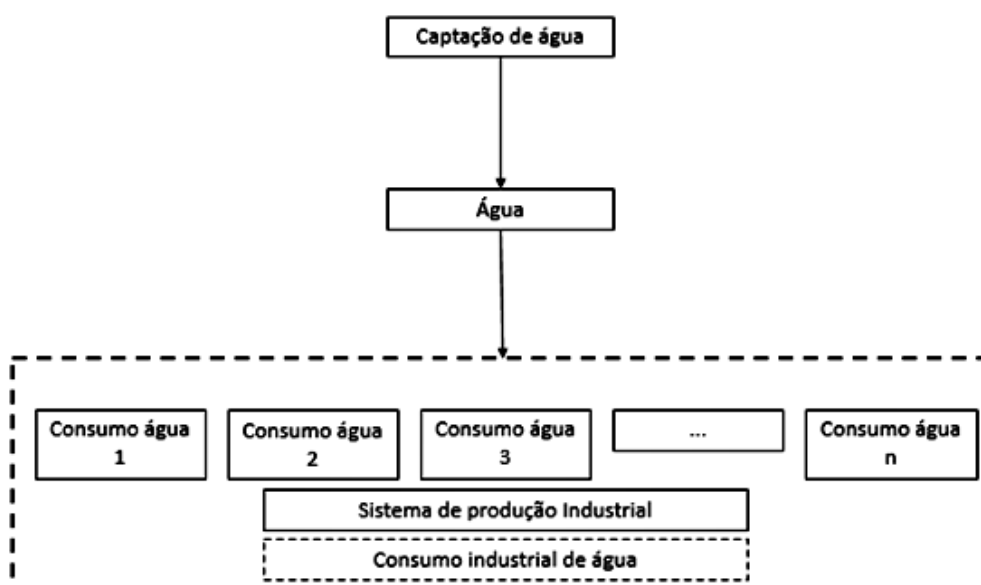


FIGURA 23: REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

No processo de captação de água, o volume captado é medido, sendo que a demanda deste insumo é considerada a entrada dos processos de produção do sistema industrial. O indicador de performance da rede de distribuição é dado pela Equação 24.

$$n_{IDA} = \frac{\sum_1^n \text{Consumo água}}{\text{Captação de água}} \quad (24)$$

Em que

$n_{IDA}$  é o indicador de performance industrial da distribuição de água, adimensional;

O somatório do consumo água medido em  $m^3/h$ , medido na entrada dos processos de produção;

A captação de água medido em  $m^3/h$ .

### 4.3. COLETA DE DADOS DO SISTEMA DE UTILIDADES

Nos tópicos 4.1 e 4.2 foram estabelecidas as variáveis do sistema de utilidades a serem medidas para compor os indicadores de eficiência energética dos processos de produção e da rede de distribuição do sistema. O Quadro 2 faz a síntese de cada indicador proposto para o monitoramento da eficiência e as respectivas variáveis do processo.

QUADRO 2 VARIÁVEIS MEDIDAS E INDICADORES DO SISTEMA DE UTILIDADES

INDICADOR	EQUAÇÃO	VARIÁVEIS MEDIDAS	VARIÁVEIS CALCULADAS
Eficiência térmica	$\frac{PCI \times Eficiência}{h_v - temp. ag. al.}$	Temp.ag.al.	PCI; Eficiência; hv
Eficiência na geração de energia elétrica (EF <sub>gee</sub> )	$\sum \frac{D}{E \cdot E_{gerada}}$	D; E.E <sub>gerada</sub>	n/a
Eficiência energética na produção de ar comprimido (EF <sub>PAC</sub> )	$\sum \frac{Q_{pac}}{E \cdot E_{pac}}$	Q <sub>PAC</sub> ; E.E <sub>PAC</sub>	n/a
Eficiência energética na captação de água (EF <sub>CA</sub> )	$\sum \frac{Q_{ca}}{E \cdot E_{ca}}$	Q <sub>CA</sub> ; E.E <sub>CA</sub>	n/a
Eficiência da rede de vapor	$n_{IV(npx)}$	Vazão de vapor	n/a
Eficiência da rede de energia elétrica de utilidades	$n_{PUTL}$	Energia elétrica	n/a
Eficiência da rede de energia elétrica	$n_{IEE}$	Energia elétrica	n/a
Eficiência da rede de ar comprimido	$n_{IAC}$	Vazão de ar	n/a
Eficiência da rede de água	$n_{IDA}$	Volume de água	n/a

Os dados coletados são armazenados no PI *ProcessBook*, um software de monitoramento e armazenamento de dados de processos. A proposta do método de avaliação está baseada nas variáveis e indicadores até aqui apresentados.

### 4.4. SUGESTÕES DOS ESPECIALISTAS DA ACADEMIA E INDÚSTRIA SOBRE O MÉTODO PROPOSTO

Dos dez profissionais que receberam o método para avaliação, seis retornaram as informações em tempo hábil para a finalização deste estudo. Dos seis

retornos, apenas quatro contribuíram com sugestões que foram consideradas para a melhoria do método proposto.

Um dos profissionais da indústria sugere que as medições de energia elétrica nos processos de utilidades industriais pode ser de difícil medição, em função do alto custo aplicado aos medidores de energia. No entanto, ele ressalta a possibilidade de medir a subestação de potência à qual os equipamentos estão ligados, ao invés de medir o cubículo de energia dos equipamentos. Os valores obtidos pela sugestão deste profissional apresentam uma aproximação razoável para o consumo de energia elétrica, dependendo das cargas que estão conectadas a essa subestação.

A sugestão do segundo profissional da indústria identificou que os sistemas de utilidades industriais são pouco desenvolvidos em instrumentos de medição de ar comprimido, sendo que nas diversas aplicações dos processos industriais não medem a produção nem distribuição dessa utilidade. Como sugestão, este profissional sugere que para efeito de estimativa da eficiência energética na demanda dos processos, seja realizado o teste de planta parada, em que os compressores de ar são ligados um a um, e à corrente elétrica do motor de acionamento é analisada frente a corrente desses compressores operando em regime normal da planta industrial. A diferença na demanda de potência entre as duas medições pode ser aproximada para o consumo específico.

Nota-se que as contribuições dos profissionais da indústria estão relacionadas com questões práticas, em especial na medição das variáveis que compõem os indicadores. As justificativas desses profissionais são pautadas nos altos custos para esta coleta e, conseqüentemente na falta de equipamentos adequados para esta coleta. Desta forma, nota-se que estas contribuições corroboram para a justificativa prática deste estudo que está baseada na dificuldade para medir números elevados de variáveis, seja pelos custos ou pela alta quantidade delas.

Sobre as contribuições dos profissionais da academia referem-se à importância da aplicação do método proposto em um sistema de utilidades real, além da

exemplificação da parte do método em que é inserida a ferramenta computacional para monitoramento dos indicadores.

#### **4.5. MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE UTILIDADES INDUSTRIAIS**

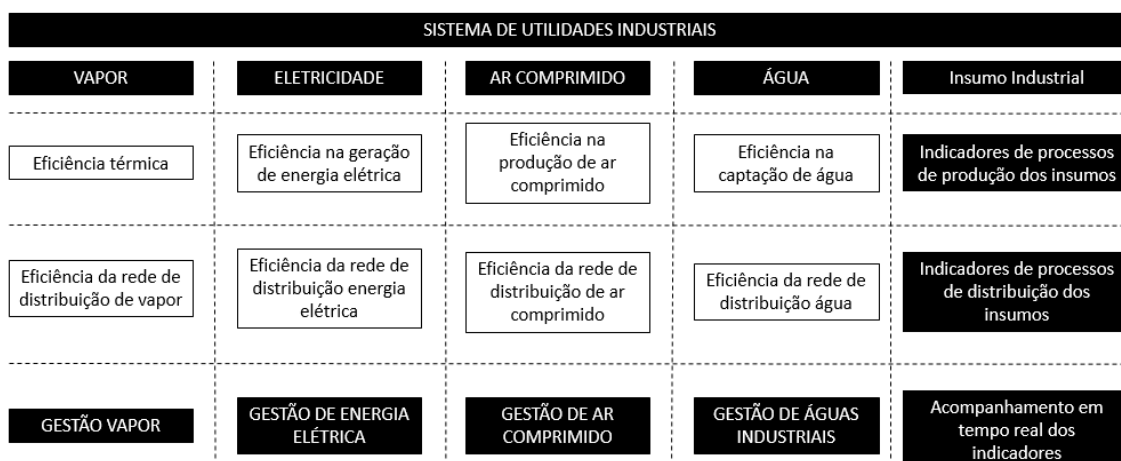
O objetivo deste estudo é desenvolver de um método proposto para avaliar a eficiência energética dos processos de produção e distribuição dos insumos do sistema de utilidades industriais. Para operacionalizar e realizar a gestão de desempenho dos indicadores este método utilizou-se uma ferramenta de monitoramento em tempo real. Vale a pena destacar que os objetivos relacionados ao desempenho dos indicadores envolvem as metas de eficiência energética estabelecidas para cada companhia em que o método, eventualmente seja aplicado.

Ainda que as companhias busquem classes mundiais de eficiência energética em seus processos e na implementação de sistemas de gestão, como os propostos pela ISO 50001, Esses objetivos não tendem a ser absolutos, mas sim, um desempenho monitorado pela variação dentro de limites superiores e inferiores de variação do processo, e que compõe os objetivos da companhia em questão.

Uma maneira comum de estabelecer os limites de variação para esses indicadores de desempenho é pela análise do histograma de operação, que permite entender o comportamento de variação dos processos ao longo de um determinado período, defini-lo como base para comparativos futuros do desempenho das operações atuais, e objetivos de eficiência a serem atingidos.

A análise dos sistemas de medição (MSA), a calibração e certificação de todos os instrumentos de medição é condição essencial para a definição dessa base para comparativos, bem como para o monitoramento em tempo real da variação temporal desses indicadores.

Dessa maneira a Figura 24 sistematiza a proposta do método de avaliação de eficiência energética em sistemas de utilidades industriais. Observa-se no método a importância do monitoramento para o gerenciamento de todos os indicadores dos insumos de utilidades do sistema de produção, por meio do seu acompanhamento em tempo real. No entanto, a proposta deste método consiste apenas em estabelecer os indicadores de performance do processo de produção e/ou distribuição dos insumos industriais, para deles, derivarem ações como estimar ou projetar os custos com infraestrutura, sistemas operacionais e de coleta de dados e softwares de armazenamento de dados de processo para a implantação do monitoramento futuro de todos os indicadores que compõe o sistema de utilidades.



**FIGURA 24: PROPOSTA DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE UTILIDADES INDUSTRIAIS**

A Figura 24 mostra o sistema de utilidades industriais, sendo a primeira linha composta por vapor, eletricidade, ar comprimido e água, que são os insumos industriais desse sistema. Na segunda linha tem-se os indicadores de processo de produção desses insumos, composto pela eficiência térmica, eficiência na geração de energia elétrica, eficiência na produção de ar comprimido, e eficiência na captação de água. A terceira linha é composta pelos indicadores dos processos de distribuição dos insumos, composto por eficiência energética das redes de distribuição de vapor, energia elétrica, ar comprimido e água.

A última linha da Figura 24 mostra que o acompanhamento em tempo real dos indicadores de eficiência dos processos de produção e das redes de distribuição dos insumos industriais proporciona a gestão de desempenho desses insumos, e quando realizado o acompanhamento em tempo real de todos esses indicadores, tem-se a gestão do sistema de utilidades.

A Figura 24, que sistematiza o método proposto, é também dividida em colunas, com os indicadores de desempenho de cada insumo energético até o nível de gestão. Isso é feito para que seja possível decompor a gestão do sistema de utilidades para cada insumo industrial, e assim gerenciá-los individualmente, caso não haja recursos disponíveis para o monitoramento do sistema em sua totalidade.

#### **4.6. APLICAÇÃO DE ILUSTRAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO**

Como ilustração do método proposto, este é aplicado em um sistema de utilidades real de uma empresa do setor sucroenergético. Os resultados desta aplicação são a construção de um indicador de monitoramento de desempenho para o sistema real da empresa, um indicador de eficiência na geração de energia elétrica. Para isso, o sistema e as respectivas variáveis são descritos, além dos indicadores que foram definidos e posteriormente obtidos por meio de um *software* para monitoramento em tempo real.

##### **4.6.1. EFICIÊNCIA TÉRMICA**

Para determinar a eficiência térmica da queima do combustível no gerador de vapor, temos a equação de eficiência térmica, conforme Quadro 2. Para esse cálculo, tem-se que a eficiência do gerador de vapor é fornecida pelo fabricante na concepção do projeto, no entanto, para confrontar esses valores de projeto, foi realizado um estudo de avaliação de perdas térmicas na caldeira, e o

resultado de eficiência do gerador de vapor, para cargas acima de 75% da carga nominal é como na Tabela 3.

TABELA 3: EFICIÊNCIA DO GERADOR DE VAPOR

Caldeira	Eficiência
Cald_1	81,39%
Cald_2	82,76%
Cald_3	83,93%
Cald_4	86,38%
Cald_5	86,83%

A Tabela 3, mostra que a eficiência dos geradores de vapor que compõem o sistema de utilidades é muito próxima para as caldeiras 1, 2 e 3, que produzem vapor a 21 kgf/cm<sup>2</sup>, e semelhantes para as caldeiras 4 e 5 que produzem vapor a 100 kgf/cm<sup>2</sup>.

A entalpia do vapor superaquecido, conforme tabela, é de 710 kcal/kg para as caldeiras que produzem vapor a 21 kgf/cm<sup>2</sup>, e 824 kcal/kg para as caldeiras que produzem vapor a 100 kgf/cm<sup>2</sup>.

Para obter o PCI do bagaço, tem-se que a umidade do bagaço é obtida a um intervalo de 3 horas em análises de laboratório, bem como o POL do bagaço, ambos atualizados no software de monitoramento nesse mesmo período, e monitorado conforme Figura 25.

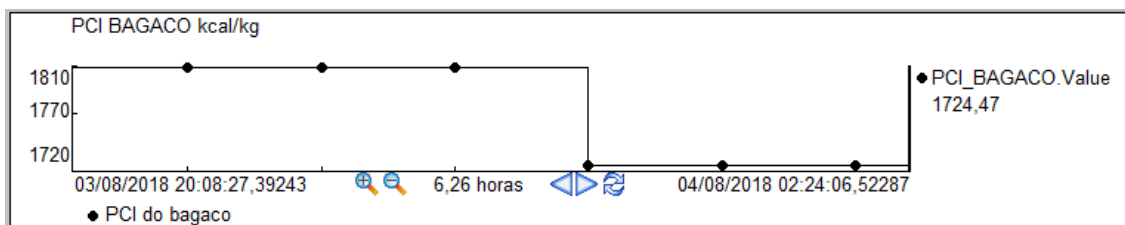
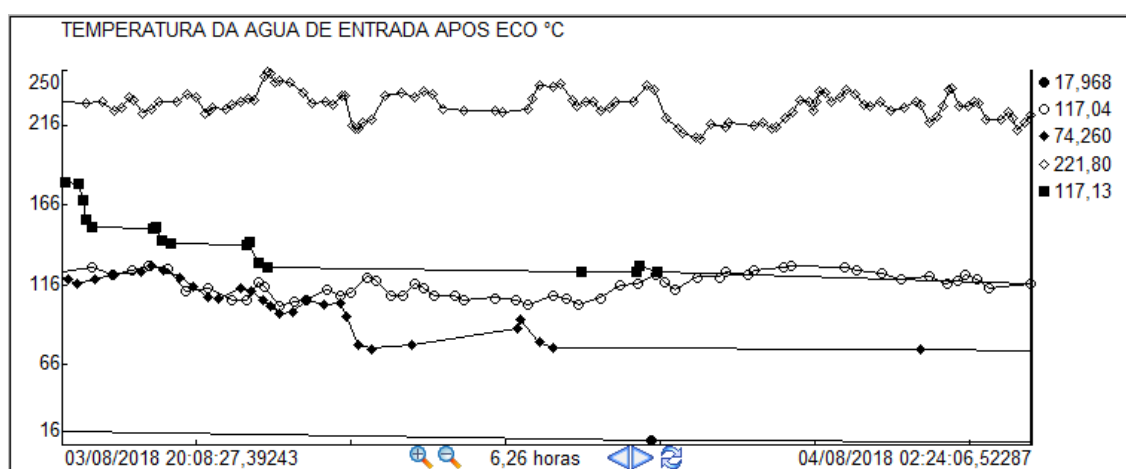


FIGURA 25: MONITORAMENTO DO PCI DO BAGAÇO DE QUEIMA NAS CALDEIRAS.

As variáveis que influenciam na variação do PCI do bagaço são umidade do bagaço gerado nas moendas, que é composto pela média das umidades obtidas

nas últimas três horas, e o POL do bagaço, que é o teor de açúcares na matéria, também obtido pela média das análises referentes às últimas três horas.

Para a temperatura de água de alimentação, está é medida na entrada da caldeira, após o economizador de água, que faz troca térmica com os gases residuais da queima do combustível, que aumenta a temperatura da água a realizar troca térmica pelas paredes d'água da fornalha da caldeira, e monitorada conforme Figura 26.



**FIGURA 26:** MONITORAMENTO DA TEMPERATURA DE ÁGUA DE ALIMENTAÇÃO DAS CALDEIRAS.

Na Figura 26, os valores de temperatura da água de alimentação são descritos, na sequência, para as caldeiras 1, 2, 3, 4 e 5. É possível observar a diferença de temperatura na água de alimentação após o economizador de água. Isso é, de fato, em função da eficiência de troca térmica do equipamento, para a caldeira 1 observa-se que o economizador não está em operação, gerando, assim, queda no rendimento térmico, e aumento no consumo de bagaço para a geração de vapor, como observado na Figura 27.



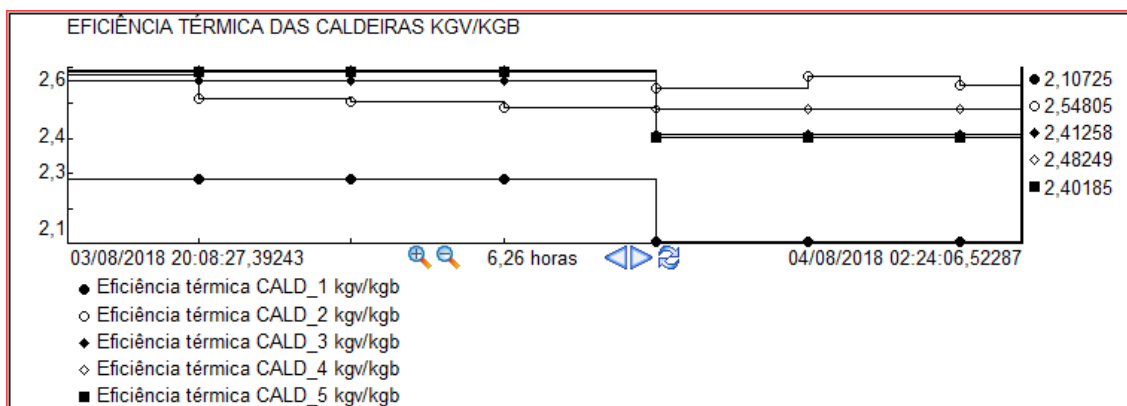


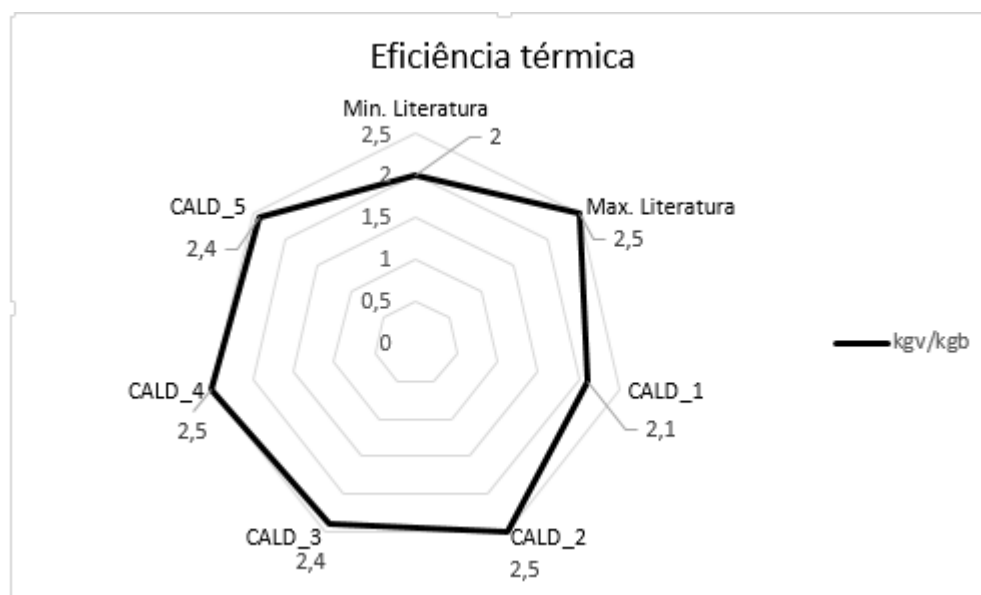
FIGURA 27: MONITORAMENTO DA EFICIÊNCIA TÉRMICA DAS CALDEIRAS 1, 2, 3, 4 E 5

Como previsto pelo monitoramento da temperatura de água de alimentação das caldeiras, a eficiência térmica para a caldeira 1, de 2,10725 kgv/kgb, está abaixo das demais. Isso é devido à deficiência no economizador de água por troca térmica com os gases da queima do combustível.

Esse último gráfico é o utilizado para o monitoramento de eficiência térmica dos geradores de vapor, e permite avaliar o desempenho da eficiência da queima do combustível em cada caldeira.

Ainda que haja diferença de eficiência térmica entre as caldeiras, os 5 geradores de vapor encontram-se dentro do limite aceitável de eficiência térmica para geradores de vapor, entre 2,0 e 2,5 kgv/kgb, sendo o último intervalo o mais eficiente.

O gráfico de radar da Figura 28 mostra o comparativo da eficiência térmica proposta pela literatura e as eficiências das caldeiras em operação.



**FIGURA 28: EFICIÊNCIA TÉRMICA DAS CALDEIRAS**

O Gráfico evidencia que a eficiência térmica das caldeiras, medidas em função da geração de vapor a partir da queima do combustível, bagaço, está dentro dos limites estabelecidos como eficientes pela literatura, em que as caldeiras CALD\_2 e CALD\_4 atingem os valores de máxima eficiência, enquanto a caldeira CALD\_1 está bem próxima do limite mínimo.

#### **4.6.2. EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Para determinar a eficiência energética na geração de energia, é utilizado a vazão de vapor das caldeiras 4 e 5, pois são as caldeiras que alimentam as turbinas de cogeração de energia, como na Figura 29.

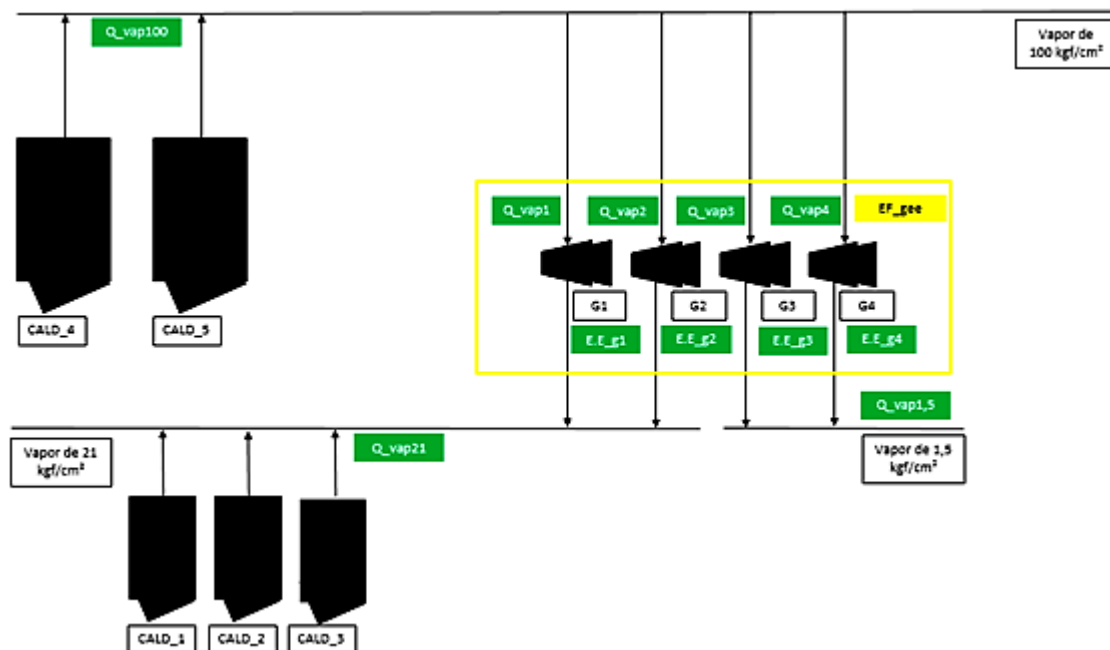


FIGURA 29: PROCESSO DE COGERAÇÃO DE ENERGIA: VAPOR E ELETRICIDADE

A Figura 29 mostra o processo de cogeração de energia do sistema de utilidades analisado, no qual é possível obter a eficiência energética para cada turbina de geração de energia elétrica pela relação de vapor de entrada das máquinas e saída de energia elétrica dos geradores. Para esse monitoramento, os valores descritos na tela criada na plataforma do *PI Process Book*, como na Figura 30.

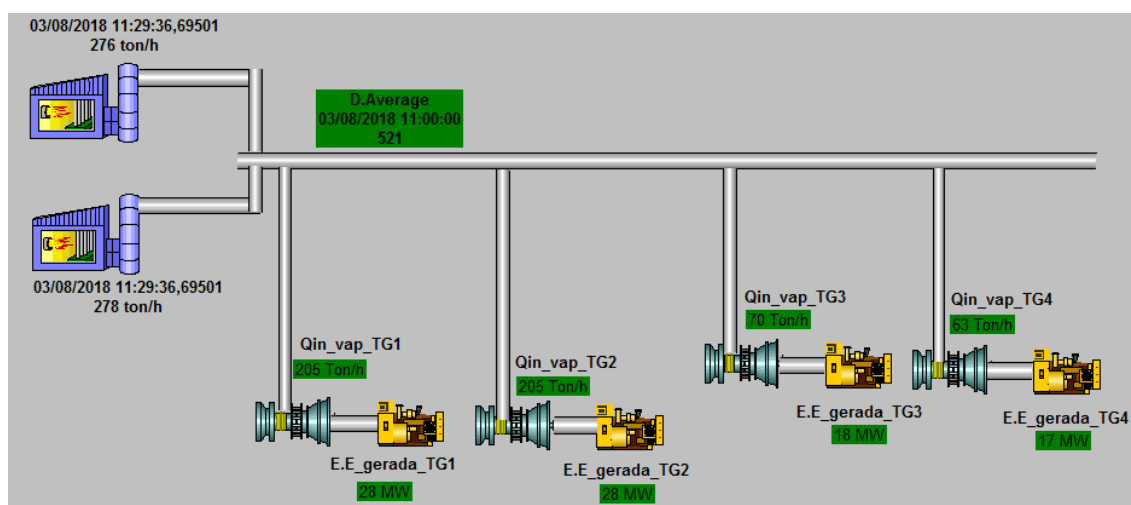
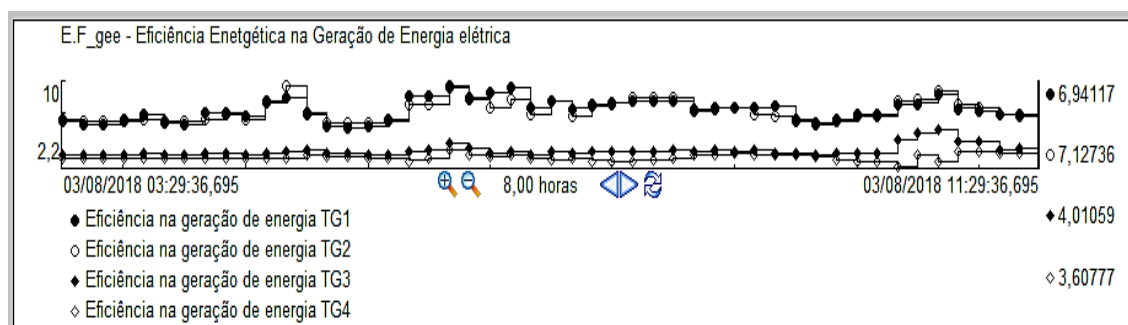


FIGURA 30: MONITORAMENTO DOS PARÂMETROS DE COGERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Pela Figura 30, tem-se que o vapor gerado pelas caldeiras 4 e 5, representado por (D) na Figura, é uma soma da geração de vapor das caldeiras, e a medição do vapor de entrada em cada turbina é estratificada para que possa ser obtida a eficiência para cada máquina, individualmente, o mesmo é feito para a geração de potência elétrica, medida nos bornes de saída dos geradores 1, 2,3 e 4, e por conveniência de escala medidos em MW.

Para o monitoramento da eficiência energética na produção de energia elétrica, tem-se a variação temporal do consumo de vapor para a geração de potência, como na Figura 31.



*FIGURA 31: MONITORAMENTO DA EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA*

A Figura 31 mostra a eficiência na geração de energia elétrica pelo consumo de vapor das máquinas pela respectiva geração de potência. Assim, quanto menor for o indicador, mais eficiente está operando o conjunto turbogerador. A exemplo do turbogerador TG2, tem-se que são necessárias 7,12736 toneladas de vapor para produzir 1 MW de energia elétrica, por outro lado o TG4 demanda 3,60777 toneladas de vapor para a produção de 1MW de energia. Considerando ambos cenários, tem-se que o TG4 é 50% mais eficiente que o TG2.

No entanto, a construção para fins de comparação de eficiência, deve ser feita entre máquinas de características construtivas iguais. Sendo assim, o TG1 e TG 2 podem ser comparados entre eles, pois são máquinas de contrapressão, e os TG2 e TG3 são máquinas de condensação. Portanto, o TG1 é 2,61% mais eficiente que o TG2, e o TG4 é 10,04% mais eficiente que o TG3.

Além disso, Rodrigues (2005), define que o consumo específico de uma unidade de geração de energia elétrica eficiente é de 3,2 kgv/kWh para turbo geradores de condensação, e os TG3 e TG4 estão com consumo específico acima, em 4,0 e 3,6, respectivamente. Para os processos que envolvem máquinas de contrapressão/extração, esse valor deve ser de 5,2 kgv/kWh, e as máquinas TG1 e TG2, estão em 6,9 e 7,1 kgv/kWh, indicando que o processo de geração de energia elétrica está operando de maneira ineficiente.

O gráfico de radar da Figura 32 mostra o resumo da eficiência proposta pela literatura par as máquinas de contrapressão e condensação, em comparativo com as condições de eficiência dos turbogeradores em operação.

#### Eficiência na geração de energia elétrica

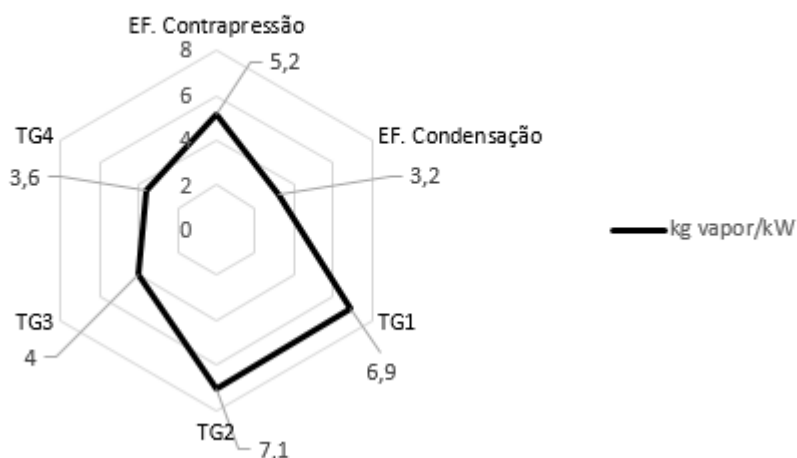


FIGURA 32: EFICIÊNCIA NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

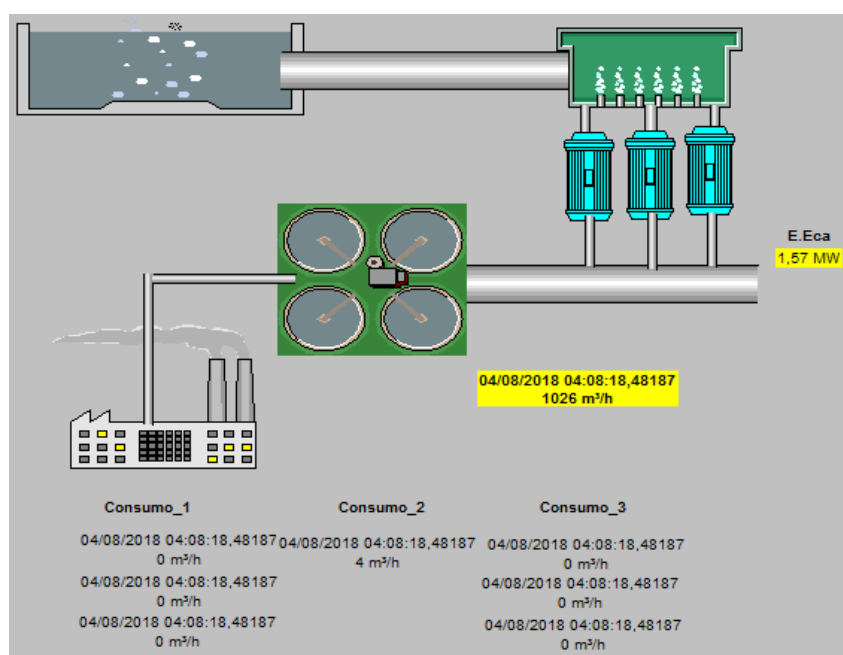
O gráfico evidencia, em referência com a literatura, que os turbogeradores de condensação consomem mais vapor que o necessário para a produção de energia elétrica, 0,4 kg de vapor a mais para o TG4, e 0,8 kg de vapor a mais para o TG3.

#### 4.6.3. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA CAPTAÇÃO DE ÁGUA

Para a captação de água, o processo que é composto por três bombas de captação de água bruta de um reservatório, e o consumo de energia elétrica,

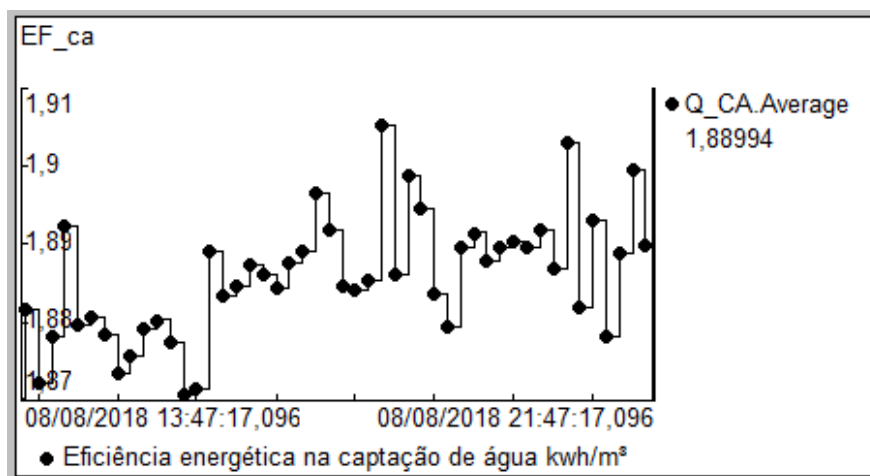
representado por  $E.E_{ca}$  é o consumo de energia no acionamento elétrico das bombas de captação, e a vazão de água medida na entrada da estação de tratamento de água.

Os consumos de água na indústria são descritos por três unidades consumidoras de água bruta, com as vazões medidas em Consumo\_1, Consumo\_2 e Consumo\_3, como na Figura 33.



*FIGURA 33: PROCESSO DE CAPTAÇÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUAS INDUSTRIAIS*

Para o monitoramento do desempenho da captação de água, consideram-se essas duas variáveis, o consumo de energia elétrica na captação e o volume de água captada, como na Figura 34.



*FIGURA 34: MONITORAMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA CAPTAÇÃO DE ÁGUA.*

Na Figura 34 pode-se observar a variação da eficiência, com a mudança de patamar, e o valor absoluto observado na lateral esquerda do gráfico, indica que com o consumo específico na captação de água, com valor absoluto de 1,9 kWh/m<sup>2</sup>, cerca de 70% acima dos 1,67 kWh/m<sup>2</sup> de um processo considerado eficiente na captação de água.

#### 4.6.4. EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NA PRODUÇÃO DE AR COMPRIMIDO

A eficiência energética na produção de ar comprimido depende de dois parâmetros: da energia elétrica consumida no acionamento dos compressores de ar, e da vazão de ar produzido.

Como foi observado previamente pelos profissionais da indústria e da academia, os processos de produção de ar comprimido, em geral, são muito precários no que se refere a instrumentos de medição, o que não permite a aquisição de dados a serem monitorados para obter o indicador de desempenho do processo.

É o caso da ilustração desse estudo, em que a vazão de ar de saída dos compressores e a do processo de produção não são medidas, bem como o consumo de energia elétrica. O único parâmetro de medição é a corrente elétrica do motor de acionamento dos compressores, mas ainda assim, não há

transferência de dados para o supervisório, o que permitiria obter os valores dessa variável em tempo real, e com armazenamento no PI Process Book.

#### **4.6.5. EFICIÊNCIA DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE VAPOR**

Para medir a eficiência da rede de distribuição de vapor são necessários os consumos de vapor dos processos industriais, medir a vazão de entrada nos processos industriais por cada nível de pressão utilizado na planta. No entanto, apenas alguns processos possuem medição. O que há, atualmente para avaliar a eficiência da rede de distribuição são os dados de balanço energético da planta, na qual estima-se o consumo de vapor pela potência dos acionamentos a vapor, o que não pode ser utilizado para monitoramento, e consequente avaliação em tempo real, pois a demanda de potência dos acionamento varia com a variação da carga acionada.

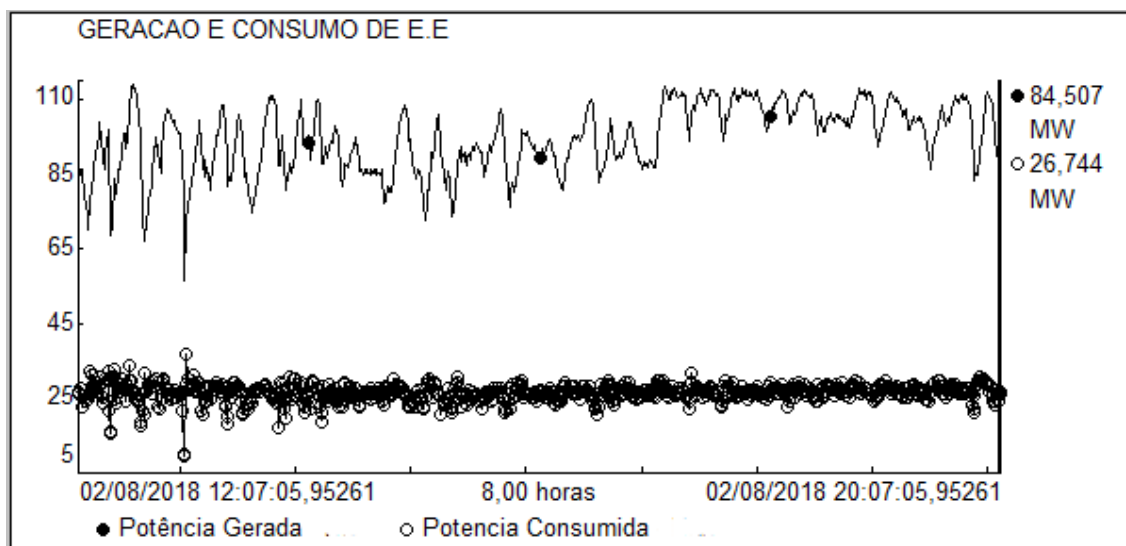
Dada a complexidade da planta, e os três níveis de consumo de vapor de 100 kgf/cm<sup>2</sup>, 21 kgf/cm<sup>2</sup> e 1,5 kgf/cm<sup>2</sup>, demandam instrumentos de medição na admissão de vapor das máquinas, e na saída da câmara de expansão térmica destas, em que o vapor de entrada, após expandido na câmara das turbinas é extraído em um nível menor de pressão e reaproveitado no processo.

Além disso, os processos industriais de produção que demandam vapor de processo precisam de instrumentos de medição na entrada do processo, de maneira a medir a vazão de entrada de vapor nos processos.

#### **4.6.6. EFICIÊNCIA DA REDE DE ENERGIA ELÉTRICA DE UTILIDADES E INDUSTRIAL**

Para obter a eficiência da rede de distribuição, considera-se a energia elétrica gerada, e o consumo de energia elétrica dos setores de utilidades, e industrial. Inicialmente o monitoramento é realizado na geração de energia elétrica, e do consumo dessa energia na indústria, que inclui o setor de utilidades, como na Figura 35.





*FIGURA 35: MONITORAMENTO DA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA E CONSUMO INDUSTRIAL*

A Figura 35 mostra a geração de energia elétrica que é produzida na unidade de cogeração, e a demanda de eletricidade da indústria. O monitoramento dessas duas variáveis é importante, pois toda a energia elétrica não consumida na unidade é comercializada com o setor elétrico. Sendo assim, quanto maior o consumo de eletricidade da planta, menor a potência fornecida a rede elétrica, e menor a eficiência da rede elétrica.

É importante salientar, que este não mede as perdas por dissipação de energia da rede elétrica e/ou dos equipamentos, mas sim a geração de energia elétrica frente ao consumo industrial, e o excedente que é comercializado.

Para monitorar o consumo de energia elétrica do setor de utilidades, e o consumo de energia elétrica industrial, considera-se a potência consumida na planta, dividida para o setor de utilidades e industrial, como na Figura 36.

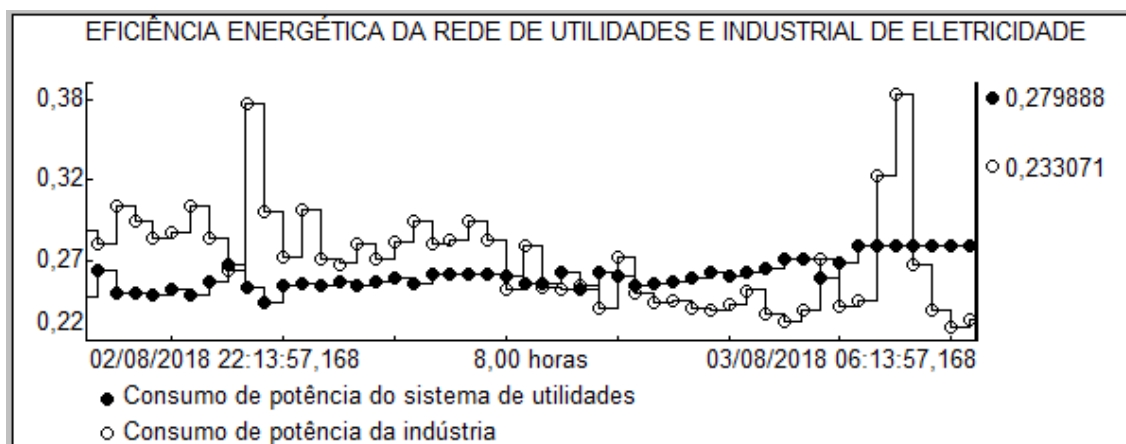


FIGURA 36: EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DA REDE DE ENERGIA ELÉTRICA

A Figura 36 mostra eficiência energética da rede de energia elétrica para o sistema de utilidades, e industrial. Esse indicador é formado pela energia disponível para consumo, e a efetiva energia consumida no sistema de utilidades, e na indústria.

O consumo de energia elétrica no sistema de utilidades é linear frente à variação de consumo desta na indústria. Isso se deve em função dos acionamentos elétricos que o sistema de utilidades possui. Em geral são equipamentos críticos, em que o consumo de eletricidade tem menor variação frente a variação de carga do sistema de utilidades.

Para o consumo da indústria, em que há diversos acionamentos elétricos, e que estes possuem picos de consumo conforme o regime de operação de cada unidade consumidora de energia elétrica, a variação é mais considerável, e menos estável.

#### 4.6.7. EFICIÊNCIA DA REDE DE ÁGUA

Para obter a eficiência da rede de água são considerados os valores de vazão de captação de água e de entrada nos processos industriais. Essa relação, quanto mais próximo à unitária, valor absoluto 1, maior a eficiência, pois indica que toda a água que está sendo captada, está sendo consumida nos processos industriais. A Figura 37 mostra essa relação.

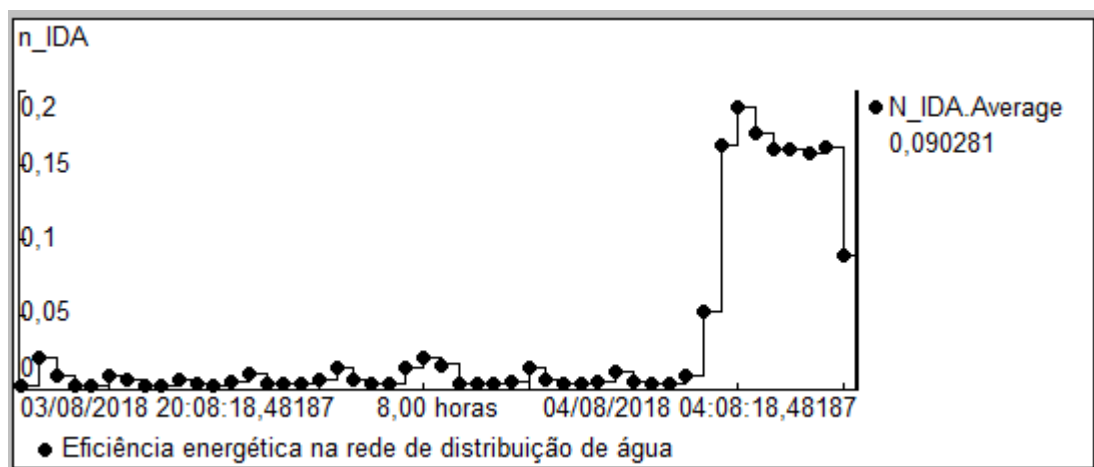


FIGURA 37: EFICIÊNCIA NA REDE DE DISTRIBUIÇÃO DE ÁGUA

A Figura 37 mostra à direita o valor absoluto para a relação entre a captação de água e o consumo industrial nos processos. No entanto, esse valor é muito baixo, e não representa o consumo real da planta. Isso ocorre devido aos processos que não possuem medição de vazão na entrada. Esse número indica que 9% de toda a água captada é efetivamente consumida, chegando no melhor dos casos a 20%, que ainda assim não é representativo.

Nem todos os indicadores propostos para o sistema de utilidades foram possíveis de medir na aplicação de ilustração para o caso proposto, isto é sugerido como oportunidade para o desenvolvimento de estudos na área de gestão da eficiência energética, de produção e distribuição dos insumos industriais.

## 5. CONCLUSÃO

O objetivo deste estudo é a proposição de um método de avaliação da eficiência energética em sistemas de utilidades industriais, por meio do monitoramento de indicadores individuais para cada insumo. O método foi proposto com base nos conceitos já difundidos sobre a medição das variáveis que compõem cada um dos insumos de um sistema de utilidades industriais e, a partir dos indicadores e dos métodos já apresentados na literatura.

A ideia do método é estabelecer quais variáveis do sistema precisam ser medidas para compor os indicadores de eficiência na produção e distribuição de cada um dos insumos, água, vapor, ar comprimido e eletricidade. O gerenciamento destes indicadores é feito pelo monitoramento em tempo real da eficiência de cada um dos insumos, permitindo ao gestor atuações rápidas, por meio da constatação da ineficiência do processo de produção ou distribuição de um determinado insumo.

Destaca-se que não foi foco deste estudo propor formas de medir a eficiência energética dos processos de produção dos insumos, por modelos complexos de análise de energias ou exergia, mas sim, estabelecer uma ferramenta para gerenciar as performances em função dos indicadores que são medidos por meio dos métodos determinísticos convencionais, dados pelas equações do Quadro 2. Desta forma, o método proposto é útil para avaliar os indicadores de performance sem a necessidade de acompanhar individualmente a medição de cada uma das variáveis ou indicadores.

A aplicação do método em um sistema de utilidades industriais real de uma empresa do setor sucroenergético, para avaliar a eficiência do sistema de utilidades mostrou que, de acordo com a proposta deste estudo, o método permitiu gerenciar a eficiência de cada um dos indicadores de eficiência da unidade de produção, e direcionar ações para as unidades de geração com baixa performance. No entanto, a aplicação prática do método mostra que alguns

parâmetros que compõem os indicadores de eficiência não foram possíveis de serem medidos, pois envolvem grandes alterações estruturais dos processos existentes, e que demandam grandes investimentos

É importante ressaltar que, apesar da ferramenta proposta pelo método ser para gerenciamento da performance do sistema de produção e distribuição, são as companhias quem determinam quais os níveis de performance de eficiência energética são capazes de perseguir, e colocar como meta. Isso se deve em função da grande variedade e maturidade dos sistemas de medição que são aplicados aos sistemas de utilidades nos diferentes setores.

Como sugestão de trabalho futuro, este estudo identificou que são necessárias estruturas de utilidades com instrumentos de medição de processos mais abrangentes para que seja possível gerenciar o sistema de utilidades de maneira geral. Além disso, há possibilidade de integrar este método ao contexto da indústria 4.0, uma vez que o método permite o monitoramento dos indicadores de cada um dos insumos em tempo real, a partir de medições de variáveis também em tempo real. Além disso, o software permite o armazenamento de uma grande base de dados. Desta forma, ele permite ao gestor tanto acompanhar como propor ações de forma remota, por meio de um aplicativo em dispositivos móveis.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABESCO. [www.abesco.com.br](http://www.abesco.com.br). **Associação Brasileira das Empresas de Serviços de Conservação de energia**, 14 fev. 2017. Disponível em: <<http://www.abesco.com.br/pt/novidade/como-a-eficiencia-energetica-pode-ser-aplicada-no-tratamento-de-agua/>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

AHN, Y.; HAN, J. Economic optimization of integrated network for utility supply and carbon dioxide mitigation with multi-site and multi-period demand uncertainties. **Applied Energy**, 2018. 723-734.

ASCO. **ASCO Numatics e EMERSON**. [S.l.]. 2018.

ASL, S. S.; TAHOUNI, N.; PANJESHAHI, M. H. Energy Benchmarking of Thermal Power Plants using Pinch Analysis. **Journal of Cleaner Production**, 2018. 1342-1352.

ATAEI, A.; YOO, C. Combined pinch and exergy analysis for energy efficiency optimization in a steam power plant. **International Journal of the Physical Sciences**, 2010. 1110-1123.

BALESTIERE, J. A. P. **Cogeração**: Geração combinada de eletricidade e calor. Florianópolis: UFSC, 2002.

BARMA, M. C. et al. A review on boilers energy use, energy savings, and emissions reductions. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 79, 8 Maio 2017. 970–983.

BERMO. **BERMO a Company of the ARI ARMATUREN GROUP**. [S.l.]. 2018.

BERTO, R. M. V. S.; NAKANO, D. N. A produção científica nos anais do Encontro Nacional de Engenharia de Produção: um levantamento de métodos e tipos de pesquisa. **Produção**, 9, n. 2, 2000. 65-76.

BERTRAND, J. W. M.; FRANSOO, J. C. Modelling and simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, 22, 2002. 241-264.

BLESS, F. et al. Theoretical analysis of steam generation methods - Energy, CO<sub>2</sub> emission, and cost analysis. **ENERGY**, 15 Junho 2017. 114-121.

BOHARB, A. et al. Energy conservation potential of an energy audit within the pulp and paper industry in Morocco. **Journal of Cleaner Production**, 12 fevereiro 2017. 569-581.

BONGO, M. F. et al. Input–output performance efficiency measurement of an electricity distribution utility using super-efficiency data envelopment analysis. **Soft Computing**, 2018. 1-15.

BUHLER, F.; NGUYEN, T. V.; ELMGAARD, B. Energy and exergy analyses of the Danish industry sector. **APPLIED ENERGY**, 184, 15 Dezembro 2016. 1447-1459.

CHOOBINEH, M.; MOHAGHEGHI, S. Optimal Energy Management in an Industrial Plant Using On-Site Generation and Demand Scheduling. **IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS**, 52, n. 3, Maio-Junho 2016. 1945-1952.

CIPOLLONE, R. Sliding vane rotary compressor technology and energy saving. **Journal Process Mechanical Engineering**, 0, 2014. 1-27.

EDWARDS, K. C.; FINN, D. P. Generalised water flow rate control strategy for optimal part load operation of ground source heat pump systems. **APPLIED ENERGY**, 2015. 50-60.

ELBURG, M.; BOORN, R. **European Commission**. [S.l.]. 2014.

ELEKTRO. **Manuais Elektro de eficiência energética - Geração de vapor e calor**. [S.l.]. 2014.

EUROPEAN COMMISSION. **European Commission Joint Research Centre.** [S.l.]. 2009.

FAO. **Food and Agriculture Organization of the United States.** [S.l.]. 2016.

FERREIRA , A. et al. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2018. 181-191.

FESTEL, G ; WÜRMSEHER, M. Benchmarking of energy and utility infrastructures in industrial parks. **Journal of Cleaner Production**, 18 fevereiro 2014. 15-26.

FUPAI/EFFICIENTIA. **Eficiência Energética em Sistemas de Ar Comprimido.** Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

GAHM, C. et al. Energy-efficient scheduling in manufacturing companies: a review and research framework. **European Journal of Operational Research**, 01 fev. 2016. 744-757.

GEBREEGZIABHER, T. et al. Design and optimization of biomass power plant. **CHEMICAL ENGINEERING RESEARCH & DESIGN**, 92, n. 8, Agosto 2014. 1412-1427.

GIACONE, E.; MANCÒ, S. Energy efficiency measurement in industrial processes. **Energy**, n. 38, 2012. 331-345.

GRASSIAN, D.; BAHATEM, M.; SCOTT, T. **Development of and Energy Efficiency Improvement Methodology fo Upstream Oil and Gas Operations.** SPE - Society of Petroleum Engineers. Abu Dhabi: SPE. 2017. p. 1-13.

GU, A.; TENG, F.; WANG, Y. China energy-water nexus: Assessing the water-saving synergy effects of energy-saving policies during the eleventh Five-year Plan. **ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT**, 85, setembro 2014. 630-637.



HASANBEIGI, A. et al. Moving beyond equipment and to systems optimization: techno-economic analysis of energy efficiency potentials in industrial steam systems in China. **Journal of Cleaner Production**, 2016. 53-63.

HERRMANN, C. et al. Energy oriented simulation of manufacturing systems - Concept and Applications. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, p. 45-48, 2011.

HORVATH, A. Life cycle energy assessment of alternative water supply systems. **The international journal of life cycle assessment**, 2006. 1-9.

HUGOT, E. **Manual da engenharia açucareira**. São Paulo: Mestre Jou, v. 2, 1966.

IEA. **International Energy Agency**. [S.l.]. 2016.

KERMANI, M. et al. Generic superstructure synthesis of organic Rankine cycles for waste heat recovery in industrial processes. **Applied Energy**, 2018. 1203-1225.

KIKUCHI, Y. et al. Distributed Cogeneration of Power and Heat within an Energy Management Strategy for Mitigating Fossil Fuel Consumption. **JOURNAL OF INDUSTRIAL ECOLOGY**, 20, n. 2, Abril 2016. 289-303.

LAKATOS, E. **Fundamentos de metodologia científica**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

LI, M.-J.; TAO, W.-Q. Review of methodologies and policies for evaluation of energy efficiency in high energy-consuming industry. **Applied Energy**, 2017. 203-215.

LONGO, S. et al. A systematic methodology for the robust quantification of energy efficiency at wastewater treatment plants featuring Data Envelopment Analysis. **Water Research**, 2018. 317-328.

LORA, E. E. S.; NASCIMENTO, M. A. R. **Geração termoelétrica: planejamento, projeto e operação.** Rio de Janeiro: Interciência LTDA, 2004.

MEHR, A. S. et al. Thermodynamic assessment of a novel SOFC based CCHP system in a wastewater treatment plant. **Energy**, 2018. 299-309.

MOLINOS-SENANTE, M.; GUZMÁN, C. Benchmarking energy efficiency in drinking water treatment plants: Quantification of potential savings. **Journal of Cleaner Production**, 2018. 417-425.

MONACHESI, M. **Eficiência energética em sistemas de bombeamento: manual prático.** Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2005.

MOUSAVI, S.; KARA, S.; KORNFELD, B. A hierarchical framework for concurrent assessment of energy and water efficiency in manufacturing systems. **Journal of Cleaner Production**, 2016.

NETO, V. C.; RAMON, D. Instituto de economia UFRJ, 2002. Disponível em: <<http://www.ie.ufrj.br>>.

OLULEYE, G.; SMITH, R.; JOBSON, M. Modelling and screening heat pump options for the exploitation of low grade waste heat in process sites. **Applied Energy**, 2 Fevereiro 2016. 267-286.

PAPA, G. D. O.; SIMON, A. T. **Aplicação da metodologia DMAIC para redução do consumo de energia elétrica em uma estação de tratamento de água.** Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção. Ponta Grossa: [s.n.]. 2017.

PATTERSON, M. G. What is energy efficiency? Concepts, Indicators and Methodological Issues. **Energy Policy**, 1996. 377-390.

PERA, H. **Geradores de vapor: Um compêndio sobre conversão de energia com vistas à preservação da Ecologia.** São Paulo: Fama, 1990.

RODRIGUES, L. G. S. Análise energética de diferentes sistemas de cogeração com bagaço de cana-de-açúcar. **Dissertação de mestrado apresentada à**

**Faculdade de engenharia de Ilha Solteira da Universidade Estadual Paulista**, Ilha Solteira, 2005.

SANJAY, M. K. S. Thermoeconomic investigation of basic and intercooled gas turbine based power utilities incorporating air-film blade cooling. **Journal of Cleaner Production**, 2018. 842-856.

SILVA, E. L. D. **Metodologia de pesquisa e elaboração de dissertação**. 4. ed. Florianópolis: UFSC, 2005. 138 p.

STORTO, C. A Nonparametric Economic Analysis of the US Natural Gas Transmission Infrastructure: Efficiency, Trade-Offs and Emerging Industry Configurations. **Energies**, 28 fevereiro 2018. 1-24.

SUN, L.; GAI, L.; SMITH, R. Site utility system optimization with operation adjustment under uncertainty. **Applied Energy**, 2016.

TSUTIYA, T. M. **REDUÇÃO DO CUSTO DE ENERGIA ELÉTRICA EM ESTAÇÕES ELEVATÓRIAS DE ÁGUA E ESGOTO**. 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. [S.l.]: [s.n.]. 1999. p. 2611-2625.

U.S. DEPARTMENT OF ENERGY. **U.S. Department of Energy**. [S.l.]. 2014.

U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Greenhouse gas equivalences calculator: calculations and references, 2012. Disponível em: <<https://www.epa.gov/energy>>. Acesso em: 26 jun. 2017.

VERLEYE, D.; AGHEZZAF, E. H. Optimising production and distribution operations in large water supply networks: A piecewise linear optimisation approach. **INTERNATIONAL JOURNAL OF PRODUCTION RESEARCH**, Novembro 2013. 7170-7189.

VITTORINI, D.; CIPOLLONE, R. Energy saving potential in existing industrial compressors. **Energy**, 102, 2016. 502-515.

WALLERAND, A. S. et al. Optimal heat pump integration in industrial processes. **Applied Energy**, 2018. 68-92.

ZHANG, B. J. et al. Coupling Process Plants and Utility Systems for Site Scale Steam Integration. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, set. 2013. 14627-14636.