



**FELIPE CARVALHO DO VALE**

**AVALIAÇÃO DE ANOMALIAS INTRÍNSECAS, ANOMALIAS  
INDUZIDAS E DISFUNÇÕES EM SISTEMAS DE  
REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR**

**LAVRAS-MG**

**2021**

**FELIPE CARVALHO DO VALE**

**AVALIAÇÃO DE ANOMALIAS INTRÍNSECAS, INDUZIDAS E DISFUNÇÕES EM  
SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO POR COMPRESSÃO DE VAPOR**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia mecânica.

Prof. Dr. Dimas José Rúa Orozco

**LAVRAS-MG**

**2021**

## **DEDICATÓRIA**

*À Deus, por me dar a força necessária para superar todos os problemas,  
Aos meus pais, Dilma e José, por todo o amor que me deram,  
À minha irmã, Ana Luiza, por todos os bons momentos,  
À minha tia, Tereza (in memorian), por toda bondade, presença e ensinamentos,  
Às minhas tias, Cida, Fátima, Margarida, Dulce, Dola e Vilma por todo o zelo,  
Às minhas avós, Ivanise e Nenzica, por toda a alegria que me deram,  
À minha namorada, Marina, por todo o apoio, companheirismo e amor,  
Aos meus amigos Pedro e Marcos, por terem sido amigos fieis no decorrer dos anos,  
Ao meu padrinho Ivan, por todos os conselhos e sabedoria passada,  
Ao meu amigo, Maykon (in memorian), pela crença no meu potencial,  
Aos meus demais familiares e amigos, por toda a alegria que me proporcionaram.*

## **AGRADECIMENTO**

*Ao meu orientador, Prof. Dr. Dimas José Rúa-Orozco, por todo o suporte no decorrer dos anos.*

*Ao PIBIC/CNPq, por suportar financeiramente a realização de alguns dos meus projetos, por meio do programa de bolsas.*

*A Alessandro Canssi, Aline Bartz e ao time de Montagem, da Engenharia de Manufatura (OFP) da John Deere - Horizontina, por todo o apoio recebido em minha iniciação ao mercado de trabalho.*

*Aos meus companheiros de classe, que alegraram minhas tardes e fizeram o fardo desse projeto mais leve.*

## RESUMO

Partindo da premissa que grande parte do consumo de energia elétrica mundial se deve a operação de sistemas de refrigeração por compressão de vapor, é sensato supor, que ao sofrerem com degradações, podem ter ainda mais influência nesse consumo. Partindo da premissa de apontar anomalias nesses sistemas e possibilitar manutenções, bem como melhorias, surgiram as metodologias de diagnóstico termoeconômico, que por meio da mistura entre conceitos termodinâmicos e financeiros, possibilitam uma análise dos tipos de degradações agindo no sistema e possibilitam uma análise dos custos financeiros adicionais, devido à presença delas. Nesse trabalho foram desenvolvidos dois modelos de diagnóstico termoeconômico, ambos em um sistema de refrigeração por compressão de vapor operando com degradações simulado no EES – *Engineering Equation Solver*, o primeiro é o modelo de diagnóstico convencional, que diferencia as anomalias em duas categorias, anomalias e disfunções, e o segundo é o modelo de operadores exergéticos, que faz a distinção das anomalias em três classificações, anomalias intrínsecas, anomalias induzidas e disfunções. O uso dos operadores exergéticos não só trouxe uma ampliação na análise, ao promover três tipos de classificação, como também promoveu um detalhamento de diagnóstico que permite manutenções assertivas nos componentes defeituosos e permite precisamente avaliar como melhorias nesses componentes permitem reduções no consumo de energia elétrica adicional.

**Palavras-chave:** Diagnóstico termoeconômico; anomalias intrínsecas; avaliação termoeconômica, estrutura de transição; estrutura produtiva.

## ABSTRACT

Taking the assumption that the world's electricity consumption is in great part due to the operation of vapor compression refrigeration systems, it is reasonable to assume that by suffering from degradations, they can have even more influence on this consumption. Based on the premise of pointing out anomalies in the systems and enabling maintenance, as well as improvements, thermoeconomic diagnostic methodologies emerged, which, through the mixture of thermodynamic and financial concepts, enable an analysis of the types of degradations acting on the system and enable an analysis of costs additional financial resources due to their presence. In this work, two thermoeconomic diagnostic models were developed, both in a vapor compression refrigeration system operating with simulated degradations in EES - Engineering Equation Solver, the first is the conventional diagnostic model, which differentiates anomalies into two categories, anomalies and dysfunctions, and the exergetic operators model, which distinguishes the anomalies into three classifications, intrinsic anomalies, induced anomalies and dysfunctions. The use of exergetic operators not only brought an expansion in the analysis, promoting three types of classification, but also promoted a detailed diagnosis that allows assertive maintenance of defective components and allows to evaluate exactly how improvements in the components are able to reduce the consumption of additional electrical energy.

**Keywords:** Thermoeconomic diagnosis; intrinsic anomalies; thermoeconomic evaluation, transition structure; productive structure.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>11</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>13</b>
<b>2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....</b>	<b>13</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>14</b>
<b>3.1 Estudos realizados de 2010 a 2016 .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 Estudos realizados de 2016 em diante .....</b>	<b>18</b>
<b>4. METODOLOGIA .....</b>	<b>22</b>
<b>4.1 Condição de referência para o ciclo de refrigeração, estudo de caso .....</b>	<b>23</b>
<b>4.2 Condição de teste para o ciclo de refrigeração, estudo de caso.....</b>	<b>29</b>
<b>4.3 Elaboração da estrutura produtiva, da avaliação termoeconômica e dos resultados do diagnóstico termoeconômico.....</b>	<b>30</b>
<b>4.4 Elaboração da estrutura de transição e estrutura produtiva para o diagnóstico com operadores exergeticos .....</b>	<b>35</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>38</b>
<b>5.1 Estudos de caso .....</b>	<b>38</b>
<b>5.2 Resultados da elaboração das estruturas produtivas dos modelos de diagnóstico de exergia total e exergia total com operadores exergeticos.....</b>	<b>40</b>
<b>5.3 Casos de degradação simulados para a condição de teste .....</b>	<b>43</b>
<b>5.4 Aplicação do diagnóstico convencional e diagnóstico com operadores exergeticos ao ciclo de refrigeração, estudo de caso .....</b>	<b>45</b>
<b>5.4.1 Simulações envolvendo anomalias intrínsecas em um componente.....</b>	<b>45</b>
<b>5.4.2 Simulações envolvendo dois componentes com anomalias intrínsecas simultaneamente.....</b>	<b>53</b>
<b>5.4.3 Simulações envolvendo mais de 2 componentes com anomalias intrínsecas simultaneamente .....</b>	<b>56</b>
<b>5.4.4 Impacto no consumo de eletricidade segundo as metodologias de diagnóstico .....</b>	<b>59</b>
<b>5.4.5 Compilações de todos os resultados dos diagnósticos e discussão final.....</b>	<b>60</b>
<b>6. CONCLUSÃO .....</b>	<b>66</b>
<b>7. APÊNDICES.....</b>	<b>67</b>
<b>7.1 APÊNDICE A: Código desenvolvido no EES para simulação das condições de operação da câmara frigorífica .....</b>	<b>67</b>
<b>7.2 APÊNDICE B: Resultados dos casos simulados para as anomalias intrínsecas de 5 e 15% nos componentes da câmara frigorífica.....</b>	<b>73</b>

<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>103</b>
<b>9. ANEXOS .....</b>	<b>106</b>
<b>9.1 ANEXO A: Dados do catálogo para o evaporador .....</b>	<b>106</b>
<b>9.2 ANEXO B: Dados do catálogo para o compressor.....</b>	<b>107</b>
<b>9.3 ANEXO C: Dados do catálogo para a válvula de expansão termostática (VET)....</b>	<b>108</b>
<b>9.4 ANEXO D: Dados do catálogo para o condensador .....</b>	<b>109</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> – Fluxograma das etapas necessárias para os resultados do diagnóstico convencional .....	22
<b>Figura 2</b> - Ciclo de refrigeração por compressão de vapor modelado para a condição de referência .....	24
<b>Figura 3</b> - Diagrama de uma estrutura produtiva hipotética para representar o fluxo E3 sob a óptica de produtos e insumos. ....	31
<b>Figura 4</b> - Matriz de insumos e produtos evidenciando o fluxo do exemplo tratado. ....	32
<b>Figura 5</b> - Fluxograma das etapas necessárias para os resultados do diagnóstico usando Operadores exergéticos.....	35
<b>Figura 6</b> - Ilustração do propósito de um operador exergético.....	36
<b>Figura 7</b> - Diagrama da estrutura de transição hipotética.....	37
<b>Figura 8</b> - Diagrama da estrutura produtiva de exergia total utilizando os operadores exergéticos.....	37
<b>Figura 9</b> - Diagrama da estrutura produtiva do modelo de exergia total para o diagnóstico convencional.....	40
<b>Figura 10</b> - Estrutura de transição do ciclo de refrigeração por compressão de vapor .....	41
<b>Figura 11</b> - Diagrama da estrutura produtiva do modelo de exergia total com operadores exergéticos.....	42
<b>Figura 12</b> - Caso 1 – Simulação de 5% de degradação no evaporador e análise usando o diagnóstico convencional .....	46
<b>Figura 13</b> - Caso 2 – Simulação de 5% de degradação no condensador e análise usando o diagnóstico convencional .....	47
<b>Figura 14</b> - Caso 3 – Simulação de 5% de degradação no compressor e análise usando o diagnóstico convencional .....	48
<b>Figura 15</b> - Caso 4 – Simulação de 5% de degradação na válvula de expansão termostática e análise usando o diagnóstico convencional .....	49
<b>Figura 16</b> - Caso 1 – Simulação de 5% de degradação no evaporador e análise usando o diagnóstico termoeconômico com operadores exergéticos .....	50
<b>Figura 17</b> - Caso 2 – Simulação de 5% de degradação no condensador e análise usando o diagnóstico termoeconômico com operadores exergéticos .....	51
<b>Figura 18</b> - Caso 3 – Simulação de 5% de degradação no compressor e análise usando o diagnóstico termoeconômico com operadores exergéticos .....	52
<b>Figura 19</b> - Caso 4 – Simulação de 5% de degradação na válvula de expansão termostática e análise usando o diagnóstico termoeconômico com operadores exergéticos.....	53
<b>Figura 20</b> - Caso 6 – Simulação de 5% de anomalia intrínseca no evaporador e compressor e análise usando a metodologia de diagnóstico convencional .....	54
<b>Figura 21</b> - Caso 6 – Simulação de 5% de anomalia intrínseca no evaporador e compressor e análise usando a metodologia de diagnóstico com operadores exergéticos .....	55

<b>Figura 22</b> - Caso 11 – Simulação de 5% de anomalia intrínseca no evaporador, condensador e compressor e análise usando a metodologia de diagnóstico convencional .....	56
<b>Figura 23</b> - Caso 11 – Simulação de 5% de anomalia intrínseca no evaporador, condensador e compressor e análise usando a metodologia de diagnóstico convencional .....	57
<b>Figura 24</b> - Caso 15 – Simulação de 5% de anomalia intrínseca em todos os componentes do ciclo e análise usando a metodologia de diagnóstico convencional .....	58
<b>Figura 25</b> - Caso 15 – Simulação de 5% de anomalia intrínseca em todos os componentes do ciclo e análise usando a metodologia de diagnóstico com operadores exergéticos.....	58
<b>Figura 26</b> - Impacto no consumo de energia elétrica segundo ambas as metodologias para o caso 1. ....	59
<b>Figura 27</b> - Impacto no consumo de energia elétrica segundo ambas as metodologias para o caso 15: degradações de 5% em todos os componentes do ciclo. ....	60

## 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, a demanda por energia elétrica é um dos fatores mais impactantes no desenvolvimento socioeconômico de uma sociedade e sistemas de ar condicionado e refrigeração estão entre os grandes consumidores dessa energia, sendo os responsáveis por cerca de 20% do consumo de energia elétrica de instalações ao redor do mundo (IEA, 2018). Estudos como o de Omer (2008), já indicavam que o consumo de energia elétrica no ano de 2020, podia superar em até 80% o da década de 90, havendo indícios que ao passar das décadas, isso possa aumentar. Conclusões similares às de Omer (2008) podem ser vistas no trabalho da IEA (2020), onde nota-se um aumento no consumo de eletricidade no setor residencial, de 2518 TWh para 6008 TWh, e no setor industrial, de 4519 TWh para 9362 TWh, no período de 1990 a 2018.

Quando sistemas de refrigeração por compressão de vapor operam, é essencial que mantenham o nível de desempenho de operação esperado, para que não consumam quantidades maiores de eletricidade. Diante disso, é sensato supor que degradações dos componentes por fatores internos ou externos podem influenciar diretamente sua eficiência de operação e no consumo de energia elétrica, causando impactos financeiros aos custos de operação do sistema (Mendes et al., 2020). Segundo Sala-e Picallo-Perez (2020), para que haja a otimização do sentido operacional de uma instalação, seu estado operacional deve ser conhecido e uma metodologia apropriada deve ser escolhida para explicar as causas de aumentos anormais de consumos de insumos, para permitir que decisões satisfatórias sejam tomadas.

Partindo da premissa de fazer uso de uma abordagem integrada a ciclos termodinâmicos, capaz de detectar, qualificar e quantificar essas degradações surge o diagnóstico termoeconômico. O diagnóstico termoeconômico é uma metodologia de análise utilizada para identificar os equipamentos com degradações internas no seu desempenho, como também para quantificar estas anomalias em termos de consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, exprimir os custos de operação. Esses custos, ao serem quantificados, podem ser usados para programar as atividades de manutenção, isto é, faz-se a manutenção quando o custo no consumo de energia elétrica causado pelas anomalias dos equipamentos for igual ou maior que os custos de manutenção (OROZCO, 2017).

É importante ressaltar que apesar de não haver uma literatura extensa sobre a metodologia desses diagnósticos, existem diferentes abordagens, que se diferenciam ao levar em consideração diferentes aspectos que podem influenciar nos resultados da análise. Em suma, alguns diagnósticos levam em conta fatores que aumentam o nível de complexidade da avaliação e podem induzir a resultados com acurácia elevada (LOURENÇO, 2016).

De modo a avaliar o efeito causado pelas anomalias nos componentes de um sistema de refrigeração por compressão de vapor e seus impactos nos recursos fornecidos ao sistema, compara-se os resultados da aplicação do diagnóstico termoeconômico convencional contra os resultados do diagnóstico termoeconômico utilizando operadores exergeticos, para identificar e quantificar em termos de consumo adicional de energia elétrica, as anomalias do tipo intrínseco e induzido, assim como as disfunções. Para tal fim, foram elaborados modelos matemáticos do sistema de refrigeração e dos principais componentes (Compressor, evaporador, condensador e dispositivo de expansão) baseados em catálogos de fabricantes, que logo, foram simulados utilizando o software *Engineering Equation Solver* (EES) para obter as condições de referência, teste (com anomalias) e condição esperada que permitiram aplicar as duas metodologias de diagnóstico escolhidas. As anomalias intrínsecas (degradações internas) foram simuladas mediante a variação de alguns parâmetros dos equipamentos, como são, fator de troca de calor do evaporador e do condensador, eficiência do compressor e fator de fluxo do dispositivo de expansão. Foram, assim, simuladas combinações de anomalias, desde anomalias em um único equipamento até anomalia em todos os componentes do sistema para comparar as metodologias de diagnóstico apresentadas neste trabalho.

## **2. OBJETIVOS**

Avaliar a influência das anomalias intrínsecas, anomalias induzidas e disfunções em sistemas de refrigeração por compressão mediante a aplicação de metodologias de diagnóstico termoeconômico para quantificar seus impactos no consumo adicional de energia elétrica.

### **2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

1 - Elaborar a modelagem computacional do sistema de refrigeração por compressão de vapor que permita simular diferentes condições de operação e quantificar o consumo adicional de energia elétrica;

2 – Definir os parâmetros de operação e simular a condição de referência para o sistema modelado computacionalmente;

3 – Definir as degradações que serão simuladas para as condições de teste do ciclo de refrigeração em estudo;

4 – Criar a estrutura produtiva e estrutura de transição do sistema, para estabelecer o propósito produtivo dos componentes do ciclo, isto é, definir as interações exergéticas sob a óptica de produtos e insumos.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A refrigeração é definida como o processo de extração de calor de uma fonte de calor de baixa temperatura, substância ou meio de resfriamento e sua consequente transferência para um dissipador de calor de alta temperatura. Ela mantém a temperatura da fonte de calor abaixo da de seus arredores, enquanto transfere o calor extraído e qualquer entrada de energia necessária para um dissipador de calor, ar atmosférico ou uma superfície de água. Um sistema de refrigeração é uma combinação de componentes e equipamentos conectados em uma ordem sequencial para produzir o efeito de refrigeração. Os sistemas de refrigeração comumente usados para o condicionamento de ar, podem ser classificados pelo tipo de energia de entrada e pelo processo de refrigeração, em três categorias: sistemas de absorção, expansão de gás ou água e sistemas de compressão de vapor. O tipo de sistema de refrigeração tratado nesse trabalho, o de compressão de vapor, se baseia em usar compressores, que ativam o refrigerante, comprimindo-o a um nível de pressão e temperatura mais alto após ter produzido seu efeito de refrigeração (WANG, 2000). O refrigerante comprimido transfere seu calor para o dissipador e é condensado na forma líquida. Este refrigerante líquido é então estrangulado para um vapor de baixa pressão e baixa temperatura para produzir o efeito de refrigeração durante a evaporação. Esses sistemas são os sistemas de refrigeração mais amplamente adotados tanto no condicionamento de ar para conforto quanto no ar de processo. Seus principais componentes, segundo Wang (2000), se dividem em:

- O evaporador, que é um dos principais componentes de um sistema de refrigeração, no qual o refrigerante evapora com o objetivo de extrair calor do ar circulante, da água gelada ou de outras substâncias.
- Uma válvula de expansão, que regula taxa de fluxo de refrigerante para o evaporador, de acordo com o grau de superaquecimento do refrigerante de vapor que sai do evaporador.
- Um condensador, que liquefaz o refrigerante do gás quente para o líquido e rejeita o calor por meio de uma serpentina e um ventilador. Um sistema de controle de temperatura detecta a temperatura do ar ambiente com um sensor e liga ou desliga o compressor para controlar sua capacidade de resfriamento e aquecimento por meio de um termostato

- Um compressor, com a finalidade de elevar a pressão de vapor correspondente à temperatura de condensação

Pode-se dizer que a missão de um sistema de refrigeração é a realização de determinadas funções para proporcionar conforto térmico e qualidade de ar interior para pessoas ou o melhoramento de processos industriais. Alguns dos processos básicos desses sistemas são: o controle de temperatura, controle de umidade, ventilação e qualidade do ar interior. Esses processos devem se realizar automaticamente, sem ruídos elevados, com o menor consumo energético e devem evitar a produção de contaminantes ao meio ambiente (QUADRI, 2001). O princípio de operação desses sistemas é utilizar uma série de processos em que um fluido refrigerante absorve calor de um ambiente, em seu ponto inicial, e o transporta para outro ambiente, quando passa pelo condensador. Durante esse processo, ele passa por todos os componentes do ciclo; evaporador, compressor, condensador e válvula de expansão e retorna ao seu estado inicial, onde ele novamente absorve calor de um ambiente (STOECKER; JABARDO, 2002).

O diagnóstico termoeconômico é uma metodologia oriunda da termoeconomia, a ciência que combina conceitos termodinâmicos e econômicos para fazer a comparação entre a operação de um sistema entre um estado de referência, tomado como de operação ideal, e um estado que possua degradações, e tem como intuito a localização e análise de custos gerados por anomalias na operação do sistema termodinâmico para possibilitar correções nas quedas de eficiência de operação dos equipamentos e diminuição do consumo de energia (SALA; PICALLO-PEREZ, 2020). Esse termo foi proposto na década de 60 por Tribus e Evans (1962, apud OROZCO, 2017), mas a primeira abordagem a fazer uso desse termo surgiu na década de 80, em Valero et al. (1986).

Um dos conceitos termodinâmicos de maior relevância para o desenvolvimento do diagnóstico é a exergia, uma vez que ela avalia o trabalho máximo a ser obtido de uma quantidade de matéria e sua análise permite avaliar quantitativamente as causas que resultam em seu aumento, devido à imperfeições termodinâmicas de processos químicos e térmicos (SZARGUT, 1989). Além disso, sua análise também é relevante para a análise da capacidade de economia energética do sistema, uma vez que ela pode ser relacionada aos custos de operação por meio da quantificação dos recursos gastos para prover um fluxo de material ou de exergia, esse por sua vez, expresso em termos de exergia. Todavia, os processos reais são irreversíveis e por consequência, a exergia demandada para obter um produto, denominada de

custo exergético, é obtida em função dos processos que envolvem sua formação.

O custo exergético de um produto é expresso pelo somatório de sua exergia, em conjunto com a exergia destruída e as perdas. Dessa forma, diferentemente da energia, a exergia não se conserva em um processo real e a exergia na saída de um processo ( $E_s$ ), incluindo as perdas, é maior que a exergia de entrada ( $E_e$ ), a diferença entre essas variáveis é chamada de irreversibilidade ( $I$ ), como mostrado na Equação 1 (OROZCO, 2017).

$$E_e = E_s + I \quad (1)$$

O custo exergético para um determinado fluxo exergético ( $B$ ) é definido como a quantidade de exergia necessária para sua produção, segundo Valero, Lozano e Muñoz (1986) e é representado por  $B^*$ . Esse conceito é necessário para se definir o desempenho dos componentes, através de seu consumo exergético unitário, representado pelo símbolo  $k^*$ , que indica a quantidade necessária de recursos para se produzir uma unidade de seu produto. Essa relação matemática está exposta na Equação 2:

$$k^* = \frac{B^*}{B} \quad (2)$$

Uma das etapas do diagnóstico é a formulação de uma estrutura produtiva, para a análise do sistema de refrigeração sob a óptica de produtos e insumos dos componentes. A estrutura produtiva pode ser definida como um modelo de relações que define as interações entre o ambiente, sob a forma de calor e trabalho com os componentes do sistema. Ela vai ser útil não só para estabelecer a função produtiva de cada componente do sistema, mas também para auxiliar a avaliar a formação do processo de custos dos produtos (SALA; PICALLO-PEREZ, 2020).

A desagregação de exergia é uma metodologia de diagnóstico termoeconômico que avalia a exergia na estrutura produtiva a separando em diferentes termos, de acordo com o processo de desagregação escolhido. Ela é utilizada para tornar viável a modelagem de componentes dissipativos, já que em metodologias de diagnóstico convencionais não há possibilidade da definição dos produtos de componentes dissipativos, como o condensador e válvulas de expansão (MENDES et al., 2020).

O levantamento dos estudos e projetos de maior relevância desse ramo será apresentado nesse projeto para a última década, um estudo com maior profundidade, que parte da fase embrionária da análise de sistemas térmicos, sob a óptica de análise de custos e interações entre os componentes, e ruma até os métodos de diagnóstico desenvolvidos e estudados atualmente pode ser visto no trabalho de Orozco (2017).

### **3.1 Estudos realizados de 2010 a 2016**

No estudo de Petrakoupolos et al. (2012), tanto a análise exergética convencional, como a avançada são empregadas, para avaliar a limitação do conhecimento da planta de acordo com essas metodologias. É mostrado que a análise convencional aponta os componentes e processos com alto teor de irreversibilidades, mas segundo os autores ainda há a carência de clareza ao se tratar os dados. Como conclusão, foi constatado que a exergia destruída em alguns componentes da planta é inevitável e é causada por limitações tecnológicas internas dos componentes da planta, parcela relacionada à destruição endógena de exergia de cada um dos dispositivos.

Segundo Piacentino e Talamo (2013), é discutido que há a dificuldade de se aplicar o diagnóstico termoeconômico a sistemas de refrigeração por compressão de vapor e visando contornar essa dificuldade, há a premissa de simulação de um sistema de ar condicionado, que opera com 120 kW, a simulação consiste em condições de operação padrão e sob falhas. Cinco anomalias distintas são propostas, simultaneamente ou de forma individual. Os resultados mostraram que houve eficiência em identificar algumas anomalias, mas falharam em outras, emitindo sinais de falhas falsos. Esses erros, como afirmam os autores, é devido à modelagem precária da válvula de expansão e distorções de resultados causadas por problemas internos ao sistema. No entanto, essa metodologia é válida para a avaliação de determinadas falhas físicas da estrutura, conforme demonstrado pela simulação, como incrustações no evaporador e vazamento na válvula do compressor, por gerar facilidade em avaliar esses problemas.

### 3.2 Estudos realizados de 2016 em diante

Em Lorenzoni (2017), várias metodologias são aplicadas de modo a se fazer o levantamento dos benefícios e o nível de acurácia de avaliação de cada uma. Ao final das comparações, o autor constatou que os modelos que faziam uso da desagregação da exergia, seja de forma simples ou complexa, comumente proviam elevada acurácia ao diagnóstico e ainda possibilitavam o isolamento dos equipamentos dissipativos. Ainda segundo o autor, esse isolamento trouxe mais coerência para a análise, uma vez que em alguns casos, os resultados dos modelos que não a utilizavam violaram as Leis da Termodinâmica.

No projeto de Catrini et al. (2018), houve a extensão da abordagem termoeconômica para atingir também o âmbito ambiental, por meio da junção desta com a metodologia de análise da vida do ciclo. Ela é válida para a análise ambiental por prover o diagnóstico de custos e impactos nesse segmento, as duas unidas podem prover a contabilização monetária dos custos de operação do sistema e dos impactos causados à natureza. Esses diagnósticos foram aplicados à um *chiller* de compressão de vapor e dentre a discussão dos resultados obtidos, houve a exibição dos benefícios da combinação dessas abordagens, como a correlação entre a utilização de um baixo nível de energia e exergia e a possibilidade de reversibilidade dos impactos ambientais, ou ainda a possibilidade de manter cada um deles numa faixa aceitável.

Alguns autores como Almeida (2018), utilizaram metodologias de diagnóstico que analisavam não só os custos de operação, como também nas parcelas das taxas de investimento, como a avaliação exergoeconômica simples e avançada. Ao empregar essas duas metodologias em um sistema de cogeração, o autor almejava ter a percepção da partição dos custos de destruição de exergia e das taxas de investimento em parcelas evitável e inevitável, endógena e exógena. Mediante a análise desses fatores ele atestou que a metodologia avançada propôs a priorização de melhorias de forma condizente com as necessidades dos componentes, diminuindo assim os custos de operação, enquanto a básica falhou em agregar esse tipo de coerência à análise para o ciclo descrito.

Em Leiva-Illanes et al. (2018), há a comparação entre o diagnóstico termoeconômico e a abordagem de custos nivelados na avaliação da performance de uma usina de poligeração solar. Os autores concluíram que o emprego dos custos nivelados é recomendável em casos onde é necessária uma aproximação primária dos custos de cada produto, sem necessitar de um

conhecimento aprofundado de termodinâmica para ser passível de aplicação. No entanto, segundo o estudo, essa análise é ineficaz para avaliar custos quando se lida com um sistema individual que gera mais de um produto, sendo assim recomendável a utilização do diagnóstico termoeconômico para uma análise que possua maior acurácia e complexidade.

De modo a avaliar eficácia de determinadas metodologias ao serem adaptadas a uma usina geotérmica de geração de potência real na Turquia, em Yilmaz (2018) houve o estudo e confronto dos resultados gerados por três metodologias distintas: orçamento de exergia específica – OEE, estrutura de análise produtiva modificada – EAPM e Moran. O autor constatou que o método Moran não era tão complexo em sua elaboração e possuía menor acurácia e rastreabilidade dos resultados quando comparado com os outros dois, tornando-o inviável para a utilização nesse caso. Dentre o OEE e o EAPM, o OEE se destacou por ter mostrado resultados coerentes ao prever e avaliar os custos de geração de energia da usina e por permitir a rastreabilidade nos cálculos com elevada simplicidade, tendo por essa razão sido indicado a essa usina ao invés dos demais métodos.

O trabalho proposto por Picallo-Perez et al. (2019), foi aplicado a uma residência escolar abastecida com aquecimento, refrigeração ambiente e ventilação mecânica e introduz uma abordagem que faz uso da simulação dinâmica preliminar para calcular fluxos médios de energia em um período e também de uma estrutura capaz de prever as diferentes condições de operação no decorrer do ano. Esses procedimentos são adotados para se avaliar tendências de custos de operação e ambientais mensais, para tornar perceptíveis os possíveis alvos de melhorias. A inovação da aplicação dessa abordagem, segundo o autor, reside no fato da modelagem levar em consideração todas as possibilidades de operação possíveis para o sistema e ser aplicável a sistemas que possam sofrer mudanças drásticas de operação no decorrer do ano, como o caso das bobinas de aquecimento usadas no estudo em questão, que no inverno operavam como dispositivos produtores e no verão como dissipativos.

No estudo proposto por Valero e Torres (2020) é abordada uma metodologia que faz uso de energia livre, ao invés de exergia, para a construção matemática da teoria termodinâmica de custos para diagnosticar anomalias em sistemas térmicos. Essa teoria se baseia na definição da equação característica linearizada que irá representar o comportamento físico de cada componente. Um resultado dessa aplicação, é a uma nova função termodinâmica, chamada de energia livre relativa e um novo parâmetro, chamado de temperatura de deterioração, essa última é oriunda da causa da deterioração do componente, ela é caracterizada por uma trajetória

termodinâmica h-s, que descreve os efeitos no fluxo de saída. A função de energia livre relativa, permite um relacionamento exato entre a quantidade de recursos utilizados e o aumento na geração de entropia, causado pelo caminho de deterioração do componente, essa abordagem pode ser um caminho mais direto e mais preciso na avaliação dos componentes com deterioração, quando comparada à avaliação tradicional, que faz uso de parâmetros relacionados à exergia.

A partir da análise dos estudos apresentados, é possível concluir que muito foi desenvolvido para o diagnóstico termoeconômico desde o projeto GAUDEAMO (VALERO et al.,1986), e isso se deve principalmente ao advento computacional, que elevou sua acurácia, sua abrangência e ainda simplificou a análise numérica, principalmente no que diz respeito à manipulação de vetores e matrizes. Atualmente, com os diversos problemas ambientais que afetam a sociedade e a carência pela redução no consumo energético e de combustíveis fósseis se evidencia a relevância do diagnóstico termoeconômico, uma vez que ele pode agir com o intuito de diminuir o desperdício desses insumos, e por consequência, pode proporcionar diminuições no consumo de energia elétrica. Como no estudo de Catrini et al. (2018), pode ainda quantificar o impacto ambiental, de modo a propor melhorias que visem reduzir esses danos. E é nesse contexto que as novas metodologias, como a de desagregação de exergia, proposta nesse projeto, e a que faz uso da energia livre relativa (VALERO; TORRES, 2020), buscam confrontar os conceitos já estabelecidos, de modo a prover melhorias ainda não praticadas para o diagnóstico e inspirar o aprofundamento de novos estudos dessa área.

No trabalho de Picallo-Perez, Lazzaretto e Sala (2020), há o estudo do diagnóstico em um sistema de ventilação-refrigeração, o *HVAC-R*, um sistema dinâmico e que proporcionou novas perspectivas de como aplicar o diagnóstico em sistemas com condições variantes no tempo, no caso desse trabalho, fazendo a aferição do custo exergético dos produtos e insumos de cada componente a cada 10 minutos e com o diagnóstico ocorrendo conforme há detecção de mudanças nas relações entre os componentes, ele é feito comparando em cada uma dessas condições com às de referência. Essa metodologia foi realizada abordando o sistema com enfoque nas representações das válvulas de três caminhos e nos componentes inerciais. O estudo de Picallo-Perez et al. (2021), reuniu várias metodologias de diagnóstico já estudadas e mostrou que não há um consenso entre a abordagem ideal para se tratar equipamentos dissipativos. Além disso, o estudo mostrou algumas melhorias que essas metodologias e as novas devem buscar, para que haja um consenso não só no diagnóstico dos dissipativos, como

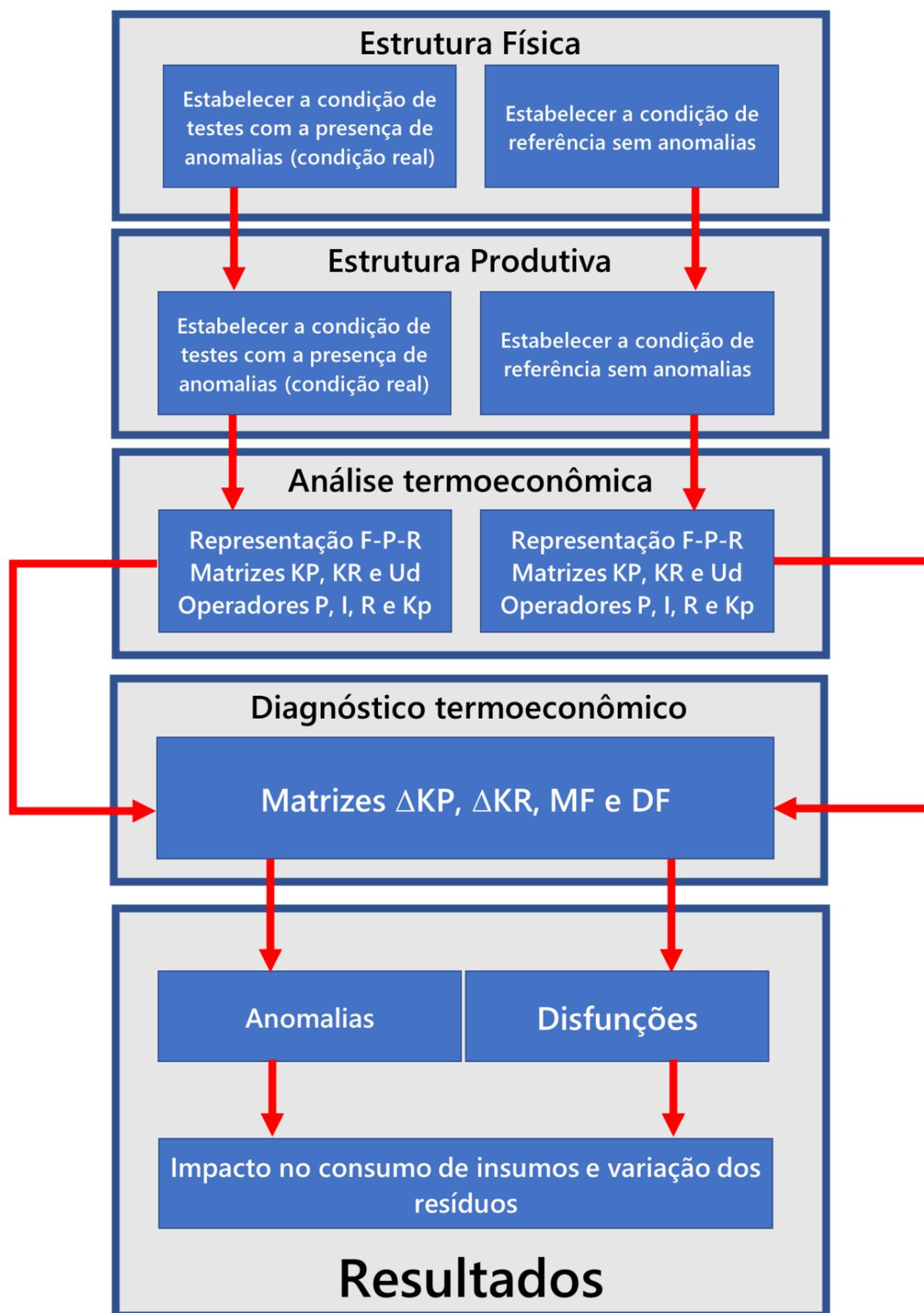
também da forma em que cada metodologia serve para diferentes situações necessárias de diagnóstico.

Conceitos como o custo exergético unitário e o processo de formação de custo do desperdício foram revisitados no trabalho de Torres e Valero (2021), dentre os principais avanços que esse estudo proporcionou à teoria do diagnóstico destacam-se uma formulação matemática e computacional que reduz a complexidade de estudo em estruturas produtivas e uma generalização da ideia de desperdícios, de forma que ele possa ser avaliado em qualquer tipo de sistema produtivo.

#### 4. METODOLOGIA

De modo a realizar as avaliações termoeconômicas e o diagnóstico propostos nesse projeto, é necessário realizar alguns procedimentos teóricos em que há a manipulação física e algébrica dos componentes do ciclo. Esses procedimentos podem ser divididos em quatro categorias: elaboração da condição de referência dos dispositivos do ciclo de refrigeração, elaboração da condição de operação em que os dispositivos apresentam degradações, elaboração da estrutura produtiva e cálculos para o diagnóstico termoeconômico. Ao fim desses procedimentos, é possível obter a caracterização do sistema sob a óptica do diagnóstico termoeconômico. No fluxograma da Figura 1, são resumidas as etapas para a elaboração do diagnóstico convencional, essas etapas serão descritas detalhadamente nessa seção.

Figura 1 – Fluxograma das etapas necessárias para os resultados do diagnóstico convencional



Fonte: O autor

## 4.1 Condição de referência para o ciclo de refrigeração, estudo de caso

A condição de referência é definida como uma condição em que não há a presença de anomalias e pode ser tomada como a condição dos componentes a partir do momento em que foram fabricados, isto é, ao operarem nessa condição eles estariam gerando os resultados propostos pelo fabricante (LORENZONI, 2017). O desenvolvimento dessa condição é essencial para o diagnóstico, pois ela irá servir no futuro para o comparativo produtivo entre a condição de referência e a de degradações, visando analisar como as degradações promovem desperdícios de recursos. Essa condição foi elaborada por meio de uma simulação computacional no *software* EES – *Engineering Equation Solver*, de acordo com características usuais de sistemas de refrigeração e usando relações termodinâmicas e matemáticas, sendo essas últimas advindas de dados reais de componentes de um ciclo de refrigeração.

O sistema de refrigeração simulado no EES faz uso do fluido refrigerante R-22, e é projetado para atender uma carga frigorífica de 23,145 kW, para uma temperatura ambiente de 32°C, temperatura da câmara de -2 °C e pressão atmosférica de 101,3 kPa. Para tal simulação, utilizam-se dados de um evaporador FTBH841 da marca Trineva, compressor ESH730 da marca Bitzer, um condensador modelo padrão 099E, 12 pólos, 60 Hz; da marca McQuay - Heatcraft do Brasil Ltda e uma válvula de expansão termostática TE5-2 da marca Danfoss.

As equações e resultados que governam o comportamento dos componentes nessa condição são obtidas através da aplicação de algumas Leis e princípios termodinâmicos, são eles: os princípios de conservação de massa e de da energia, a segunda Lei da termodinâmica e o uso de propriedades termodinâmicas. Esses critérios se aplicam aos componentes individuais do ciclo, como o compressor, condensador, válvula de expansão e evaporador, para ser possível a análise do ciclo em seu todo (MORAN; SHAPIRO, 2013). As equações resultantes dessas aplicações aos componentes do ciclo são mostradas nas equações 3, 4 e 5.

$$W_{Comp} = \dot{m}_f(h[1] - h[4]) \quad (3)$$

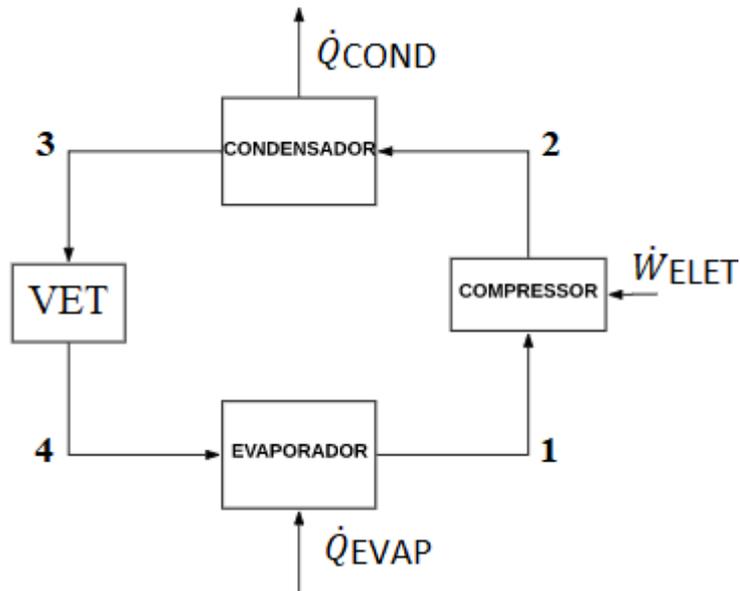
$$Q_{Cond} = \dot{m}_f(h[3] - h[2]) \quad (4)$$

$$Q_{evap} = \dot{m}_f(h[1] - h[4]) \quad (5)$$

$$h[3] = h[4] \quad (6)$$

A Equação 3 representa o consumo de energia elétrica pelo compressor,  $\dot{m}_f$  representa a vazão mássica e os  $h$  representam as entalpias para os pontos em colchetes, a Equação 4 representa a taxa de transferência de calor do condensador e a Equação 5 representa a taxa de transferência de calor do evaporador, respectivamente. A Equação 6, representa a igualdade de entalpia proveniente do estrangulamento realizado pela válvula de expansão termostática. O ciclo, seus pontos e seus componentes; evaporador, condensador, compressor e válvula de expansão termostática (VET) são mostrados na Figura 2.

**Figura 2** - Ciclo de refrigeração por compressão de vapor modelado para a condição de referência



Fonte: O autor

Além das equações de 3, 4, 5 e 6, ainda foi utilizada a equação para se avaliar o coeficiente de performance do ciclo e a equação para a eficiência isentrópica do compressor, representada por  $\eta_{isent}$ , mostradas na Equação 7 e Equação 8, respectivamente.

$$COP = \frac{Q_{cond}}{W_{Comp}} \quad (7)$$

$$\eta_{isent} = \frac{h_s[2] - h[1]}{h[2] - h[1]} \quad (8)$$

Além das equações baseadas na termodinâmica, para cada componente do ciclo de refrigeração, é necessário estabelecer relações matemáticas que descrevam o comportamento dos equipamentos para diferentes condições de operação. Assim, foram selecionados equipamentos comerciais que atendem às condições estabelecidas para o sistema, utilizando as informações oriundas de catálogos para mediante regressão linear, obter as equações complementares para o ciclo de refrigeração em estudo. O evaporador escolhido é o modelo FTBH841 da marca Trineva. Baseado nos dados do catálogo para este evaporador, inserido no Anexo 1, foi obtida a Equação 9 que relaciona a capacidade frigorífica do evaporador com a temperatura de evaporação e temperatura da câmara frigorífica.

$$\dot{Q}_o = (4,28 + 0,030 \cdot t_o + 0,0004 \cdot t_o^2) \cdot (t_{cam} - t_o) \text{ [kW]} \quad (9)$$

Já na Tabela 1 são mostrados os dados do catálogo utilizados para obter a Equação 9 e os resultados de validar dita equação, na coluna Simulado são mostrados os valores simulados para as mesmas condições de entrada do catálogo ao usar a Equação 9 e o erro proveniente do uso dela é mostrado na última coluna.

**Tabela 1** – Validação do evaporador FTBH841 Trineva

Catálogo			Simulado		
To [°C]	Qo [kcal/h]	Qo [kW]	Qo [kW]	Qo[kcal/h]	Erro [%]
10	23689,20	27,53	27,76	23893,99	-0,86
5	23224,65	26,99	26,66	22944,17	1,21
0	22267,05	25,87	25,69	22107,34	0,72
-5	21348,40	24,81	24,85	21383,49	-0,16
-10	20468,70	23,78	24,14	20772,62	-1,48
-15	20166,60	23,43	23,56	20274,74	-0,54
-20	19966,15	23,20	23,11	19889,84	0,38
-25	19768,55	22,97	22,80	19617,93	0,76
-30	19572,85	22,74	22,61	19459,01	0,58
-35	19284,05	22,41	22,56	19413,07	-0,67

Fonte: O autor

O compressor escolhido é o modelo ESH730 da marca Bitzer, obtido pelo catálogo disponível no *software* da Bitzer. Baseado nos dados do catálogo para este compressor, inserido no Anexo 2, foi obtida a Equação 10, que relaciona a temperatura de condensação ( $T_c$ ), temperatura de evaporação ( $T_o$ ) e vazões mássicas ( $\dot{m}$ ) com a potência consumida pelo compressor.

$$\dot{W} = -7,166 + 7,863 \cdot 10^{-2}T_c + 1,546 \cdot 10^{-3}T_c^2 - 2,167 \cdot 10^{-1}T_o - 9,651 \cdot 10^{-5}T_o^2 + 67,157\dot{m} - 88,029\dot{m}^2 \text{ [kW]} \quad (10)$$

Na Tabela 2 são mostrados os dados do catálogo utilizados para obter a Equação 10 e os resultados de validar dita equação, na coluna Simulado são mostrados os valores simulados para as mesmas condições de entrada do catálogo ao usar a Equação 10 e o erro proveniente do uso dela é mostrado na última coluna.

**Tabela 2** – Validação do compressor modelo ESH730

Catálogo				Simulado	
TC [°C]	T0 [°C]	m[kg/s]	W [kW]	W[kW]	Erro [%]
30	0	0,196	6,370	6,360	0,157
30	-2	0,184	6,380	6,380	0,000
30	-4	0,172	6,390	6,394	-0,001
30	-6	0,161	6,400	6,405	-0,001
30	-8	0,150	6,410	6,416	-0,001
30	-10	0,140	6,420	6,418	0,000
30	-12	0,130	6,430	6,426	0,001
40	0	0,191	8,050	8,053	0,000
40	-2	0,178	8,060	8,063	0,000
40	-4	0,167	8,070	8,076	-0,001
40	-6	0,156	8,070	8,077	-0,001
40	-8	0,145	8,080	8,067	0,002
40	-10	0,135	8,080	8,072	0,001
40	-12	0,125	8,070	8,071	0,000
50	0	0,185	10,030	10,032	0,000
50	-2	0,173	10,030	10,029	0,000
50	-4	0,161	10,020	10,020	0,000
50	-6	0,150	10,020	10,009	0,001
50	-8	0,139	10,000	9,999	0,000
50	-10	0,129	9,980	9,981	0,000
50	-12	0,119	9,960	9,970	-0,001

Fonte: O autor

A válvula de expansão termostática (VET) escolhida é a modelo TE5-2 da marca Danfoss, obtida pelo catálogo disponível no *software* da Danfoss. Baseado nos dados do catálogo para esta válvula, inserido no Anexo 3, foi obtida a Equação 11, que relaciona a temperatura de condensação ( $T_c$ ), temperatura de evaporação ( $T_o$ ) e variação de superaquecimento ( $\Delta Sup$ ), a variação de subresfriamento ( $\Delta Sub$ ), com a vazão mássica da válvula  $\dot{m}$ .

$$\dot{m} = 363,751 - 1,365T_o + 4,270T_c - 4,279\Delta T_{sub} - 2,329\Delta T_{sup} \left[ \frac{kg}{h} \right] \quad (11)$$

Na Tabela 3 são mostrados os dados do catálogo utilizados para obter a Equação 11 e os resultados de validar dita equação, na coluna Simulado são mostrados os valores simulados para as mesmas condições de entrada do catálogo ao usar a Equação 10 e o erro proveniente do uso dela é mostrado na última coluna.

**Tabela 3** – Validação da válvula modelo TE5-2 DANFOSS

Catálogo				Simulados		
T0 [°C]	TC [°C]	Sub [°C]	Sup [°C]	m [kg/h]	m [kg/h]	Erro %
-10	40	4	6	516	517,1	-0,21
-10	40	6	6	507,8	508,5	-0,15
-10	40	8	6	500	500	0
-10	40	4	8	511,6	512,4	-0,17
-10	40	6	8	503,6	503,9	-0,06
-10	40	8	8	495,9	495,3	0,11
-10	40	4	10	507,3	507,8	-0,1
-10	40	6	10	499,4	499,2	0,03
-10	40	8	10	491,8	490,7	0,23
-10	40	4	12	503,1	503,1	-0,01
-10	40	6	12	495,4	494,6	0,17
-10	40	8	12	487,9	486	0,39
-10	45	4	6	537,9	538,5	-0,1
-10	45	6	6	528,8	529,9	-0,21
-10	45	8	6	520,2	521,3	-0,22
-10	45	4	8	533,1	533,8	-0,13
-10	45	6	8	524,3	525,2	-0,18
-10	45	6	10	519,8	520,6	-0,15
-10	45	8	10	511,4	512	-0,12
-10	45	4	12	523,9	524,5	-0,11
-10	50	4	6	562,2	559,8	0,43
-10	50	6	6	552,2	551,2	0,17

Fonte: O autor

**Tabela 3** – Continuação da tabela Validação da válvula modelo TE5-2 DANFOSS

Catálogo					Simulados	
T0 [°C]	TC [°C]	Sub [°C]	Sup [°C]	m [kg/h]	m [kg/h]	Erro %
-5	40	8	8	489,8	488,5	0,26
-5	40	4	10	500,9	501	-0,01
-5	40	6	10	493,2	492,4	0,16
-5	40	8	10	485,8	483,8	0,4
-5	40	4	12	496,6	496,3	0,06
-5	40	6	12	489,1	487,7	0,28
-5	40	8	12	481,8	479,2	0,54
-5	45	4	6	530,8	531,6	-0,16
-5	45	6	6	522	523,1	-0,21
-5	45	8	6	513,6	514,5	-0,18
-5	45	4	8	526,1	527	-0,17
-5	45	6	8	517,5	518,4	-0,18
-5	45	8	8	509,2	509,9	-0,13
-5	45	4	10	521,5	522,3	-0,16
-5	45	6	10	513	513,8	-0,15
-5	45	8	10	504,8	505,2	-0,08
-5	45	4	12	516,9	517,7	-0,15
-5	45	6	12	508,6	509,1	-0,1
-5	45	8	12	500,5	500,5	-0,01
-5	50	4	6	554,5	553	0,27
-5	50	6	6	544,7	544,4	0,05
-5	50	8	6	535,4	535,9	-0,09
-5	50	4	8	549,4	548,3	0,2
-5	50	6	8	539,8	539,8	0,01
-5	50	8	8	530,6	531,2	-0,11
-5	50	4	10	544,3	543,7	0,12
-5	50	6	10	534,9	535,1	-0,04
-5	50	8	10	525,8	526,5	-0,14
-5	50	4	12	539,4	539	0,07
-5	50	6	12	530,1	530,4	-0,07
-5	50	8	12	521,2	521,9	-0,13

Fonte: O autor

O condensador escolhido é o modelo Modelo padrão 099E, 12 pólos, 60 Hz; da marca McQuay - Heatcraft do Brasil Ltda, obtido pela tabela do catálogo mostrada no Anexo 4, foi obtida a Equação 12, que relaciona a temperatura de condensação ( $T_c$ ) e temperatura ambiente ( $T_{amb}$ ) com o calor rejeitado no condensador. Esse componente não necessitou de uma regressão linear para a obtenção de sua equação, sua equação foi obtida simplesmente com os dados de catálogo e uma adaptação da Equação 4, que evidencia o coeficiente  $F_{cond}$  em sua equação.

$$\dot{Q}_c = \frac{(3250 \cdot (t_c - t_{amb}))}{(860,61)} \text{ [kW]} \quad (12)$$

## 4.2 Condição de teste para o ciclo de refrigeração, estudo de caso

Após modelar essas equações no EES e aplicar os parâmetros de entrada, obtém-se a modelagem da condição de referência e com ela concluída, é possível simular as degradações nos componentes que irão reproduzir as condições reais de operação do sistema com degradações.

Para se iniciar essa etapa, é necessário aplicar degradações nas equações que governam o comportamento dos componentes do sistema, as equações obtidas por meio das regressões e apresentadas nas equações 9,10,11 e 12 são multiplicadas pelos coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\epsilon$ , e geram as equações 13 até a 16. Essas degradações são simuladas conforme são colocados valores de 0,85 (representando 15% de degradação) e 0,95 (representando 5% de degradação) nos coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\epsilon$  que multiplicam a Equação 13, Equação 14, Equação 15 e Equação 16. Ao modificar os coeficientes das equações 9 e 12, há uma alteração nos fatores  $F_{evap}$  e  $F_{cond}$ . O coeficiente  $F_{cond}$  representa o fluxo de calor por diferença de unidade de temperatura, ele é um coeficiente obtido ao se manipular algebricamente a equação de transferência de calor do condensador para ser calculada em termos da temperatura de condensação e temperatura ambiente, ele também é conhecido como fator de troca de calor do condensador, o  $F_{evap}$  tem o significado análogo ao  $F_{cond}$  quando se analisa a Equação 9, ambos são usuais em catálogos de fabricantes (MONTEIRO et al., 2005). O  $F_{evap}$  da Equação 9 e o  $F_{cond}$  da Equação 12 são os valores que multiplicam as diferenças de temperaturas dessas equações.

$$\dot{Q}o' = \alpha \cdot \dot{Q}o \quad (13)$$

$$\dot{Q}c' = \beta \cdot \dot{Q}c \quad (14)$$

$$\dot{W}' = \dot{W} / \gamma \quad (15)$$

$$\dot{m}' = \varepsilon \cdot \dot{m} \quad (16)$$

Foram utilizados valores de 0,95 e 0,85, eles foram substituídos nos coeficientes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\varepsilon$ , para 5% de degradação e 15% de degradação, respectivamente, nos casos de degradação simulados nesse TCC, os casos de 15% de degradação estão mostrados nos apêndices.

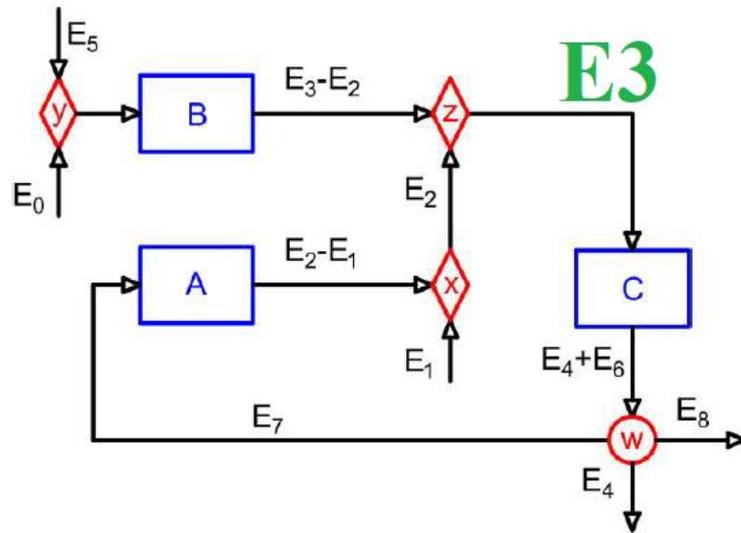
A Equação 15 se difere das demais pelo fato de degradações no compressor aumentarem o consumo de potência e se o coeficiente  $\gamma$  estivesse multiplicando a Equação 10 isso não aconteceria, haveria um valor menor para o consumo de potência elétrica ao substituir o coeficiente  $\gamma$  por números de 0 a 1. Com a simulação dos casos de teste, pode-se alimentar as estruturas produtivas das seções seguintes.

### **4.3 Elaboração da estrutura produtiva, da avaliação termoeconômica e dos resultados do diagnóstico termoeconômico.**

A etapa seguinte tem a finalidade de expressar os objetivos produtivos dos componentes do sistema, isto é, evidenciar e quantificar os fluxos exergéticos que transitam entre os componentes sob a óptica produtiva, para lidar com esses fluxos tomando-os como produtos e insumos de cada componente, ao invés de fluxos físicos (OROZCO, 2017). Isso é feito aplicando os dados da condição de referência e a de degradações na estrutura produtiva e posteriormente analisando como se dão essas interações. Nos variados estudos que serviram para o embasamento deste, constata-se que não existe uma forma generalizada de estrutura produtiva, cada projeto lida com ela de uma forma distinta. Apesar de na maior parte dos casos haver a conservação das etapas de modelagem anteriores, sendo essas feitas de forma similar umas às outras, a estrutura produtiva pode se diferir tanto na forma, como nas etapas que a constituem.

Ao se estabelecer as estruturas produtivas, por meio da modificação do ciclo da Figura 2, evidenciando-se os fluxos exergéticos (produtivos), como mostrado na Figura 3, é possível elaborar os cálculos nas estruturas de modo a se direcionar a etapa que antecede a realização do diagnóstico, a avaliação termoeconômica. Todos procedimentos apresentados para essa etapa serão aplicados às duas estruturas produtivas, a de diagnóstico convencional e a de operadores exergéticos, essa última possui algumas etapas adicionais que antecedem o diagnóstico. A avaliação se desenvolve em algumas etapas algébricas, a começar pela definição da matriz de produtos-insumos-resíduos, chamada de matriz F-P-R (OROZCO, 2017). Essa matriz é construída avaliando as interações entre os componentes, a exemplo da estrutura produtiva hipotética da Figura 3, em que o componente fictício Z entrega seu produto ao componente C, o fluxo E3. Ao sair de um componente, o fluxo é tomado como um produto e ao entrar em um componente ele é tomado como insumo. São acrescentados componentes fictícios nessas estruturas, como as juntas e as bifurcações, de modo a fazer operações algébricas com os fluxos e os acrescentar como produtos e insumos para os componentes. Esses componentes fictícios são representados pelas letras v, w, x, y e z, na Figura 3.

**Figura 3** - Diagrama de uma estrutura produtiva hipotética para representar o fluxo E3 sob a óptica de produtos e insumos.



Fonte: Orozco (2017)

Na matriz a ser elaborada, mostrada na Figura 4, na linha correspondente ao produto de Z, deve-se contabilizar que este está sendo entregue para C e esse produto será um insumo de C, sendo assim contabilizado na coluna de insumos referente ao componente C. O Fluxo E3 é mostrado de amarelo na posição correspondente à um produto de Z e um insumo de C (OROZCO, 2017).

**Figura 4** - Matriz de insumos e produtos evidenciando o fluxo do exemplo tratado.

		Insumos								$P_i = \sum P_{ij}$
		F0	FA	FB	<b>FC</b>	FW	FX	FY	FZ	
Produtos	P0	0	0	0	0	0	E <sub>1</sub>	E <sub>0</sub> +E <sub>5</sub>	0	E <sub>0</sub> +E <sub>1</sub> +E <sub>5</sub>
	PA	0	0	0	0	0	E <sub>2</sub> -E <sub>1</sub>	0	0	E <sub>2</sub> -E <sub>1</sub>
	PB	0	0	0	0	0	0	0	E <sub>3</sub> -E <sub>2</sub>	E <sub>3</sub> -E <sub>2</sub>
	PC	0	0	0	0	E <sub>4</sub> +E <sub>6</sub>	0	0	0	E <sub>4</sub> +E <sub>6</sub>
	PW	E <sub>4</sub> +E <sub>8</sub>	E <sub>7</sub>	0	0	0	0	0	0	E <sub>4</sub> +E <sub>7</sub> +E <sub>8</sub>
	PX	0	0	0	0	0	0	0	E <sub>2</sub>	E <sub>2</sub>
	PY	0	0	E <sub>0</sub> +E <sub>5</sub>	0	0	0	0	0	E <sub>0</sub> +E <sub>5</sub>
	<b>PZ</b>	0	0	0	<b>E<sub>3</sub></b>	0	0	0	0	E <sub>3</sub>
$F_i = \sum F_{ji}$	E <sub>4</sub> +E <sub>8</sub>	E <sub>7</sub>	E <sub>0</sub> +E <sub>5</sub>	E <sub>3</sub>	E <sub>4</sub> +E <sub>6</sub>	E <sub>2</sub>	E <sub>5</sub> +E <sub>0</sub>	E <sub>3</sub>		

Fonte: Orozco (2017)

A partir desse ponto são usadas as equações para a avaliação termoeconômica que segundo Orozco (2017) e pela própria literatura do diagnóstico, são historicamente usadas para o a avaliação termoeconômica e consequente diagnóstico pela maior parte dos estudiosos do ramo. Ao se definir os produtos e insumos do sistema, pela matriz mostrada na Figura 4, deve-se calcular o consumo exergético unitário dos recursos e de resíduos de cada componente, calculados pelas expressões 17 e 18, em que F representa um insumo, P representa um produto e R representa um resíduo (OROZCO, 2017).

$$k_j = \frac{F_j}{P_j} \quad (17)$$

$$\theta_j = \frac{R_j}{P_j} \quad (18)$$

Pode-se avaliar esses consumos exergéticos em forma matricial, atribuindo ao  $k_j$  a matriz KP e para o  $\theta_j$  a matriz KR, essas representadas por  $[K_P]$  e  $[K_R]$  na Equação 19. É preciso logo em seguida estabelecer a matriz diagonal unitária  $U_D$  para se estabelecer o produto de cada componente, pela Equação matricial 19 (OROZCO, 2017). Em que  $P_s$  indica como cada dispositivo afeta a produção global do ciclo.

$$P = (U_D - [K_P] - [K_R])^{-1} * P_s \quad (19)$$

Deve-se ainda calcular os operadores de produto, irreversibilidades e resíduos mostrados nas equações 20, 21 e 22, em que:  $|P$  representa a matriz referente ao operador de produtos;  $|I$  representa o operador de irreversibilidades;  $|R$  representa o operador de resíduos,  $[K_D]$  representa o vetor que carrega os consumos exergéticos unitários de cada componente e os demais termos:  $U_D$ ,  $[K_P]$  e  $[K_R]$  já foram apresentados anteriormente.

$$|P = (U_D - [K_P] - [K_R])^{-1} \quad (20)$$

$$|I = ([K_D] - U_D) * |P \quad (21)$$

$$|R = ([K_R]) * |P \quad (22)$$

Através das equações 21 e 22, obtém-se os coeficientes de irreversibilidades  $\phi$  e o de resíduos  $\psi$ , que representam o quanto é gasto de irreversibilidades e resíduos para se gerar uma unidade de produtos em cada componente analisado. E com esses coeficientes pode-se calcular o consumo exergético unitário dos produtos em cada componente, representado pela Equação 23 (OROZCO, 2017).

$$k_{P,i}^* = 1 + \sum_{j=1}^n (\phi_{ji} + \psi_{ji}) \quad (23)$$

Todas essas etapas desenvolvidas na avaliação termoeconômica devem ser tomadas com os dados da condição de referência e a de degradações, ao realizar esses procedimentos, é possível analisar os desvios entre essas condições, havendo assim a formulação do diagnóstico. Isso é iniciado ao calcular os desvios das matrizes KP e KR, quando se compara a aplicação delas com os valores na condição de degradações, representada pelo subíndice *real*, com a condição de referência, representada pelo subíndice *ref* (OROZCO, 2017). Nas equações 24 e 25:

$$\Delta[K_p] = [K_p]_{real} - [K_p]_{ref} \quad (24)$$

$$\Delta[K_R] = [K_R]_{real} - [K_R]_{ref} \quad (25)$$

Um outro fator a ser quantificado pelo diagnóstico são as anomalias (MF), calculadas na Equação 26, estas qualificadas pela variação dos fatores  $k$  e  $\theta$ , das equações 17 e 18 com o coeficiente  $P_i(x_0)$ , essa combinação indica como estes fatores influenciam na formação de anomalias do ciclo (OROZCO, 2017).

$$MF_{ji} = \sum_{j=0}^n (\Delta k_{ji} + \Delta \theta_{ji}) P_i(x_0) \quad (26)$$

Além das anomalias, deve-se calcular as disfunções (DF) dos componentes, sendo essa calculada em função das equações 21,22 e 26 (OROZCO, 2017). Como mostrado na equação 27:

$$DF = (|I - |R) * MF \quad (27)$$

O procedimento final a ser calculado para que haja a constatação do diagnóstico termoeconômico é o cálculo do impacto no consumo de combustíveis (OROZCO, 2017). Sendo este avaliado em dependência do somatório de anomalias e disfunções, como mostrado na Equação 28 (VALERO; SERRA; UCHE, 2006).

$$\Delta F_T = \sum_{i=1}^n (MF_i + DF_i) \quad (28)$$

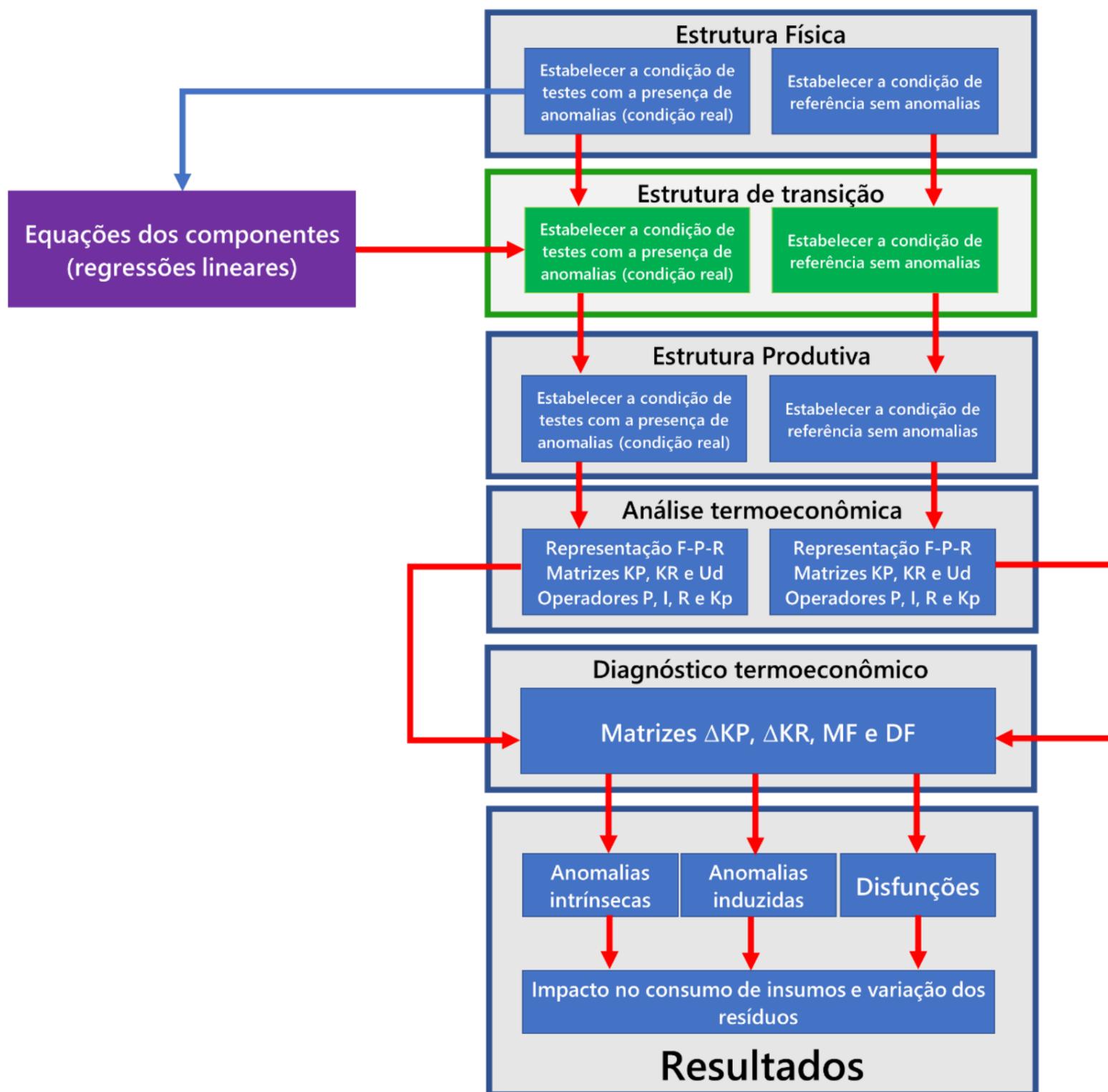
Ao finalizar todos esses procedimentos, mediante esses resultados é gerado o conhecimento do comportamento do sistema necessário para a realização do diagnóstico termoeconômico.

#### 4.4 Elaboração da estrutura de transição e estrutura produtiva para o diagnóstico com operadores exergéticos

No presente projeto, há a aplicação do conceito de operadores exergéticos proposto por Orozco (2017) para a distinção dos tipos de anomalias presentes no sistema, isso se traduz na aplicação de outra metodologia de diagnóstico para o sistema simulado. Uma explicação detalhada dos operadores exergéticos é encontrada no trabalho de Orozco (2017), uma breve explicação será discutida nessa seção. Além do modelo de diagnóstico convencional, discutido nas seções anteriores e que também gerará resultados para a análise, será aplicado o modelo de diagnóstico convencional com o acréscimo dos operadores exergéticos, esse será apresentado nessa seção. Com exceção da expansão dos resultados do diagnóstico promovidas por essa metodologia, a distinção das anomalias entre intrínsecas e induzidas, e das mudanças na sequência de eventos para elaboração do diagnóstico, mostrado na Figura 5, não há mudança nos equacionamentos para a avaliação termoeconômica e diagnóstico propostos pelos procedimentos das seções anteriores, a discussão desses últimos não será repetida.

Para o uso dos operadores se faz necessária a elaboração da estrutura de transição antes da conversão do sistema de seu domínio termodinâmico para o seu domínio produtivo, ela foi proposta pelo mesmo autor, onde há algumas modificações na sequência de eventos que antecedem o diagnóstico, quando se compara a Figura 1 com a do fluxograma desse processo, mostrado na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma das etapas necessárias para os resultados do diagnóstico usando Operadores exergéticos



Na estrutura produtiva do modelo de diagnóstico com operadores exergéticos há a alocação dos operadores exergéticos, em síntese, são componentes fictícios que tem o intuito de comparar o comportamento da saída real de um componente com relação à sua condição de referência, por meio de uma análise com sua condição real esperada, essa é obtida nesse trabalho usando a alimentação de dados fornecida pelas equações oriundas das regressões lineares dos componentes, ele fornece a perspectiva dos desvios exergéticos presentes entre essas condições conforme há degradações no sistema. A etapa de alimentação das equações das regressões lineares é ilustrada na Figura 5. O propósito de captação das anomalias do operador exergético é representado pela cor verde na Figura 6

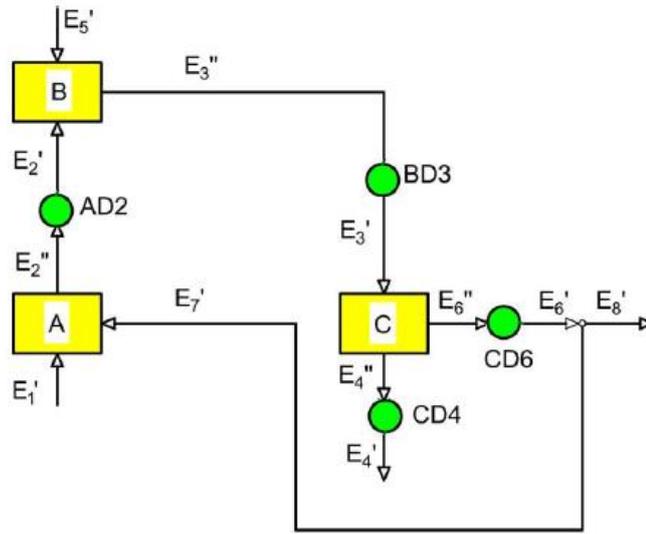
**Figura 6 - Ilustração do propósito de um operador exergético**



Fonte: Orozco (2017)

Ao se alocar os operadores exergéticos para analisar a exergia dos fluxos de saída entre a condição sem anomalias e a condição com anomalias de cada componente, é construída a estrutura de transição. Uma estrutura de transição hipotética é mostrada na Figura 3, em que os componentes do ciclo são representados pelos quadrados amarelos, os fluxos exergéticos são representados pelos E' e E'' e os operadores exergéticos são representados pelos círculos verdes.

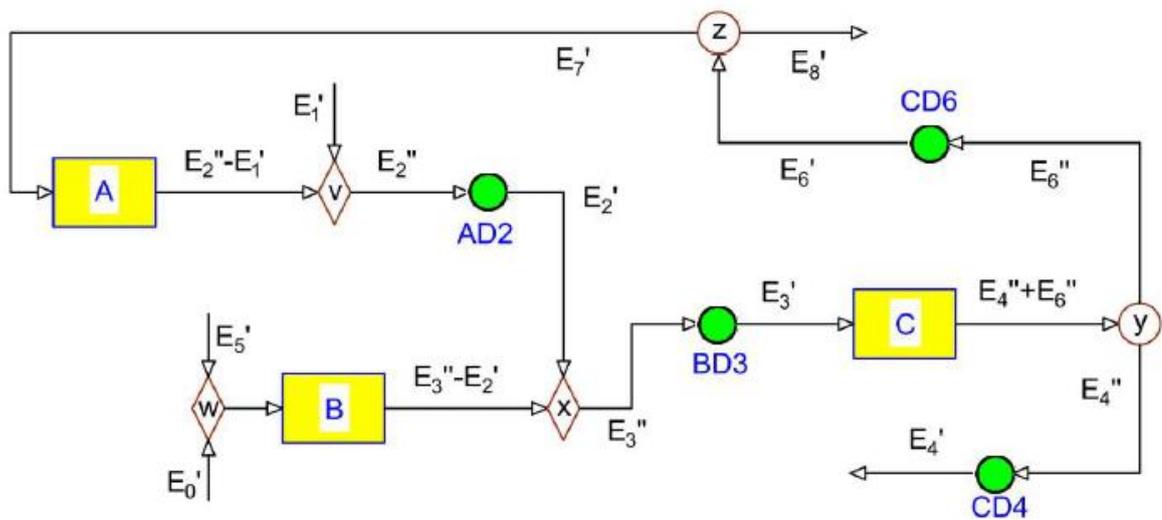
**Figura 7** - Diagrama da estrutura de transição hipotética



Fonte: Orozco (2017)

A partir da estrutura de transição, é possível escolher e desenvolver a metodologia de estrutura produtiva a ser trabalhada. Nesse projeto foi utilizada a de diagnóstico convencional, acrescentando-se os operadores exérgicos, ambas foram discutidas em Orozco (2017). Além das juntas e bifurcações, representadas pelas letras v, w, x, y e z no diagrama mostrado da Figura 8, nota-se a presença dos operadores exérgicos, em verde

**Figura 8** - Diagrama da estrutura produtiva de exergia total utilizando os operadores exérgicos



Fonte: Orozco (2017)

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Estudos de caso

Aplicando-se os procedimentos estabelecidos nas seções anteriores, obteve-se os resultados que possibilitaram analisar o ciclo de refrigeração por compressão de vapor sob a óptica do diagnóstico termoeconômico. Os primeiros resultados a serem avaliados foram os resultados obtidos no EES para a simulação da condição de referência; para a condição real com degradações, aqui referida como condição de teste; e os resultados da breve simulação da condição real esperada, sendo essa tomada como a situação real em que o componente não operaria com degradações, essa última é utilizada para o propósito comparativo do operador exergético em cada componente. Não há a necessidade da simulação da condição de referência esperada no EES, para que se colham os resultados relativos a essa condição, pois os fluxos da condição de referência esperada podem ser tomados como iguais aos da condição de referência, já que não há a presença de anomalias nesse caso.

Usando da Equação 3 até a Equação 12, em conjunto com as equações baseadas na termodinâmica e as condições de operação estabelecidas, foi obtido os parâmetros da condição de referência, que serão mostrados na Tabela 4 e Tabela 5. Na Tabela 4, encontram-se os dados de entrada usados para a condição de referência do sistema simulado no EES. Nela encontram-se os dados relativos à carga frigorífica, a pressão ambiente, variação de superaquecimento ( $\Delta\text{Sup}$ ), a variação de subresfriamento ( $\Delta\text{Sub}$ ), temperatura de câmara ( $T_{\text{cam}}$ ) e temperatura ambiente ( $T_{\text{amb}}$ ), adotados para o sistema simulado.

**Tabela 4** – Valores obtidos no EES na condição de referência para os principais parâmetros do sistema

<b>Pressão ambiente [kPa]</b>	<b><math>\Delta\text{Sup}</math> [°C]</b>	<b><math>\Delta\text{Sub}</math> [°C]</b>	<b><math>T_{\text{cam}}</math> [°C]</b>	<b><math>T_{\text{amb}}</math> [°C]</b>	<b>Carga Frigorífica [kW]</b>
101,3	10	5	-2	32	23,15

Fonte: O autor

Alguns dos principais dados da condição de referência para o ciclo no EES estão expostos na Tabela 5. Além deles há a exergia relacionada ao consumo elétrico calculado para o compressor,  $E_{wele}$ , de 7,77 kW e as exergias associadas às taxas de transferência de calor do condensador e evaporador,  $E_{qcond}$  e  $E_{qevap}$ , de 0,71 kW e 2,31 kW respectivamente, e coeficiente de performance, COP de 2,97. Esses fluxos serão alguns dos fluxos de produtos e insumos presentes na estrutura produtiva.

**Tabela 5** – Valores obtidos no EES na condição de referência para os principais parâmetros do sistema

<b>Pontos</b>	<b>Pressão [kPa]</b>	<b>Temperatura [°C]</b>	<b>Entalpia [kJ/kg]</b>	<b>Entropia [kJ/kg K]</b>	<b>Exergia [kW]</b>
<b>1</b>	365,7	2,32	409,5	1,79	5,06
<b>2</b>	1541	96,06	465,5	1,84	10,81
<b>3</b>	1464	35,19	243,3	1,15	8,80
<b>4</b>	384,9	-7,68	243,3	1,16	8,07

Fonte: O autor

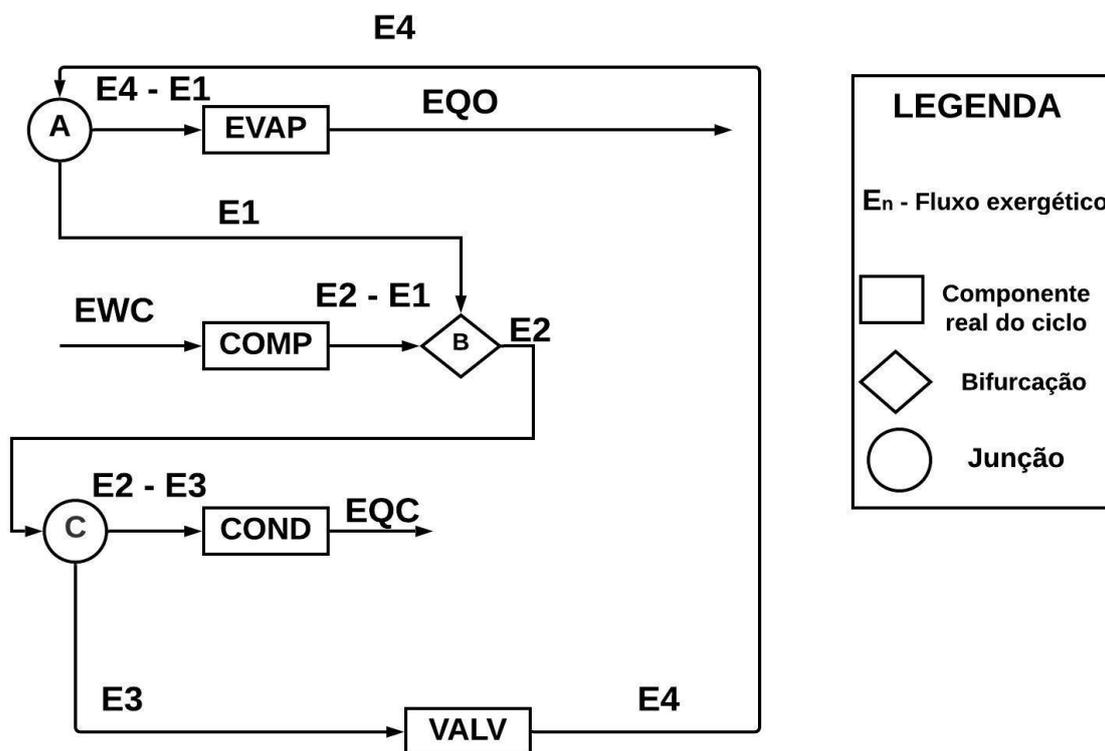
Além dos dados que não irão ser expostos aqui, há os demais parâmetros que podem ser conferidos no código do apêndice A, juntamente com os procedimentos para os cálculos dos mesmos e sua consequente aplicação nas estruturas produtivas.

## 5.2 Resultados da elaboração das estruturas produtivas dos modelos de diagnóstico de exergia total e exergia total com operadores exergeticos.

Diante dos dados já estabelecidos para os dois modelos, mostrados nas seções anteriores, foi possível elaborar a estrutura produtiva do modelo de diagnóstico convencional, a estrutura de transição do modelo de operadores exergeticos e a estrutura produtiva do modelo de operadores exergeticos. A aplicação das etapas propostas na metodologia para as condições de entrada gerou os resultados dos fluxos necessários para a definição dessas estruturas.

Na Figura 9 encontra-se a estrutura produtiva para o modelo de diagnóstico convencional, nele é possível ver alguns dos fluxos calculados para as condições de entrada, como as exergias para os pontos do ciclo.

**Figura 9** - Diagrama da estrutura produtiva do modelo de exergia total para o diagnóstico convencional

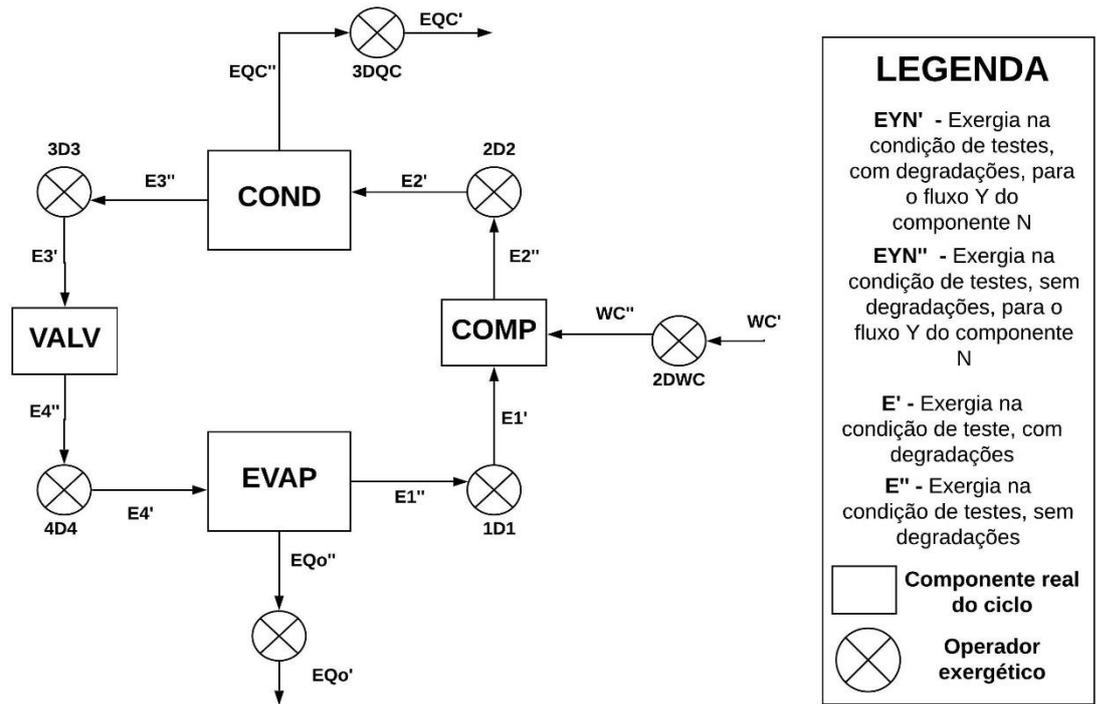


Fonte: O autor

No entanto, o outro modelo exige a criação de uma estrutura de transição, essa estrutura foi elaborada ao se modificar o ciclo da Figura 2, seguindo a metodologia proposta por Orozco (2017). De modo a tornar visível como os operadores exergeticos irão ser acrescentados na

estrutura e irão levá-la para o domínio termoeconômico ela é mostrada na Figura 10. Ela tem o propósito de facilitar a elaboração da estrutura produtiva, pois propõe o início da alocação dos operadores exergéticos entre os componentes reais do ciclo.

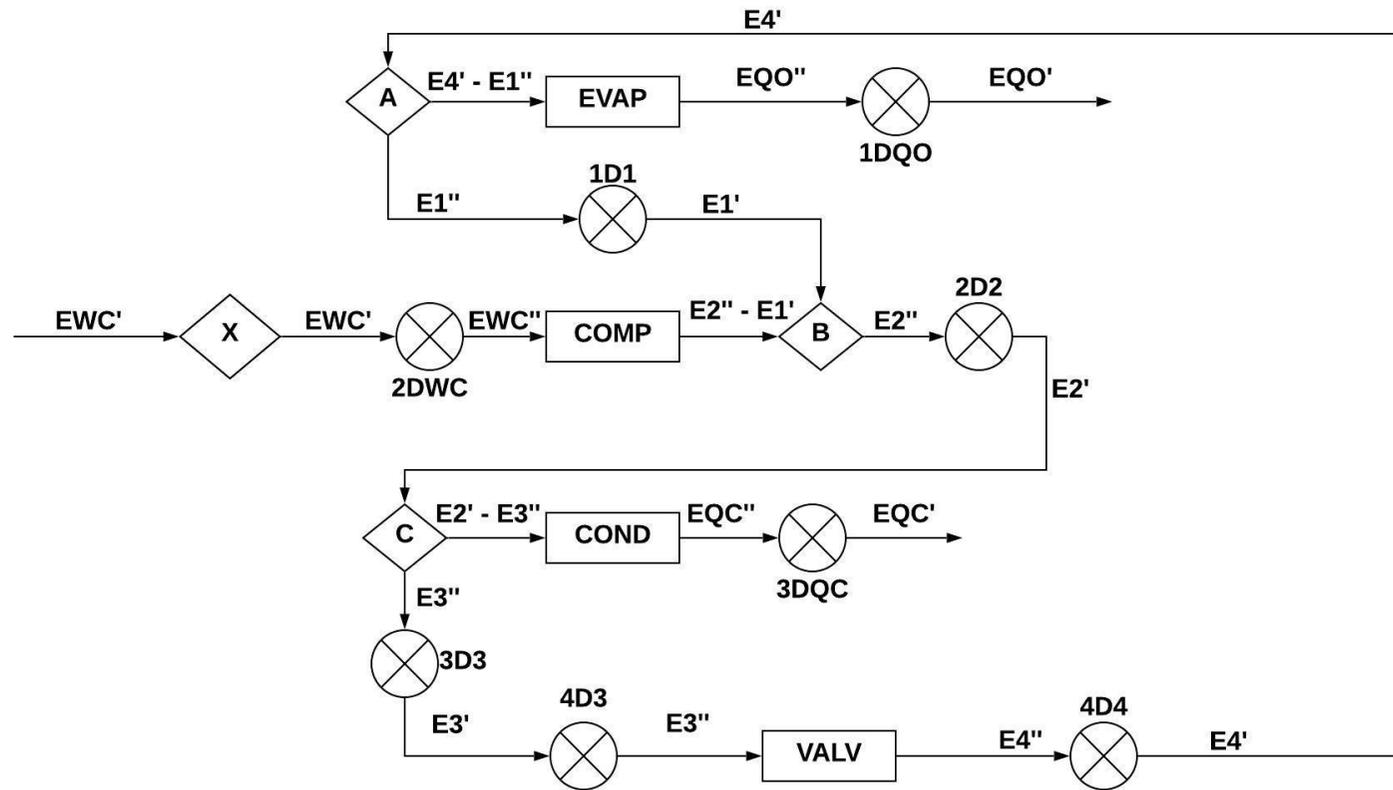
**Figura 10** - Estrutura de transição do ciclo de refrigeração por compressão de vapor



Fonte: O autor

A partir dessa estrutura de transição, pode ser elaborada a estrutura produtiva do modelo de exergia total com operadores exergéticos, ela é mostrada na Figura 11. Nessa estrutura produtivas também é possível visualizar o emprego dos fluxos calculados na seção 5.1.

Figura 11 - Diagrama da estrutura produtiva do modelo de exergia total com operadores exergéticos



**LEGENDA**

$EYN'$  - Exergia na condição de testes, com degradações, para o fluxo Y do componente N

$EYN''$  - Exergia na condição de testes, sem degradações, para o fluxo Y do componente N

$E'$  - Exergia na condição de teste, com degradações

$E''$  - Exergia na condição de testes, sem degradações

Componente real do ciclo

Operador exergético

Bifurcação

Fonte: O autor

Após criar as estruturas produtivas e realizar os procedimentos propostos na metodologia, calcula-se as matrizes dos procedimentos mostrados na mesma. Na seção seguinte serão abordados os casos de teste do EES, que foram alimentados no equacionamento da estrutura produtiva presente no EXCEL, para a avaliação do diagnóstico.

### **5.3 Casos de degradação simulados para a condição de teste**

As condições de teste para o sistema de refrigeração simulado no EES se basearam em degradações, de 5% e 15% no fator de troca de calor do evaporador, no fator de troca de calor do condensador, na eficiência do compressor e fator de fluxo da válvula. Foram simuladas todas as combinações possíveis para cada porcentagem de degradação, isto é, as inúmeras condições de operação do sistema em que pelo menos um dos componentes opera com degradações. O motivo pelo qual o componente opera com a anomalia intrínseca não faz parte do escopo desse projeto, é feita a análise apenas da situação em que ele está degradado, da forma com que ele influencia os demais componentes e da forma com que essas relações entre os componentes impactam no consumo adicional de insumos e geração de resíduos.

Na Tabela 6 e Tabela 7, são mostrados os casos simulados para cada porcentagem de degradação dos componentes do sistema, em que o X representa os componentes operando com perda de eficiência naquele caso. Conforme mencionado, esses casos partem desde os casos 1,2,3 e 4, em que se simula somente um dos componentes tendo essas degradações, até o caso 15, em que se simula todos os componentes tendo degradações, esses casos foram repetidos para simulações de 5 e 15 % de degradação. Os cenários com 15% de degradação estão presentes no apêndice B.

**Tabela 7** – Componentes afetados por degradações de 5%

<b>Casos</b>	<b>Evaporador</b>	<b>Condensador</b>	<b>Compressor</b>	<b>Válvula de expansão termostática (VET)</b>
1	X			
2		X		
3			X	
4				X
5	X	X		
6	X		X	
7	X			X
8		X	X	
9		X		X
10			X	X
11	X	X	X	
12	X	X		X
13	X		X	X
14		X	X	X
15	X	X	X	X

Fonte: O autor

**Tabela 6** – Componentes afetados por degradações de 15%

<b>Casos</b>	<b>Evaporador</b>	<b>Condensador</b>	<b>Compressor</b>	<b>Válvula de expansão termostática (VET)</b>
1	X			
2		X		
3			X	
4				X
5	X	X		
6	X		X	
7	X			X
8		X	X	
9		X		X
10			X	X
11	X	X	X	
12	X	X		X
13	X		X	X
14		X	X	X
15	X	X	X	X

Fonte: O autor

## **5.4 Aplicação do diagnóstico convencional e diagnóstico com operadores exergéticos ao ciclo de refrigeração, estudo de caso**

Ao avaliar o diagnóstico termoeconômico convencional - estudo de caso, os resultados mostraram que esse diagnóstico, embora consiga calcular os impactos no consumo de combustíveis para todos os equipamentos do sistema, não consegue mostrar quais equipamentos possuem anomalias intrínsecas. De acordo com esses resultados, o que foi feito é o uso de outra metodologia de diagnóstico, a de operadores exergéticos, e essa conseguiu identificar os equipamentos em que estão ocorrendo anomalias intrínsecas. A partir da seção 5.4.1, são mostrados os resultados obtidos tanto da aplicação da metodologia de diagnóstico convencional, como da metodologia de operadores exergéticos e uma comparação das duas metodologias para cada um dos casos com anomalias intrínsecas.

### **5.4.1 Simulações envolvendo anomalias intrínsecas em um componente**

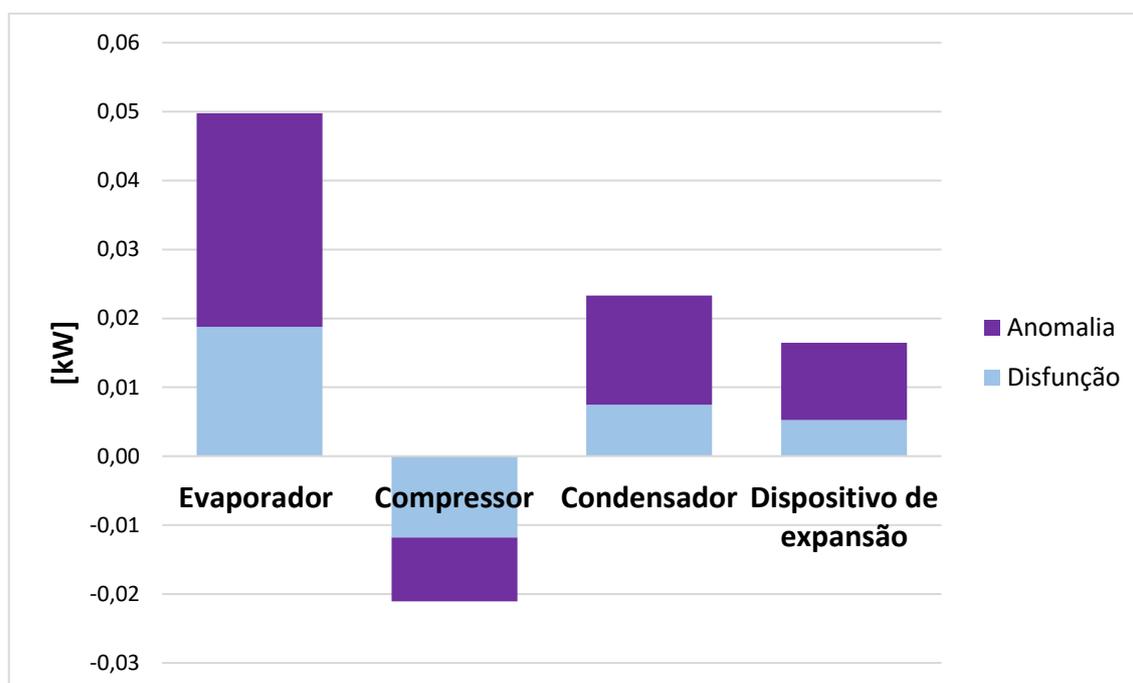
Com a aplicação das etapas propostas na metodologia para os dados do sistema mostrados nas seções anteriores, chega-se nos resultados dos diagnósticos propostos nesse trabalho. Para uma análise da profundidade do diagnóstico foi necessário trabalhar com todas as combinações possíveis de anomalia intrínseca afetando cada componente, no entanto, essa discussão se atém aos casos simulados mais relevantes, os demais casos simulados estão presentes nos apêndices.

Nas Figuras 12 até a 19, mostra-se casos em que se analisa a resposta da câmara frigorífica sob a perspectiva do diagnóstico convencional, ao simular-se a degradação de um único componente para 5% de queda em sua eficiência de operação. A leitura que se faz de cada um desses gráficos é de como há a distribuição de degradações entre cada componente do ciclo ao se simular uma determinada anomalia, isto é, como cada componente é afetado por essa degradação e a forma com que ele é afetado em termos de consumo de energia elétrica adicional em kW, seja ela representada por uma anomalia ou uma disfunção. Em outras palavras, ele mostra a magnitude do consumo elétrico adicional causado por cada tipo de degradação e a forma com que essas degradações se manifestam em cada componente.

É importante ressaltar que o operador exergético permite a expansão da análise das anomalias entre intrínsecas e induzidas, essas somadas às disfunções, permitem identificar se o componente afetado teve essa queda de desempenho gerada pela influência de um componente posterior a ele no ciclo, um anterior ou se ele mesmo operou com degradações e influenciou o restante do sistema a ter consumos adicionais. Diferentemente do diagnóstico convencional, que será discutido primeiramente e que não faz uso dos operadores exergéticos, ele classifica o sistema somente com anomalias e disfunções e limita a profundidade de análise do diagnóstico.

Na Figura 12 mostra-se o caso em que há a simulação de 5% de degradação no evaporador e há a análise usando o diagnóstico convencional.

**Figura 12 - Caso 1 – Simulação de 5% de degradação no evaporador e análise usando o diagnóstico convencional**



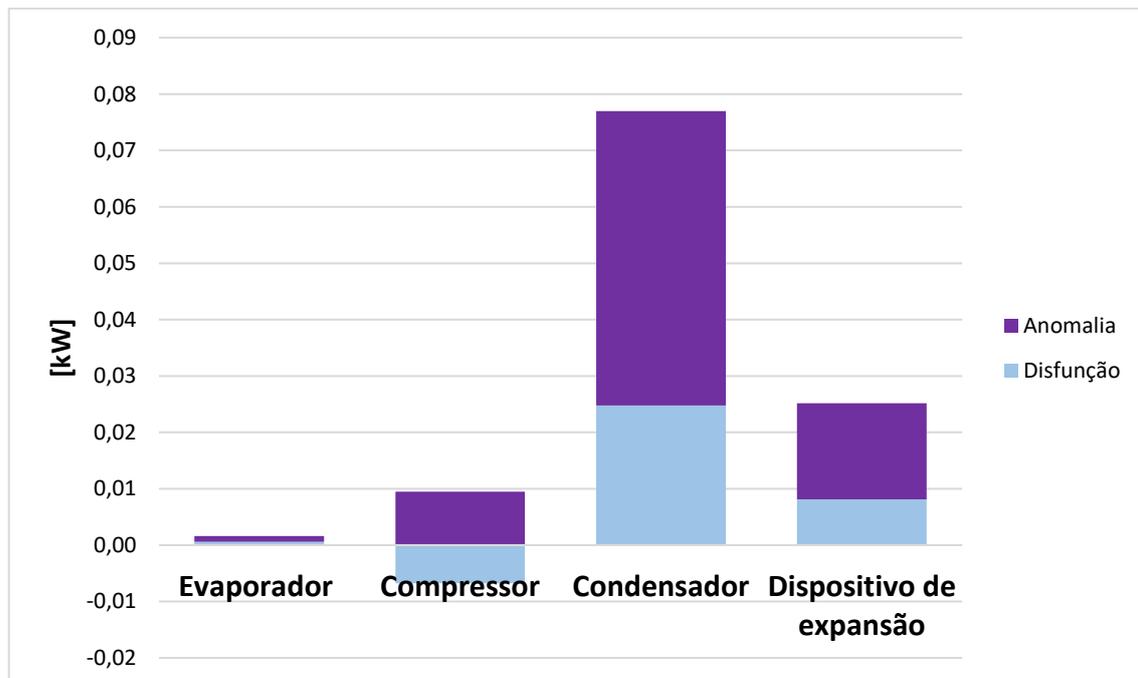
Fonte: O Autor

Verifica-se na Figura 12 que a simulação de 5% de degradação na Equação 9, correspondente ao evaporador, obriga o sistema a operar sob uma nova condição e gera degradações em todos os componentes do ciclo. Anomalias positivas, segundo Orozco (2017), indicam perda de eficiência de operação do componente e aumento no consumo de insumos, disfunções positivas indicam queda na geração de produtos e um maior consumo

de energia elétrica, as anomalias tem relação com o consumo adicional gerado pelos insumos e as disfunções com o consumo adicional gerado pelas necessidades dos produtos. Nota-se anomalias e disfunções negativas no compressor, esses resultados indicam que na condição de testes o compressor gera menos produtos conforme consome menos insumos, isso representado pelas disfunções, e suas anomalias negativas indicam que ele está sendo mais eficiente do que na condição de referência, o insumo consumido por ele é menor, isso é indicado pelas anomalias. O evaporador carrega a maior parte dos efeitos das degradações, é o de maior coluna no gráfico.

Na Figura 13 mostra-se o caso em que há a simulação de 5% de degradação no condensador e há a análise usando o diagnóstico convencional.

**Figura 13** - Caso 2 – Simulação de 5% de degradação no condensador e análise usando o diagnóstico convencional



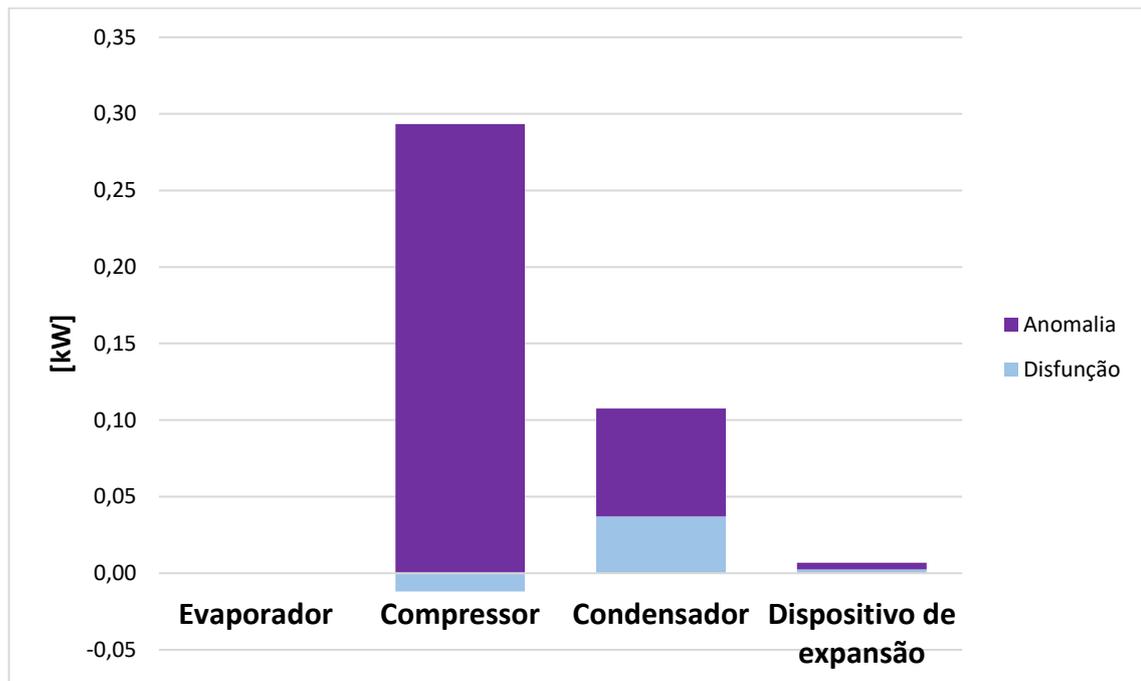
Fonte: O Autor

Efeitos similares ao caso anterior podem ser notados na Figura 13, como o condensador sendo o componente com maior magnitude de degradações, por possuir a maior coluna no gráfico, componentes sendo afetados com disfunções positivas e negativas, como o compressor que também terá uma redução na geração de produtos e redução no consumo de energia elétrica, por possuir uma disfunção negativa. No entanto, nota-se que o

evaporador não possui degradações, isto é, ele não é afetado em seu comportamento por degradações de 5% no condensador.

Na Figura 14 mostra-se o caso em que há a simulação de 5% de degradação no compressor e há a análise usando o diagnóstico convencional.

**Figura 14** - Caso 3 – Simulação de 5% de degradação no compressor e análise usando o diagnóstico convencional

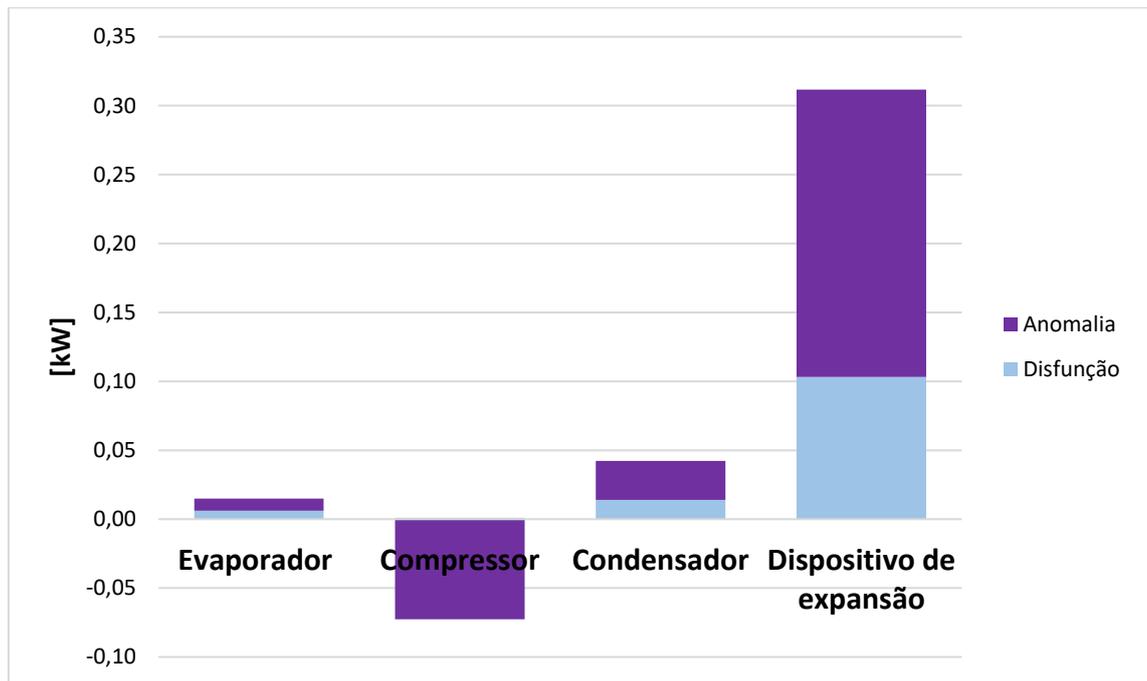


Fonte: O Autor

Na Figura 14, observa-se que 5% de degradação no compressor tem efeitos negativos somente no próprio compressor e no condensador, esse último é levado a consumir mais insumos, pela presença anomalias induzidas, e é levado a gerar mais produtos, pela presença de disfunções, ao se submeter nessa condição ele consome assim mais eletricidade.

Na Figura 15 mostra-se o caso em que há a simulação de 5% de degradação na válvula de expansão termostática e há a análise usando o diagnóstico convencional.

**Figura 15** - Caso 4 – Simulação de 5% de degradação na válvula de expansão termostática e análise usando o diagnóstico convencional

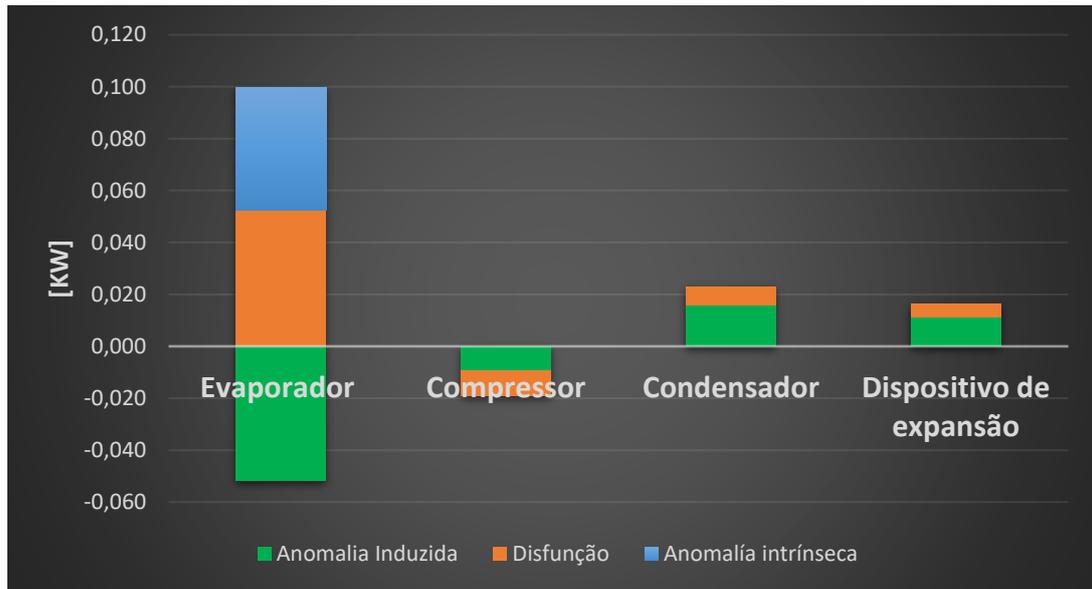


Fonte: O Autor

Constata-se na Figura 15, que uma degradação de 5% na válvula termostática afeta todos os componentes, além dela mesma, nota-se que o compressor é afetado em maior intensidade com uma anomalia negativa, o que indica que ele está requisitando menos insumos nessa condição de operação com degradações, quando comparado com a condição de referência. Os demais componentes, com anomalias e disfunções positivas tem uma exigência maior de insumos e de geração de produtos, pela presença de anomalias e disfunções respectivamente, essa nova exigência se traduz em consumo de energia elétrica adicional.

Na Figura 16 mostra-se o caso em que há a simulação de 5% de degradação no evaporador e há a análise usando o diagnóstico termoeconômico com operadores exergeticos.

**Figura 16** - Caso 1 – Simulação de 5% de degradação no evaporador e análise usando o diagnóstico termoeconômico com operadores exergeticos

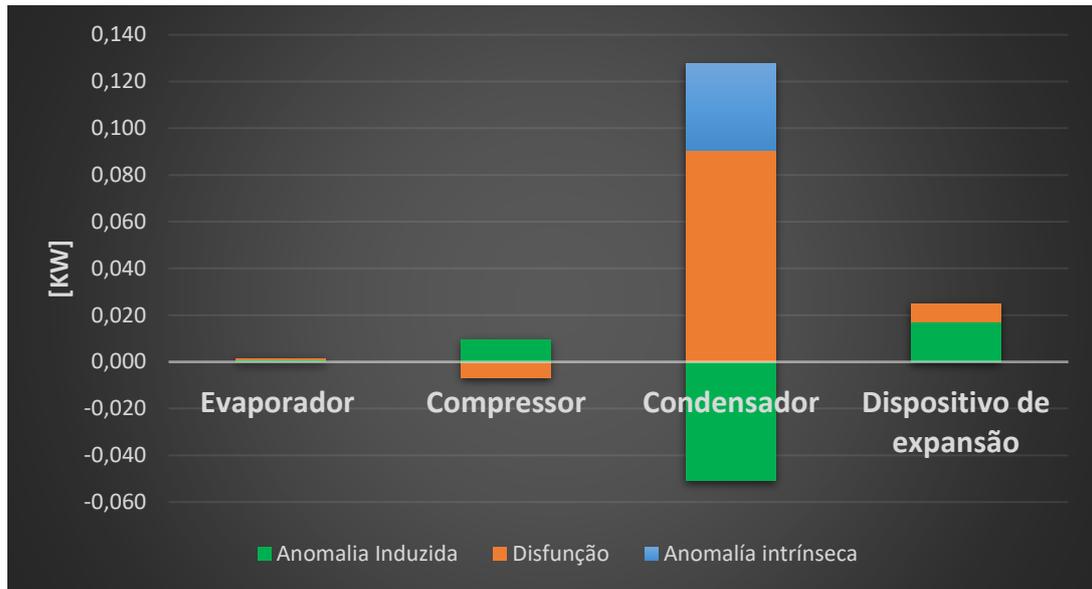


Fonte: O Autor

Constata-se na Figura 16, primeiro caso de análise de degradações com os operadores exergeticos, que o evaporador exibe o tipo de degradação chamado de anomalia intrínseca, essa é a anomalia contabilizada ao simular a degradação na equação desse componente. A presença das anomalias intrínsecas permite atribuir o consumo adicional de insumos também à própria deficiência de operação do componente, diferentemente dos casos anteriores, em que a anomalia não era diferenciada entre intrínseca e induzida. Além disso, diferentemente da Figura 12, essa atribui uma anomalia induzida negativa para o Evaporador, indicando que ele também possui um efeito de diminuição de consumo de insumos nessa condição de operação e apresenta uma disfunção, uma necessidade de maior geração de produtos e um consumo adicional de eletricidade como consequência. As anomalias induzidas são causadas pela influência da operação de componentes anteriores no ciclo e as disfunções por componentes posteriores no ciclo. Os demais componentes possuem efeitos similares aos da Figura 12.

Na Figura 17 mostra-se o caso em que há a simulação de 5% de degradação no condensador e há a análise usando o diagnóstico termoeconômico com operadores exergeticos.

**Figura 17** - Caso 2 – Simulação de 5% de degradação no condensador e análise usando o diagnóstico termoeconômico com operadores exergeticos

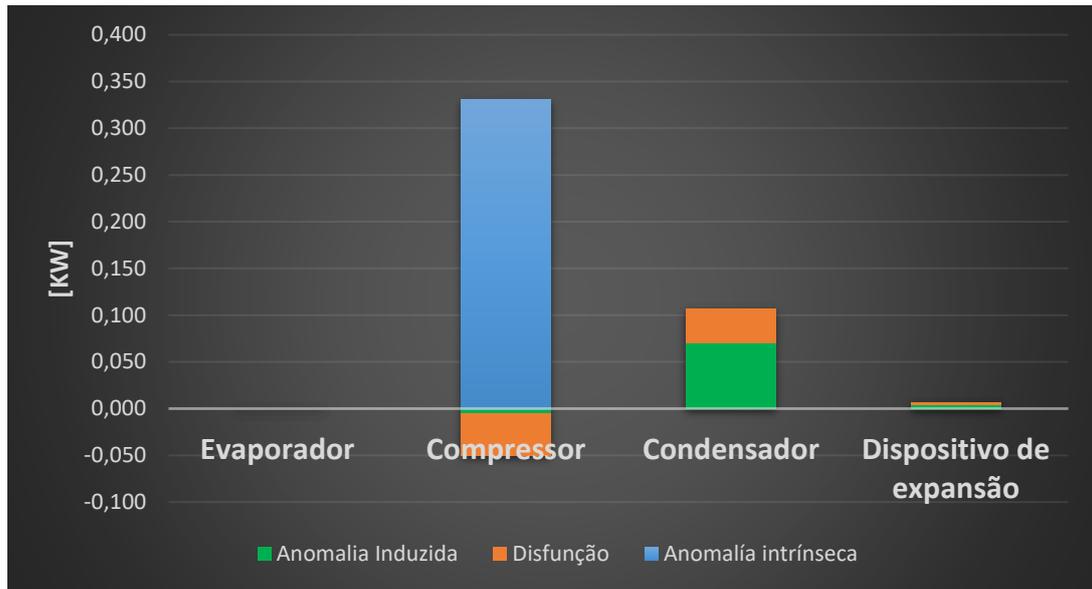


Fonte: O Autor

Um efeito similar ao da Figura 16 é visto na Figura 17, o condensador possui a contabilização das degradações geradas pela simulação em sua equação de operação, essas representadas pela anomalia intrínseca, possui um efeito de diminuição no consumo de insumos, representado pela anomalia induzida negativa e um aumento na necessidade de geração de produtos, representado pela disfunção positiva. A anomalia induzida aparece por influência da operação do compressor nessa condição e a disfunção por consequência da válvula, ao operarem nessa condição de degradação eles se influenciam mutuamente. Os demais componentes possuem efeitos similares aos da Figura 13.

Na Figura 18 mostra-se o caso em que há a simulação de 5% de degradação no compressor e há a análise usando o diagnóstico termoeconômico com operadores exergeticos.

**Figura 18** - Caso 3 – Simulação de 5% de degradação no compressor e análise usando o diagnóstico termoeconômico com operadores exergeticos

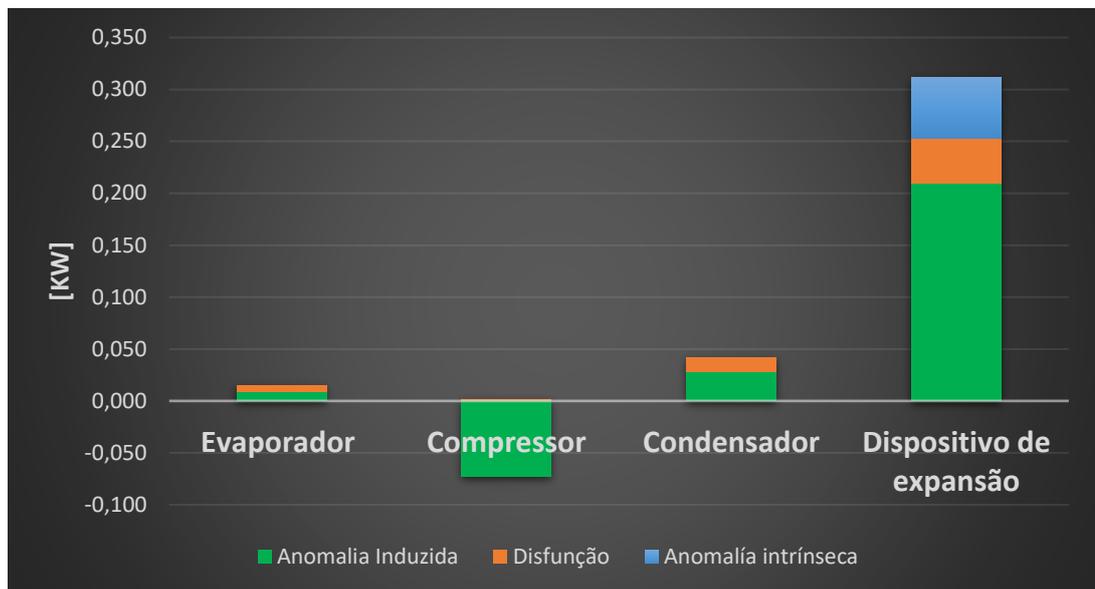


Fonte: O Autor

Na Figura 18, identifica-se que o efeito de anomalia no compressor é devido praticamente às anomalias intrínsecas, análise que a Figura 14 não conseguiu proporcionar com a metodologia de diagnóstico convencional, isto é, os efeitos de degradação nele são em sua maioria oriundos da queda de sua operação e não por influência de outros componentes. A disfunção negativa que figura nesse gráfico indica que ele está sendo requisitado a gerar menos produtos e haverá uma diminuição no consumo, por decorrência. Apesar do evaporador não ser afetado por degradações, ele é o responsável pela disfunção que figura na coluna do compressor. Os demais efeitos são similares aos da Figura 14.

Na Figura 19 mostra-se o caso em que há a simulação de 5% de degradação na válvula e há a análise usando o diagnóstico termoeconômico com operadores exergeticos.

**Figura 19** - Caso 4 – Simulação de 5% de degradação na válvula de expansão termostática e análise usando o diagnóstico termoeconômico com operadores exergéticos



Fonte: O Autor

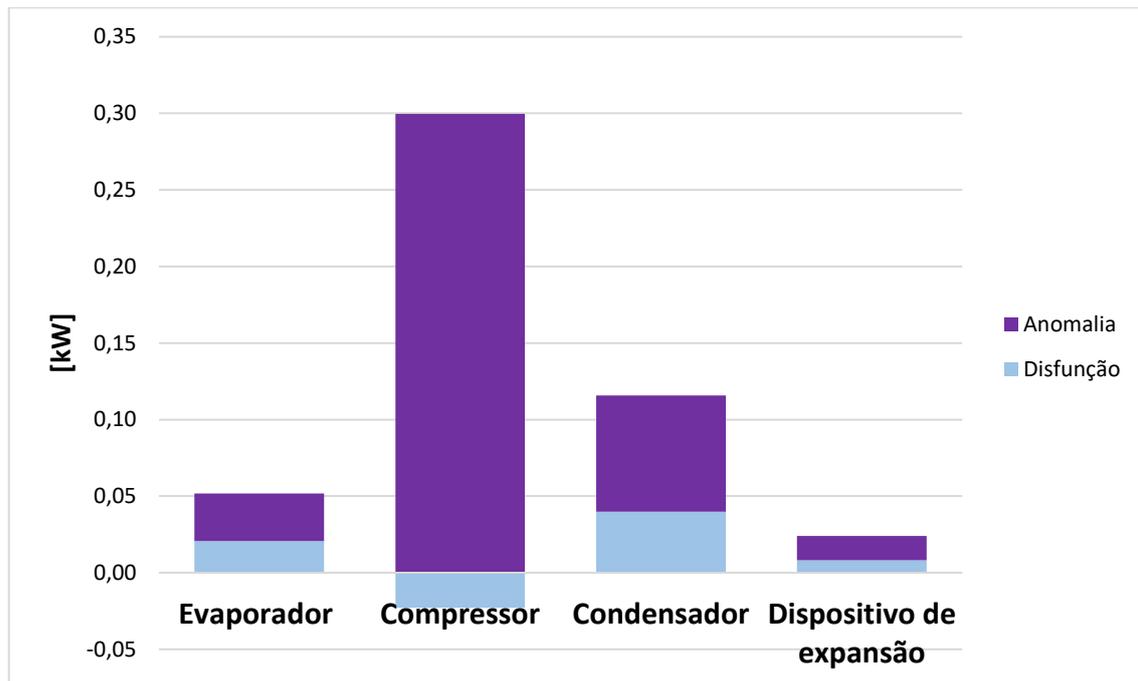
A magnitude das degradações nesse gráfico se manteve similar às da Figura 15, apesar de estarem divididas entre intrínsecas e induzidas, e as conclusões das relações entre os componentes ao ter degradações no ciclo são similares às da Figura 15. As anomalias induzidas que aparecem na válvula de expansão são causadas pela operação do condensador nessa condição do sistema e as disfunções são causadas pelo evaporador.

#### **5.4.2 Simulações envolvendo dois componentes com anomalias intrínsecas simultaneamente.**

Nas figuras dessa seção são mostrados alguns casos simulados em que há a simulação de anomalias intrínsecas em 2 componentes simultaneamente e é feito uso da metodologia de diagnóstico convencional e diagnóstico com operadores exergéticos para a avaliação das condições de operação do sistema, bem como avaliar a diferença de profundidade de análise.

Na Figura 20 mostra-se o caso em que há a simulação de 5% de anomalia intrínseca no evaporador e compressor e análise usando a metodologia de diagnóstico convencional.

**Figura 20** - Caso 6 – Simulação de 5% de anomalia intrínseca no evaporador e compressor e análise usando a metodologia de diagnóstico convencional

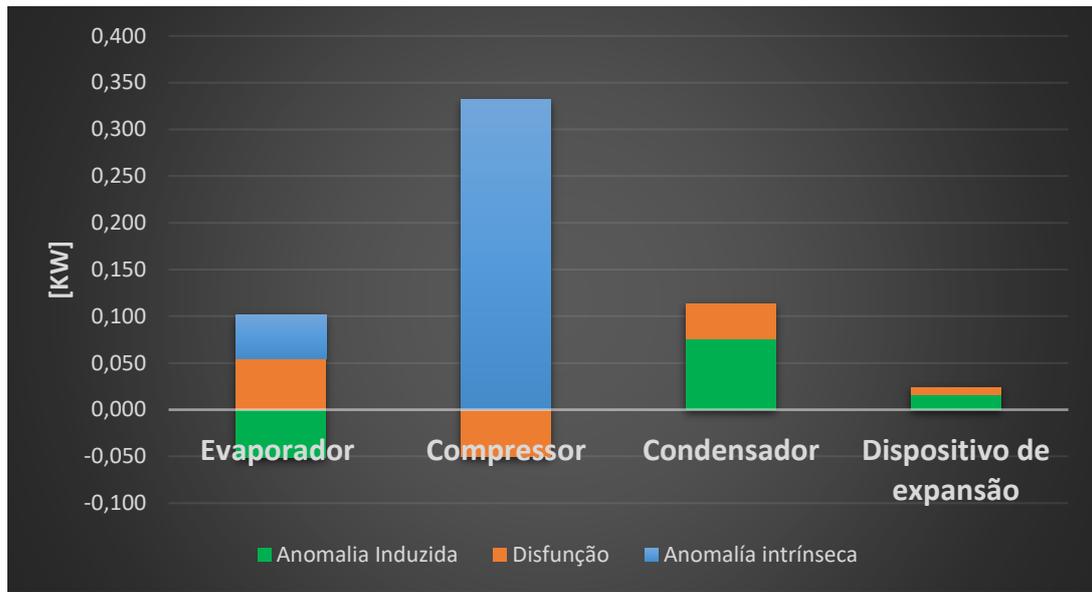


Fonte: O Autor

Analisando-se as colunas referentes ao compressor e ao evaporador, verifica-se que ao simular degradações nos dois componentes simultaneamente, 5% de degradações fazem com que o compressor gere um impacto negativo ao sistema quase seis vezes maior que o gerado pelo evaporador, quando se compara a magnitude da coluna do evaporador e a do compressor, de 0,05 kW e aproximadamente 0,30 kW para o compressor, devido ao fato de que entre os dois o compressor é o componente que demanda a maior alimentação de potência elétrica e qualquer variação em sua operação gera impactos maiores no consumo adicional de energia elétrica. Constata-se também que os outros componentes também foram influenciados a operarem com uma redução em sua eficiência de operação nessa condição com degradações, como constata-se nas disfunções e anomalias presentes no condensador e dispositivo de expansão. Tendo um aumento no consumo de insumos, representado pelas anomalias, e um aumento de consumo devido à necessidade de aumento de geração de produtos pelos mesmos, representado pelas disfunções.

Na Figura 21 mostra-se o caso em que há a simulação de 5% de anomalia intrínseca no evaporador e compressor e análise usando a metodologia de diagnóstico com operadores exergeticos.

**Figura 21** - Caso 6 – Simulação de 5% de anomalia intrínseca no evaporador e compressor e análise usando a metodologia de diagnóstico com operadores exergeticos



Fonte: O Autor

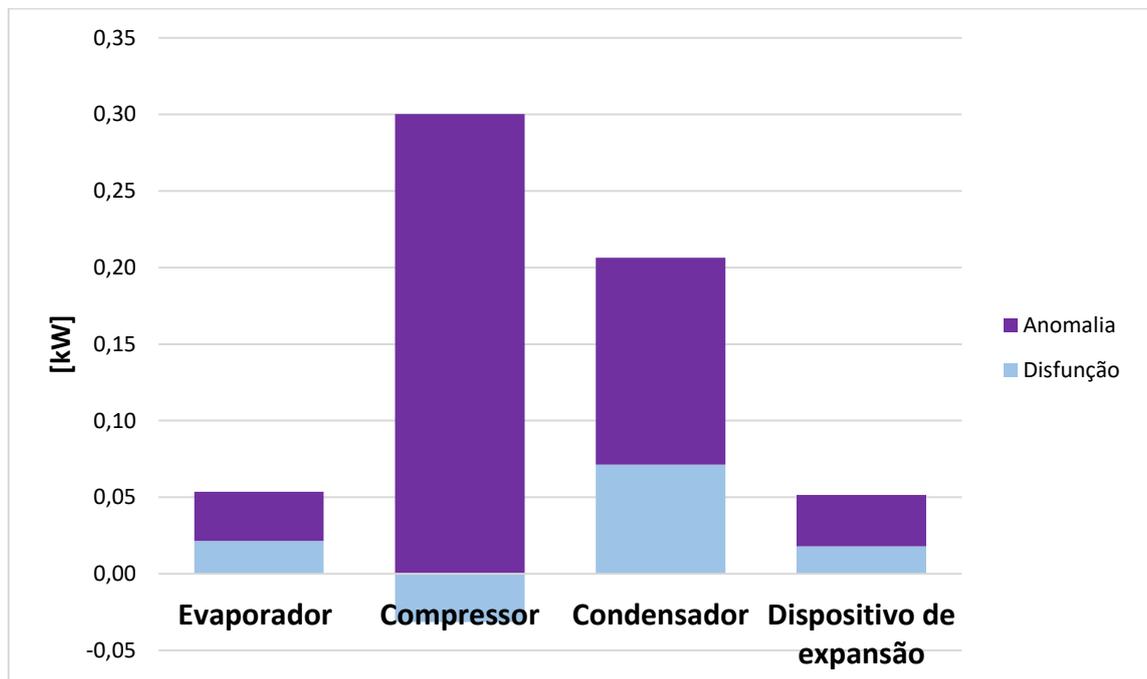
Na Figura 21, nota-se que a magnitude da coluna do condensador, compressor e a da válvula de expansão são similares às da Figura 20, no entanto, nota-se um aumento da profundidade de diagnóstico ao analisar a coluna do evaporador, que exhibe uma anomalia induzida que não foi detectada pela metodologia de diagnóstico anterior, causada pela operação da válvula de expansão nessa condição de operação, e uma disfunção, essa causada pelo compressor. A anomalia induzida negativa indica que nessa condição de operações, a válvula ao operar, influencia o evaporador a diminuir o seu consumo de insumos. A disfunção positiva do evaporador, causada pelo compressor, indica que o compressor nessa condição de operação influencia o evaporador a gerar mais produtos e demandar um consumo de energia elétrica maior, por consequência. Uma análise similar a anterior pode ser feita para os demais componentes.

### 5.4.3 Simulações envolvendo mais de 2 componentes com anomalias intrínsecas simultaneamente

Nas figuras dessa seção serão mostrados alguns casos simulados em que há a simulação de anomalias intrínsecas em 3 componentes simultaneamente e é feito uso da metodologia de diagnóstico convencional e posteriormente a de operadores exergéticos para a avaliação das condições de operação do sistema e diferença de profundidade de análise entre as duas.

Na Figura 22 mostra-se o caso em que há a simulação de 5% de anomalia intrínseca no evaporador, condensador e compressor e há a análise usando a metodologia de diagnóstico convencional.

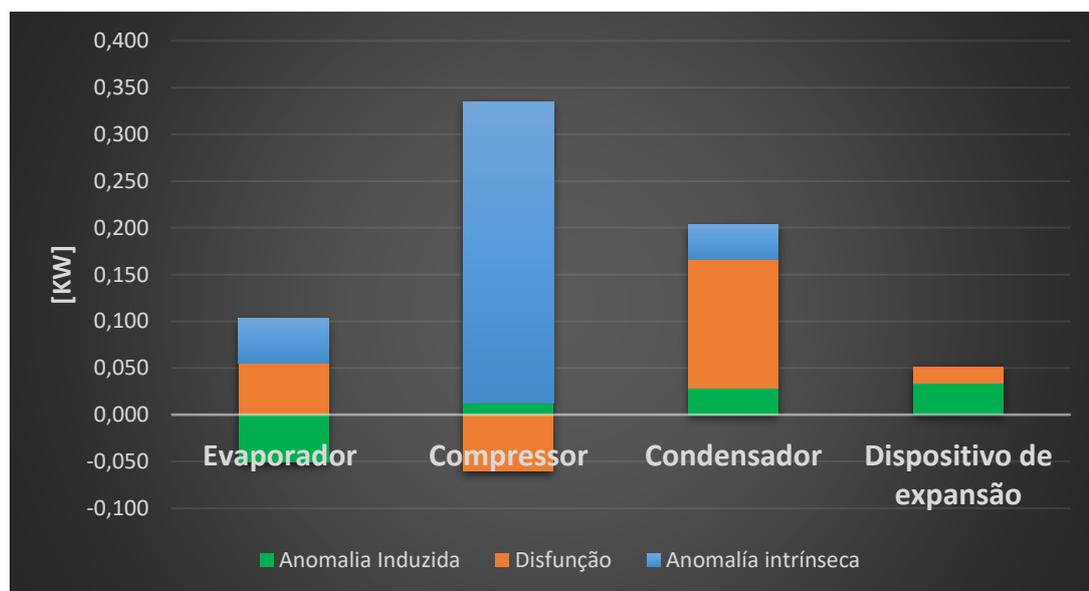
**Figura 22** - Caso 11 – Simulação de 5% de anomalia intrínseca no evaporador, condensador e compressor e análise usando a metodologia de diagnóstico convencional



Fonte: O Autor

Na Figura 23 mostra-se o caso em que há a simulação de 5% de anomalia intrínseca no evaporador, condensador e compressor e há a análise usando a metodologia de diagnóstico com operadores exerгéticos.

**Figura 23** - Caso 11 – Simulação de 5% de anomalia intrínseca no evaporador, condensador e compressor e análise usando a metodologia de diagnóstico convencional

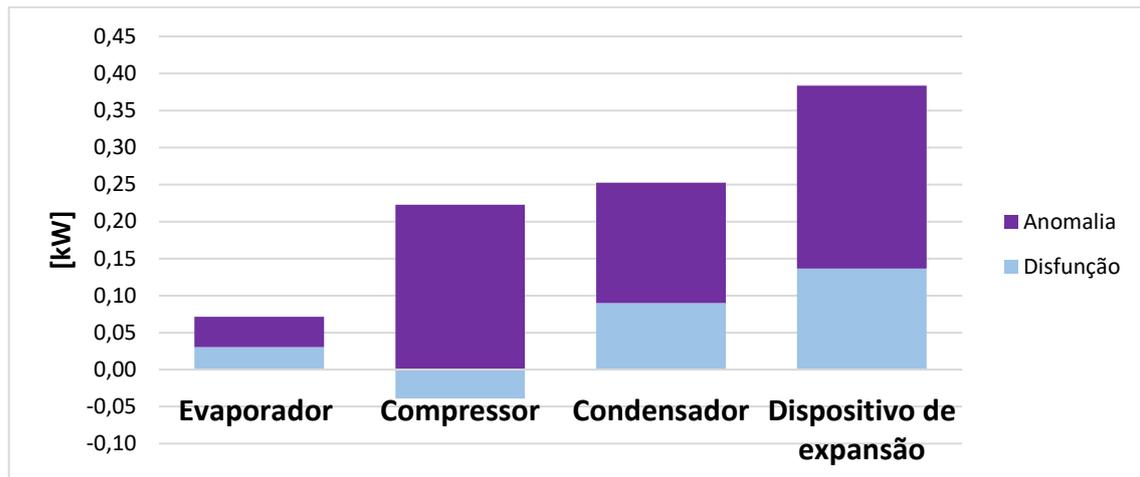


Fonte: O autor

Comparando-se a Figura 22 e Figura 23, identifica-se que a magnitude de degradações para quase todos os componentes é similar, no entanto, a encontrada para o evaporador e compressor não são, o evaporador e o compressor na Figura 23 possuem magnitudes de potência de aproximadamente 0,1 kW e 0,32kW, respectivamente, enquanto que na Figura 22 são de aproximadamente 0,05 kW e 0,30 kW. Além disso, para o evaporador, ele possui anomalias induzidas negativas que foram desconsideradas pela metodologia de diagnóstico convencional, isto é, a metodologia foi incapaz de avaliar o efeito da válvula de expansão no evaporador, ela é a responsável por gerar essa disfunção negativa e ela também não consegue apontar que a maior parte das anomalias presentes no compressor são oriundas de degradações em seu próprio comportamento, como indicam as anomalias intrínsecas presentes no compressor da Figura 23. O condensador possui maior impacto quando comparado com o evaporador, por estar relacionado com a rejeição de calor e quedas em sua performance prejudicam a eficiência da refrigeração do sistema, gerando maiores consumos.

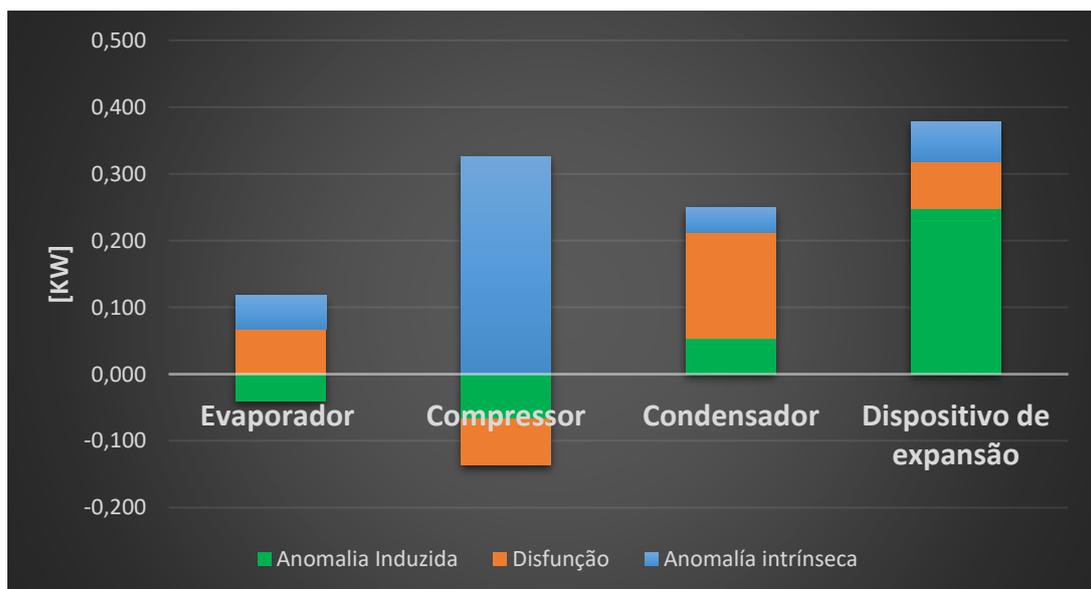
Na Figura 24, é mostrado o comportamento do sistema quando todos os componentes sofrem simultaneamente anomalias intrínsecas de 5% em sua operação, segundo a metodologia de diagnóstico convencional e na Figura 25 é mostrada a mesma simulação, mas usando o diagnóstico com operadores exergéticos.

**Figura 24** - Caso 15 – Simulação de 5% de anomalia intrínseca em todos os componentes do ciclo e análise usando a metodologia de diagnóstico convencional



Fonte: O autor

**Figura 25** - Caso 15 – Simulação de 5% de anomalia intrínseca em todos os componentes do ciclo e análise usando a metodologia de diagnóstico com operadores exergéticos



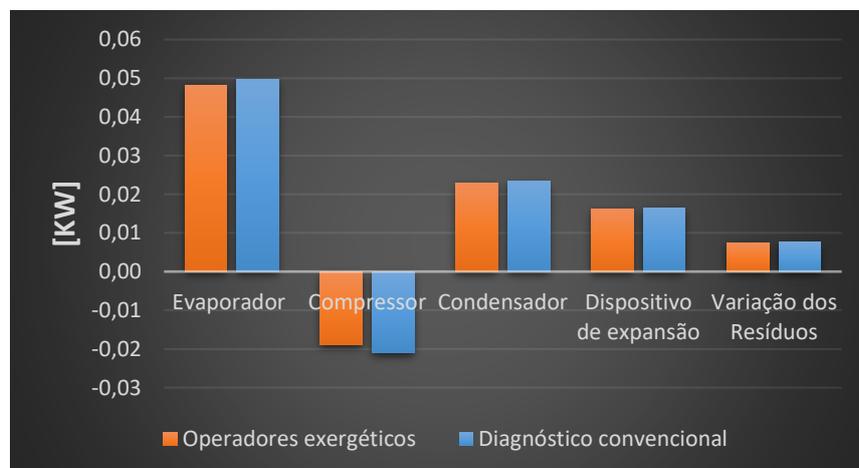
Fonte: O autor

Identifica-se a partir da Figura 24 e Figura 25, que o dispositivo de expansão é o maior responsável por variações no consumo de eletricidade quando todos os componentes operam com 5% de degradações, observa-se que o diagnóstico convencional não atribui anomalias induzidas ao compressor e evaporador, quando comparado com o diagnóstico de operadores exergeticos da Figura 25, que atribui anomalias induzidas a esses componentes. Esse tipo de falha de análise do diagnóstico convencional impossibilita a assertividade do diagnóstico para propor melhorias ao sistema, uma vez que ele não identificou anomalias induzidas para alguns componentes, não é possível corrigir tais problemas. Ele seria incapaz de afirmar que a válvula faz com que o condensador tenha a necessidade de consumir mais energia elétrica para gerar mais produtos nessa condição de operação, pela presença de disfunções na coluna do condensador, e impossibilitaria uma correção nesse sentido.

#### 5.4.4 Impacto no consumo de eletricidade segundo as metodologias de diagnóstico

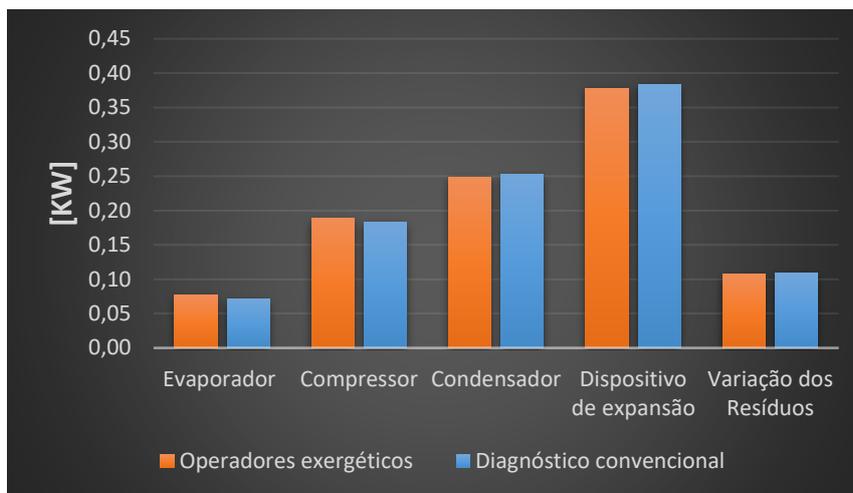
Uma última forma de comparação entre os dois diagnósticos se dá ao avaliar o impacto no consumo de energia elétrica segundo cada metodologia. Esse procedimento é feito pelo gráfico do impacto no consumo de energia elétrica, ele é usado para cada caso como uma forma de avaliar os efeitos das degradações sob um somatório de efeitos, que considera tanto os efeitos positivos como negativos dos componentes e os contabiliza no gráfico. Apesar das diferenças entre as metodologias, elas devem indicar valores similares quando se faz essa análise combinatória dos efeitos (OROZCO, 2017). Eles são mostrados nas Figura 26 e Figura 27.

**Figura 26** - Impacto no consumo de energia elétrica segundo ambas as metodologias para o caso 1.



Fonte: O autor

**Figura 27** - Impacto no consumo de energia elétrica segundo ambas as metodologias para o caso 15: degradações de 5% em todos os componentes do ciclo.



Fonte: O autor

Em ambos os casos se constata a similaridade entre as metodologias ao avaliar os efeitos gerais de cada componente no impacto do consumo de energia elétrica, como pode ser visto nas Figura 26 e Figura 27. No projeto de Torres et al. (1999), é evidenciada a inaptidão de modelos de diagnóstico em diferenciações aprofundadas nas degradações e ainda mostrou-se que o método não foi ideal ainda para determinar a origem das degradações, isso foi evidenciado também no decorrer das discussões das seções anteriores, foi ressaltado os inúmeros casos em que o diagnóstico convencional não pode fornecer resultados com profundidade e não pode diferenciar os tipos de degradação, e apesar de uma análise como a do impacto no consumo indicar similaridade de resultados finais, há diferenças nas avaliações propostas por esses diagnósticos e uma melhoria significativa ao se fazer uso dos operadores exergéticos.

#### **5.4.5 Compilações de todos os resultados dos diagnósticos e discussão final**

Além dos gráficos mostrados no decorrer da discussão e os presentes no apêndice, essa seção apresenta a compilação com todos os resultados das degradações, impacto no consumo de energia elétrica adicional e variação dos resíduos, bem como uma discussão geral desses fatores. Da Tabela 8 até a Tabela 11, encontram-se os resultados compilados da aplicação do diagnóstico seguindo as duas metodologias de diagnóstico.

**Tabela 8** – Resultados da aplicação da metodologia de diagnóstico convencional para degradações de 5% no sistema

Caso	Evaporador		Compressor		Condensador		Válvula de expansão		Impacto da variação dos resíduos	Impacto no insumo
	Anomalia [kW]	Disfunção [kW]	Anomalia [kW]	Disfunção [kW]	Anomalia [kW]	Disfunção [kW]	Anomalia [kW]	Disfunção [kW]	TOTAL [kW]	TOTAL [kW]
1	0,031	0,019	-0,009	-0,012	0,016	0,007	0,011	0,005	0,008	0,076
2	0,001	0,001	0,010	-0,007	0,052	0,025	0,017	0,008	0,012	0,118
3	0,000	0,000	0,293	-0,012	0,070	0,037	0,005	0,002	0,045	0,441
4	0,009	0,006	-0,073	0,001	0,028	0,014	0,208	0,103	0,033	0,330
5	0,031	0,019	0,001	-0,019	0,068	0,032	0,029	0,014	0,019	0,195
6	0,031	0,021	0,300	-0,023	0,076	0,040	0,016	0,008	0,054	0,522
7	0,040	0,027	-0,082	-0,014	0,043	0,021	0,222	0,110	0,041	0,407
8	0,001	0,001	0,308	-0,019	0,120	0,064	0,023	0,012	0,060	0,568
9	0,010	0,007	-0,073	-0,008	0,085	0,042	0,228	0,113	0,045	0,449
10	0,010	0,007	0,226	-0,014	0,094	0,052	0,214	0,118	0,083	0,790
11	0,032	0,022	0,300	-0,031	0,135	0,071	0,034	0,018	0,069	0,649
12	0,041	0,028	-0,069	-0,022	0,090	0,045	0,241	0,120	0,054	0,527
13	0,040	0,029	0,218	-0,029	0,108	0,060	0,228	0,125	0,092	0,871
14	0,010	0,007	0,231	-0,023	0,149	0,083	0,233	0,129	0,100	0,919
15	0,041	0,030	0,223	-0,039	0,163	0,090	0,247	0,136	0,109	1,000

Fonte: O autor

**Tabela 9** – Resultados da aplicação da metodologia de diagnóstico convencional para degradações de 15% no sistema

Caso	Evaporador		Compressor		Condensador		Válvula de expansão		Impacto da variação dos resíduos	Impacto no insumo
	Anomalia [kW]	Disfunção [kW]	Anomalia [kW]	Disfunção [kW]	Anomalia [kW]	Disfunção [kW]	Anomalia [kW]	Disfunção [kW]	TOTAL [kW]	TOTAL [kW]
1	0,103	0,063	-0,002	-0,038	0,032	0,015	0,041	0,019	0,025	0,258
2	0,002	0,001	0,031	-0,024	0,176	0,085	0,059	0,029	0,042	0,401
3	0,001	0,001	0,942	-0,043	0,238	0,153	0,014	0,009	0,178	1,493
4	0,030	0,024	-0,249	0,005	0,082	0,045	0,659	0,360	0,111	1,067
5	0,106	0,067	0,029	-0,065	0,205	0,099	0,102	0,049	0,070	0,663
6	0,104	0,084	0,943	-0,086	0,271	0,175	0,056	0,036	0,218	1,801
7	0,134	0,110	-0,265	-0,068	0,103	0,056	0,724	0,392	0,140	1,326
8	0,003	0,002	0,963	-0,076	0,433	0,284	0,078	0,051	0,261	1,999
9	0,033	0,027	-0,244	-0,039	0,265	0,146	0,729	0,403	0,170	1,489
10	0,031	0,032	0,686	-0,075	0,325	0,236	0,678	0,492	0,360	2,766
11	0,106	0,088	0,956	-0,123	0,472	0,308	0,122	0,080	0,306	2,316
12	0,137	0,115	-0,258	-0,114	0,284	0,156	0,796	0,436	0,201	1,752
13	0,135	0,140	0,673	-0,156	0,350	0,252	0,744	0,536	0,403	3,076
14	0,034	0,036	0,691	-0,133	0,515	0,377	0,761	0,558	0,467	3,306
15	0,137	0,145	0,656	-0,219	0,555	0,401	0,828	0,598	0,516	3,616

Fonte: O autor

**Tabela 10** – Resultados da aplicação da metodologia de exergia total com operadores exergeticos para degradações de 5% no sistema

Caso	Evaporador			Compressor			Condensador			Válvula de expansão			Impacto da variação dos resíduos	Impacto no insumo
	Intrínseca [kW]	Induzida [kW]	Disfunção [kW]	Intrínseca [kW]	Induzida [kW]	Disfunção [kW]	Intrínseca [kW]	Induzida [kW]	Disfunção [kW]	Intrínseca [kW]	Induzida [kW]	Disfunção [kW]	TOTAL [kW]	TOTAL [kW]
1	0,048	-0,052	0,052	0,000	-0,009	-0,010	0,000	0,016	0,007	0,000	0,011	0,005	0,007	0,076
2	0,000	0,001	0,001	0,000	0,010	-0,007	0,037	-0,051	0,090	0,000	0,017	0,008	0,012	0,118
3	0,000	0,000	0,000	0,331	-0,005	-0,045	0,000	0,070	0,037	0,000	0,005	0,002	0,045	0,441
4	0,000	0,009	0,006	0,000	-0,073	0,001	0,000	0,028	0,014	0,059	0,209	0,043	0,033	0,330
5	0,048	-0,052	0,053	0,000	0,001	-0,015	0,037	-0,036	0,097	0,000	0,029	0,013	0,019	0,195
6	0,048	-0,052	0,054	0,331	0,000	-0,051	0,000	0,076	0,038	0,000	0,016	0,008	0,053	0,522
7	0,050	-0,042	0,063	0,000	-0,082	-0,012	0,000	0,043	0,020	0,059	0,223	0,045	0,040	0,407
8	0,000	0,001	0,001	0,332	0,008	-0,051	0,037	0,014	0,133	0,000	0,023	0,012	0,060	0,568
9	0,000	0,010	0,007	0,000	-0,073	-0,008	0,037	-0,020	0,109	0,060	0,228	0,054	0,045	0,449
10	0,000	0,010	0,007	0,335	-0,075	-0,048	0,000	0,094	0,052	0,060	0,214	0,058	0,083	0,790
11	0,048	-0,051	0,055	0,322	0,013	-0,060	0,037	0,028	0,138	0,000	0,034	0,017	0,068	0,649
12	0,051	-0,041	0,064	0,000	-0,069	-0,019	0,037	-0,015	0,110	0,059	0,242	0,055	0,053	0,527
13	0,050	-0,042	0,066	0,326	-0,071	-0,062	0,000	0,108	0,057	0,060	0,227	0,060	0,091	0,871
14	0,000	0,010	0,007	0,336	-0,071	-0,057	0,037	0,041	0,153	0,060	0,233	0,069	0,100	0,919
15	0,051	-0,041	0,067	0,326	-0,067	-0,069	0,037	0,054	0,157	0,060	0,247	0,071	0,107	1,000

Fonte: O autor

**Tabela 11** – Resultados da aplicação da metodologia de exergia total com operadores exergeticos para degradações de 15% no sistema

Caso	Evaporador			Compressor			Condensador			Válvula de expansão			Impacto da variação dos resíduos	Impacto no insumo
	Intrínseca [kW]	Induzida [kW]	Disfunção [kW]	Intrínseca [kW]	Induzida [kW]	Disfunção [kW]	Intrínseca [kW]	Induzida [kW]	Disfunção [kW]	Intrínseca [kW]	Induzida [kW]	Disfunção [kW]	TOTAL [kW]	TOTAL [kW]
1	0,360	-0,326	0,129	0,000	-0,002	-0,034	0,000	0,032	0,015	0,000	0,041	0,019	0,0247	0,2580
2	0,000	0,002	0,001	0,000	0,031	-0,024	0,125	-0,152	0,287	0,000	0,059	0,029	0,042	0,401
3	0,000	0,001	0,001	1,095	0,001	-0,198	0,000	0,238	0,153	0,000	0,014	0,009	0,178	1,493
4	0,000	0,030	0,024	0,000	-0,249	0,005	0,000	0,082	0,045	0,344	0,657	0,017	0,111	1,067
5	0,358	-0,321	0,134	0,000	0,029	-0,057	0,125	-0,127	0,303	0,000	0,102	0,048	0,070	0,663
6	0,360	-0,325	0,149	1,088	0,003	-0,224	0,000	0,271	0,171	0,000	0,056	0,035	0,216	1,801
7	0,331	-0,264	0,193	0,000	-0,265	-0,060	0,000	0,103	0,053	0,346	0,721	0,030	0,137	1,326
8	0,000	0,003	0,002	1,077	0,039	-0,228	0,125	0,067	0,524	0,000	0,078	0,051	0,261	1,999
9	0,000	0,033	0,027	0,000	-0,244	-0,039	0,125	-0,076	0,361	0,338	0,733	0,060	0,170	1,489
10	0,000	0,031	0,032	1,111	-0,248	-0,252	0,000	0,325	0,236	0,342	0,679	0,149	0,360	2,766
11	0,357	-0,320	0,155	1,074	0,029	-0,256	0,125	0,100	0,548	0,000	0,122	0,078	0,304	2,316
12	0,328	-0,258	0,201	0,000	-0,258	-0,101	0,125	-0,059	0,366	0,339	0,800	0,072	0,197	1,752
13	0,330	-0,262	0,226	1,105	-0,260	-0,311	0,000	0,350	0,242	0,343	0,744	0,172	0,397	3,076
14	0,000	0,034	0,036	1,109	-0,243	-0,307	0,125	0,137	0,630	0,344	0,760	0,215	0,467	3,306
15	0,328	-0,257	0,234	1,092	-0,263	-0,368	0,125	0,170	0,644	0,342	0,828	0,232	0,508	3,616

Fonte: O autor

De forma geral, algumas considerações podem ser feitas ao analisar-se os dois modelos de diagnóstico pelas tabelas anteriores, o impacto no insumo total para cada modelo de diagnóstico tende a ser o mesmo, como observa-se na linha do caso 15 para a Tabela 10 e Tabela 12, na coluna de impacto no insumo, que indica 1 kW em ambos os casos e a mesma análise pode ainda ser feita para o impacto gerado pela variação dos resíduos, que também possui valores similares. Isso indica que ambas as metodologias aferem igualmente o impacto nos resíduos e consumo de energia elétrica adicional dos componentes no ciclo, mas tem diferenças na forma com que tratam a distribuição de degradações para os componentes no ciclo e conseqüentemente tem diferenças na profundidade de análise. Outras análises a serem feitas desses dados são as relações entre alguns casos simulados e o impacto notado na variação dos resíduos e consumo de eletricidade, quando são comparados todos os casos simulados. Na tabela 12 serão evidenciados alguns dados de interesse das tabelas 8,9, 10 e 11.

**Tabela 12** – Resultados das simulações para análise da variação dos resíduos e consumo de potência elétrica, segundo a metodologia de diagnóstico convencional

<b>Caso</b>	<b>Impacto dos resíduos</b>	<b>Impacto no insumo</b>	<b>Componentes simulados com 5 % de anomalias intrínsecas</b>			
	<b>TOTAL [kW]</b>	<b>TOTAL [kW]</b>	<b>Evaporador</b>	<b>Condensador</b>	<b>Compressor</b>	<b>Válvula</b>
1	0,007	0,076	X			
2	0,012	0,118		X		
3	0,045	0,441			X	
4	0,033	0,330				X
5	0,019	0,195	X	X		
6	0,053	0,522	X		X	
7	0,040	0,407	X			X
8	0,060	0,568		X	X	
9	0,045	0,449		X		X
10	0,083	0,790			X	X
11	0,068	0,649	X	X	X	
12	0,053	0,527	X	X		X
13	0,091	0,871	X		X	X
14	0,100	0,919		X	X	X
15	0,107	1,000	X	X	X	X

Fonte: O autor

Ao avaliar os dados realçados em amarelo, constata-se que o consumo de eletricidade tende a aumentar quando anomalias intrínsecas são simuladas no compressor e válvula de expansão. Como em sistemas de refrigeração o compressor é o maior consumidor de energia elétrica, é coerente que degradações nele causem um aumento maior no consumo quando comparado com o aumento causado pelos demais componentes degradados, e é coerente com a válvula também estar nesse resultado, pois ela é uma das maiores destruidoras de exergia do ciclo, ao promover o estrangulamento, esse processo não gera um saldo exergético positivo para o ciclo. Analisando-se os dados realçados em azul, representando o impacto na variação dos resíduos, isto é, a variação no calor rejeitado pelo condensador conforme há a simulação de degradações nos componentes do ciclo, nota-se que esses valores tendem a aumentar quando o compressor sofre com as degradações simuladas. Essa análise é coerente com os casos simulados, uma vez que os resíduos são fluxos inúteis do sistema e degradações no compressor tem impacto na geração de resíduos por exigirem maior alimentação de potência enquanto é estimulada a circulação de fluxos inúteis.

Além dos dados da Tabela 12, analisando-se a Tabela 10, percebe-se que os valores anomalias intrínsecas para cada componente permanecem quase constantes independente do caso simulado, como observa-se no valor de anomalia intrínseca do evaporador de aproximadamente 0,048 kW para todos os casos, esse fenômeno se repete para as Tabelas 8,9 e 10 e indica uma dependência entre o valor do impacto no consumo de eletricidade e variações nas anomalias intrínsecas, essa dependência indica que o impacto no consumo de eletricidade é uma função das anomalias intrínsecas dos componentes do ciclo, e infere-se que elas são as maiores responsáveis por desvios no consumo adicional de recursos.

Tendo em vista todas simulações discutidas, pode-se avaliar que melhorias e profundidade podem ser adicionadas ao diagnóstico ao acrescentar os operadores exergéticos, como a avaliação das relações entre os componentes quando existe uma degradação no sistema e a forma com que eles mutuamente são influenciados por ela. Além disso, em trabalhos futuros outras simulações e metodologias de diagnóstico podem ser aplicadas nesse sistema simulado, para determinar o impacto que outros tipos de degradações podem ter no pleno funcionamento do sistema e avaliar o tipo de melhoria que cada uma dessas agrega à avaliação do diagnóstico. Pode-se ainda alimentar mais dados para as regressões lineares com os dados do catálogo, para um aumento da proximidade de avaliação do diagnóstico simulado com um diagnóstico aplicado diretamente em um sistema real.

## 6. CONCLUSÃO

Em virtude dos fatos mencionados, conclui-se que a eficiência energética é um dos pilares para o desenvolvimento sustentável da humanidade e as metodologias de diagnóstico termoeconômico apesar de serem relativamente recentes, datando da década de 80, com seu início a partir do projeto GAUDEAMO (VALERO et al, 1986), ainda tem estudos pioneiros e de elevada abrangência sendo desenvolvidos, como é o caso dos modelos apresentados nesse projeto, que podem trazer inúmeros benefícios para o desenvolvimento sustentável das sociedades.

Esse projeto teve êxito na avaliação da influência de anomalias intrínsecas, induzidas e disfunções no consumo adicional de recursos de um sistema de refrigeração, pois além de mostrar como se situam essas influências no comportamento dos componentes do ciclo, ainda se mostraram as limitações e defeitos de avaliação do diagnóstico convencional. Isso foi mostrado ao avaliar que o acréscimo de operadores exérgicos à metodologia de diagnóstico convencional amplia a profundidade de análise da mesma e indica problemas que são imperceptíveis ao diagnóstico convencional.

Além disso, outros objetivos desse projeto foram alcançados, como a análise de dados reais de um ciclo de refrigeração, a partir das equações oriundas de regressões lineares e catálogos, esse objetivo pode ser estendido para trabalhos futuros, onde pode-se aplicar o diagnóstico em sistemas reais, com um monitoramento de condições e parâmetros que permitam a aplicação dos diagnósticos ou ainda ampliar a análise financeira das degradações no sistema. Conclui-se que outros trabalhos podem usar os conceitos aqui discutidos e usar em situações similares, bem como podem propor melhorias no âmbito do desenvolvimento matemático e físico da própria metodologia de diagnóstico termoeconômico.

## 7. APÊNDICES

### 7.1 APÊNDICE A: Código desenvolvido no EES para simulação das condições de operação da câmara frigorífica

"Simulação de um ciclo de refrigeração usando equipamentos comerciais: Compressor ESH730 BITZER; evaporador FTBH841 Trineva; Condensador 099E McQuay - Heatcraft e Válvula TE5-2 Danfoss"

"SIMULAÇÃO da condição de referência - Parâmetros do sistema na condição de referência"

"Pressão"

$P[0]=101,3$  [kPa] "Pressão de estado morto tomada para o sistema na cond. de referência"

$P\_ref[4]=P\_sat(R22; T=to\_ref)$  "Pressão de referência tomada para o sistema para o ponto 4 na condição de referência"

$P\_ref[1]=0,95*P\_ref[4]$  "Pressão de referência tomada para o sistema para o ponto 1 na condição de referência"

$P\_ref[3]=0,95*P\_ref[2]$  "Pressão de referência tomada para o sistema para o ponto 3 na condição de referência"

$RP\_ref=P\_ref[2]/P\_ref[1]$  "Razão de pressão na condição de referência"

$P\_ref[2]=P\_sat(R22; T=tc\_ref)$  "Pressão de referência tomada para o sistema para o ponto 2 na condição de referência"

"Temperaturas"

$T[0]=25$  [°C] "Temperatura de estado morto tomada para o sistema na cond. de referência"

$T\_ref[1]=to\_ref+Delta\_supref$  "Temperatura do ponto 1 tomada para o sistema na cond. de referência"

$T\_ref[2]=Temperature(R22; h=h\_ref[2]; P=P\_ref[2])$  "Temperatura do ponto 2 tomada para o sistema na cond. de referência"

$T\_ref[4]=to\_ref$

$Tcam\_ref=-2$  "Temperatura da câmara tomada para o sistema na cond. de referência"

$Tamb\_ref=32$  [°C] "Temperatura ambiente tomada para o sistema na cond. de referência"

$Delta\_supref=10$  [°C] "Delta de superaquecimento tomado para o sistema na condição de referência"

$Delta\_subref=5$  [°C] "Delta de subresfriamento tomado para o sistema na condição de referência"

$Delta\_subref=tc\_ref-T\_ref[3]$

"Entalpias"

$h[0]=enthalpy(R22; T=T[0]; P=P[0])$  "Entalpia de estado morto tomada para o sistema na cond. de referência"

$h\_ref[1]=enthalpy(R22; T=T\_ref[1]; P=P\_ref[1])$  "Entalpia do ponto 1 tomada para o sistema na cond. de referência"

$h2s\_ref=enthalpy(R22; s=s\_ref[1]; P=P\_ref[2])$  "Entalpia do ponto 2 na condição ideal"

$h\_ref[3]=h\_ref[4]$  "Consideração da entalpia para o ponto 4,  $h3 = h4$ , devido ao estrangulamento proposto pela válvula"

"Entropias"

$s[0]=\text{entropy}(R22; T=T[0];P=P[0])$  "Entropia de estado morto tomada para o sistema na cond. de referência"

$s_{\text{ref}}[1]=\text{entropy}(R22; T=T_{\text{ref}}[1];P=P_{\text{ref}}[1])$  "Entropia do ponto 1 tomada para o sistema na cond. de referência"

$s_{\text{ref}}[2]=\text{entropy}(R22; h=h_{\text{ref}}[2];P=P_{\text{ref}}[2])$  "Entropia do ponto 2 tomada para o sistema na cond. de referência"

$s_{\text{ref}}[3]=\text{entropy}(R22; h=h_{\text{ref}}[3];P=P_{\text{ref}}[3])$  "Entropia do ponto 3 tomada para o sistema na cond. de referência"

$s_{\text{ref}}[4]=\text{entropy}(R22; h=h_{\text{ref}}[4];P=P_{\text{ref}}[4])$  "Entropia do ponto 4 tomada para o sistema na cond. de referência"

"Exergias estado de referência E "

$E_{\text{ref}}[1]=m_{\text{ref}}*(h_{\text{ref}}[1]-h[0]-(T[0]+273,15)*(s_{\text{ref}}[1]-s[0]))$  "Exergia do ponto 1 na cond. de referência"

$E_{\text{ref}}[2]=m_{\text{ref}}*(h_{\text{ref}}[2]-h[0]-(T[0]+273,15)*(s_{\text{ref}}[2]-s[0]))$  "Exergia do ponto 2 na cond. de referência"

$E_{\text{ref}}[3]=m_{\text{ref}}*(h_{\text{ref}}[3]-h[0]-(T[0]+273,15)*(s_{\text{ref}}[3]-s[0]))$  "Exergia do ponto 3 na cond. de referência"

$E_{\text{ref}}[4]=m_{\text{ref}}*(h_{\text{ref}}[4]-h[0]-(T[0]+273,15)*(s_{\text{ref}}[4]-s[0]))$  "Exergia do ponto 4 na cond. de referência"

$E_{\text{Qo\_ref}}[5]=Q_{\text{o\_ref}}*(-(1-(T[0]+273,15)/(T_{\text{cam\_ref}}+273,15)))$  "Exergia gerada pelo evaporador na condição de referência"

$E_{\text{Qc\_ref}}[6]=Q_{\text{c\_ref}}*(1-(T[0]+273,15)/(T_{\text{amb\_ref}}+273,15))$  "Exergia gerada pelo condensador na condição de referência"

$E_{\text{w\_ref}}[7]=W_{\text{ref}}$  "Exergia consumida pelo compressor na condição de referência"

"CONDIÇÃO DE REFERÊNCIA"

"Simulação do Compressor ESH730 BITZER "

"Regressão feita no EES usando dados <<Compressor Bitzer 3b ok.xls>>"

"Potência do Compressor"

$W_{\text{ref}}=-7,16622323E+00+7,86317125E-02*tc_{\text{ref}}+1,54598621E-03*tc_{\text{ref}}^2-2,16730842E-01*to_{\text{ref}}-9,65121332E-05*to_{\text{ref}}^2+6,71573941E+01*m_{\text{ref}}-8,80290881E+01*m_{\text{ref}}^2$

"Simulação evaporador FTBH841 Trineva"

"Capacidade Frigorífica [kW]"

$Q_{\text{o\_ref}}=23,145$  [kW] "Capacidade frigorífica adotada para o sistema na condição de referência"

$Q_{\text{o\_ref}}=(4,28132775+0,0302244195*to_{\text{ref}}+0,00043761653*to_{\text{ref}}^2)*(T_{\text{cam\_ref}}-to_{\text{ref}})$

"Simulação do Condensador Modelo padrão 099E, 12 polos (60 hz); McQuay - Heatcraft do Brasil Ltda"

"Calor rejeitado [kW]"

$Q_{\text{c\_ref}}=(3250*(tc_{\text{ref}}-T_{\text{amb\_ref}})/(860,6106))$  "conversão de kcal/h para kW"

"Simulação da Válvula TE5-2 Danfoss"

$$m\_ref=(363,751-1,365*to\_ref+4,270*tc\_ref-4,279*Delta\_subref-2,329*Delta\_supref)/3600$$

"Equações do balanço de energia"

$$\begin{aligned}Qo\_ref &= m\_ref*(h\_ref[1]-h\_ref[4]) \\ Qc\_ref &= m\_ref*(h\_ref[2]-h\_ref[3]) \\ W\_ref2 &= m\_ref*(h\_ref[2]-h\_ref[1]) \\ Qc\_ref &= Qo\_ref+W\_ref\end{aligned}$$

"Eficiência do compressor e COP na condição de referência"

$$\begin{aligned}COP\_ref &= Qo\_ref/W\_ref \text{ "Coeficiente de performance do ciclo"} \\ eta\_compref &= (h\_ref[1]-h2s\_ref)/(h\_ref[1]-h\_ref[2]) \text{ "Eficiência isentrópica do compressor"}\end{aligned}$$

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*"

"CONDIÇÃO DE TESTE"

"Parâmetros do sistema na condição de teste"

"Pressão"

$$\begin{aligned}P\_l[1] &= 0,95*P\_l[4] \\ P\_l[2] &= P\_sat(R22; T=tc\_l) \\ P\_l[3] &= 0,95*P\_l[2] \\ P\_l[4] &= P\_sat(R22; T=to\_l) \\ RP\_l &= P\_l[2]/P\_l[1]\end{aligned}$$

"Temperatura"

$$\begin{aligned}T\_l[1] &= to\_l+Delta\_supl \\ T\_l[2] &= Temperature(R22; h=h\_l[2]; P=P\_l[2]) \\ T\_l[4] &= to\_l \\ Delta\_subl &= tc\_l-T\_l[3] \\ Delta\_supl &= 10 \text{ [}^\circ\text{C]} \\ Delta\_subl &= 5 \text{ [}^\circ\text{C]} \\ Tcam\_l &= -2 \\ Tamb\_l &= 32 \text{ [}^\circ\text{C]}\end{aligned}$$

"Entropias"

$s_{l[1]} = \text{entropy}(R22; T=T_{l[1]}; P=P_{l[1]})$

$s_{l[2]} = \text{entropy}(R22; h=h_{l[2]}; P=P_{l[2]})$

$s_{l[3]} = \text{entropy}(R22; h=h_{l[3]}; P=P_{l[3]})$

$s_{l[4]} = \text{entropy}(R22; h=h_{l[4]}; P=P_{l[4]})$

"Entalpias"

$h_{l[1]} = \text{enthalpy}(R22; T=T_{l[1]}; P=P_{l[1]})$

$h_{2s_{l[1]}} = \text{enthalpy}(R22; s=s_{l[1]}; P=P_{l[2]})$

$h_{l[3]} = h_{l[4]}$

"Exergias estado de teste E "

$E_{l[1]} = m_{l[1]} * (h_{l[1]} - h[0] - (T[0] + 273,15) * (s_{l[1]} - s[0]))$

$E_{l[2]} = m_{l[2]} * (h_{l[2]} - h[0] - (T[0] + 273,15) * (s_{l[2]} - s[0]))$

$E_{l[3]} = m_{l[3]} * (h_{l[3]} - h[0] - (T[0] + 273,15) * (s_{l[3]} - s[0]))$

$E_{l[4]} = m_{l[4]} * (h_{l[4]} - h[0] - (T[0] + 273,15) * (s_{l[4]} - s[0]))$

$E_{Qo_{l[5]}} = Qo_{l[5]} * (-1 - (T[0] + 273,15) / (T_{cam_{l[1]} + 273,15}))$

$E_{Qc_{l[6]}} = Qc_{l[6]} * (1 - (T[0] + 273,15) / (T_{amb_{l[1]} + 273,15}))$

$E_{w_{l[7]}} = W_{l[7]}$

"Simulação das degradações (anomalias intrínsecas) na condição de teste, bem como as taxas de transferência de calor, fluxo de massa e consumo de potência na condição de testes"

"Valores que devem ser mudados para simular anomalias"

Alpha=1 "Simula perda da capacidade do evaporador"

Beta=1 "Simula perda da capacidade do condensador"

Gamma=1 "Simula perda de eficiência no compressor"

Epsilon=1 "Simula uma redução no coeficiente de fluxo da válvula"

"Simulação do Compressor ESH730 BITZER "

"Regressão feita no EES usando dados <<Compressor Bitzer 3b ok.xls>>"

"Potência do Compressor"

$\text{Gamma} * W_{l[7]} = -7,16622323E+00 + 7,86317125E-02 * tc_{l[1]} + 1,54598621E-03 * tc_{l[1]}^2 - 2,16730842E-01 * to_{l[1]} - 9,65121332E-05 * to_{l[1]}^2 + 6,71573941E+01 * m_{l[1]} - 8,80290881E+01 * m_{l[1]}^2$

"Simulação evaporador FTBH841 Trineva"

"Capacidade Frigorífica [kW]"

$Qo_{l[5]} = 23,145$  [kW]

$Qo_{l[5]} = \text{Alpha} * (4,28132775 + 0,0302244195 * to_{l[1]} + 0,00043761653 * to_{l[1]}^2) * (T_{cam_{l[1]}} - to_{l[1]})$

"Simulação do Condensador Modelo padrão 099E, 12 polos (60 hz); McQuay - Heatcraft do Brasil Ltda"

"Calor rejeitado [kW]"

$Qc_{l[6]} = \text{Beta} * (3250 * (tc_{l[1]} - T_{amb_{l[1]}}) / (860,6106))$  "conversão de kcal/h para kW"

"Simulação da Válvula TE5-2 Danfoss"

$$m_1 = (363,751 - 1,365 * t_{o1} + 4,270 * t_{c1} - 4,279 * \Delta_{subl} - 2,329 * \Delta_{supl}) / (\epsilon * 3600)$$

"Equações do balanço de energia"

$$Q_{o1} = m_1 * (h_{l1} - h_{l4})$$

$$Q_{c1} = m_1 * (h_{l2} - h_{l3})$$

$$W_{21} = m_1 * (h_{l2} - h_{l1})$$

$$Q_{c1} = Q_{o1} + W_{21}$$

"Eficiência do compressor e COP na condição de referência"

$$\eta_{comp1} = (h_{l1} - h_{2s1}) / (h_{l1} - h_{l2})$$

$$COP_1 = Q_{o1} / W_{21}$$

\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*  
\*\*\*\*\*

"CONDIÇÃO ESPERADA"

"Parâmetros do sistema na condição esperada"

"Pressão"

$$P_{ll4} = P_{sat}(R22; T = t_{o1})$$

"Temperaturas"

$$T_{cam_{ll}} = T_{cam_1}$$

$$T_{amb_{ll}} = T_{amb_1}$$

"Entalpias"

$$h_{ll4} = h_{l4}$$

"Entropias"

$$s_{ll1} = \text{entropy}(R22; h = h_{ll1}; P = P_{l1})$$

$$s_{ll2} = \text{entropy}(R22; h = h_{ll2}; P = P_{l2})$$

$$s_{ll3} = \text{entropy}(R22; h = h_{ll3}; P = P_{l3})$$

$$s_{ll4} = \text{entropy}(R22; P = P_{ll4}; h = h_{l4})$$

"Exergias condição esperada E' "

$$E_{ll1} = m_1 * (h_{ll1} - h_{l0} - (T_{l0} + 273,15) * (s_{ll1} - s_{l0}))$$

$$E_{ll2} = m_1 * (h_{ll2} - h_{l0} - (T_{l0} + 273,15) * (s_{ll2} - s_{l0}))$$

$$E_{c_{ll3}} = m_1 * (h_{l3} - h_{l0} - (T_{l0} + 273,15) * (s_{l3} - s_{l0}))$$

"Esta é a exergia esperada tendo em conta a operação do condensador"

$Ev_{II}[3]=m_{II}*(h_{II}[3]-h[0]-(T[0]+273,15)*(s_{II}[3]-s[0]))$  "Esta é a exergia tendo em conta a operação da válvula. Nesta o  $m_I$  por mudado por  $m_{II}$ , com relação à versão 2"  
 $E_{II}[4]=m_{II}*(h_{II}[4]-h[0]-(T[0]+273,15)*(s_{II}[4]-s[0]))$   
 $E_{Qo\_II}[5]=Qo_{II}*(-(1-(T[0]+273,15)/(Tcam_{II}+273,15)))$   
 $E_{Qc\_II}[6]=Qc_{II}*(1-(T[0]+273,15)/(Tamb_{II}+273,15))$   
 $Ew_{II}[7]=W_{II}$

"Evaporador"

$Qo_{II}=(4,28132775+0,0302244195*to_I+0,00043761653*to_I^2)*(Tcam_I-to_I)$   
 $Qo_{II}=m_I*(h_{II}[1]-h_I[4])$

"Compressor"

$W_{II}=-7,16622323E+00+7,86317125E-02*tc_I+1,54598621E-03*tc_I^2-2,16730842E-01*to_I-9,65121332E-05*to_I^2+6,71573941E+01*m_I-8,80290881E+01*m_I^2$   
 $W_{II}=m_I*(h_{II}[2]-h_I[1])$

"Condensador"

$Qc_{II}=(3250*(tc_I-Tamb_{II})/(860,6106))$  "conversão de kcal/h para kW"  
 $Qc_{II}=m_I*(h_I[2]-h_{II}[3])$

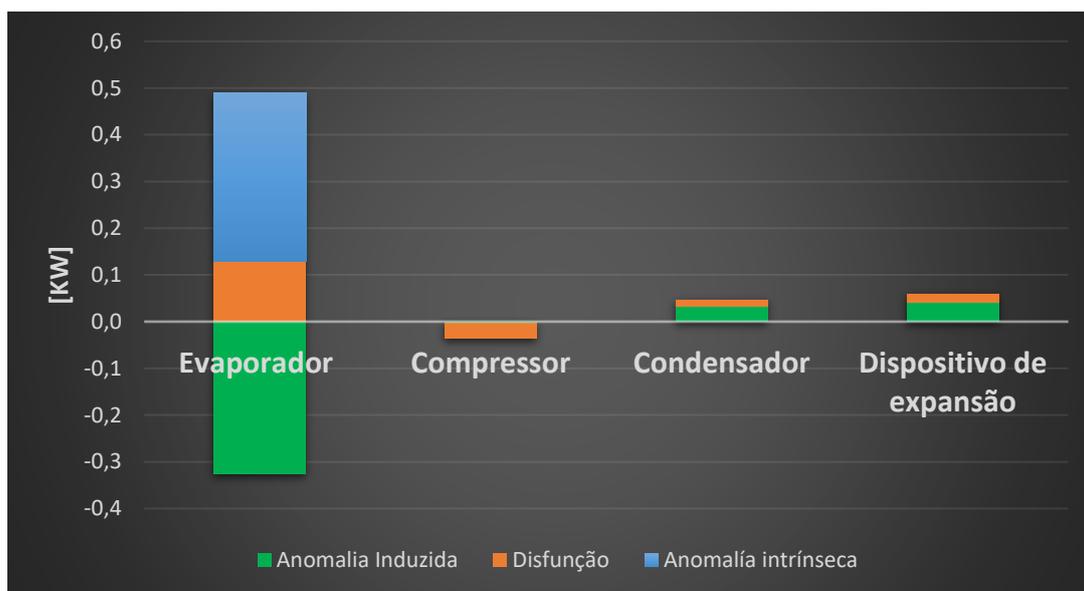
"Valvula"

$m_{II}=(363,751-1,365*to_I+4,270*tc_I-4,279*Delta_{subI}-2,329*Delta_{supI})/(3600)$

## 7.2 APÊNDICE B: Resultados dos casos simulados para as anomalias intrínsecas de 5 e 15% nos componentes da câmara frigorífica

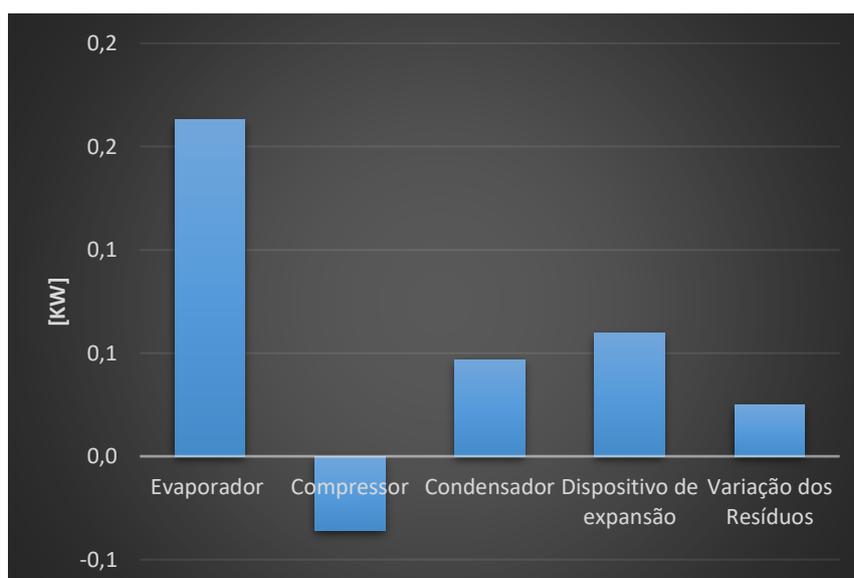
As figuras abaixo constituem a aplicação do diagnóstico com operadores exergéticos para todos os casos tratados no corpo do texto.

**Figura** – Caso 1 – Simulação de 15% de degradação no evaporador



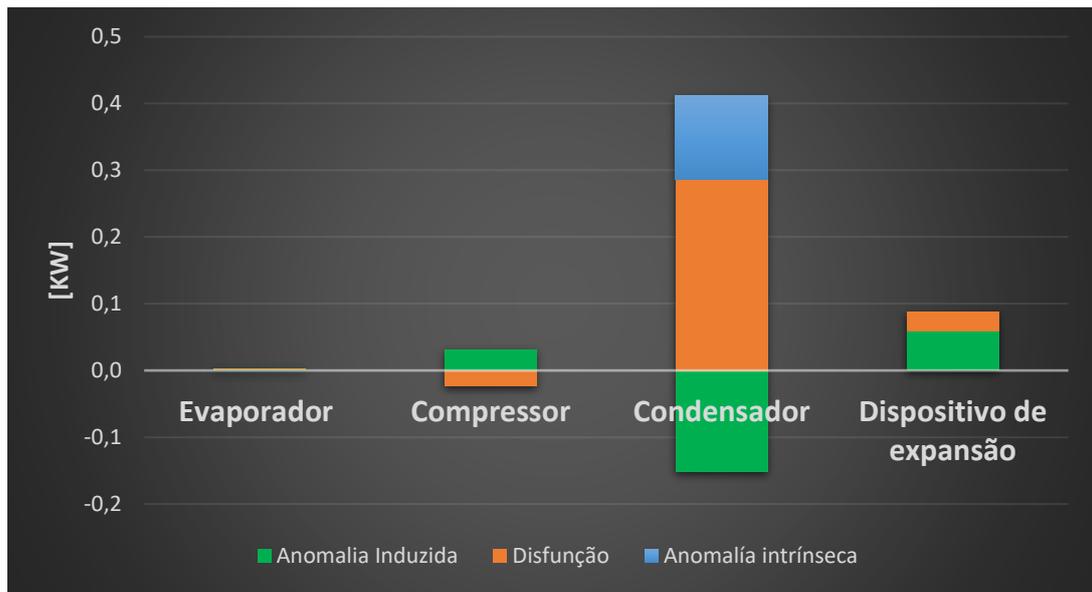
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 1.



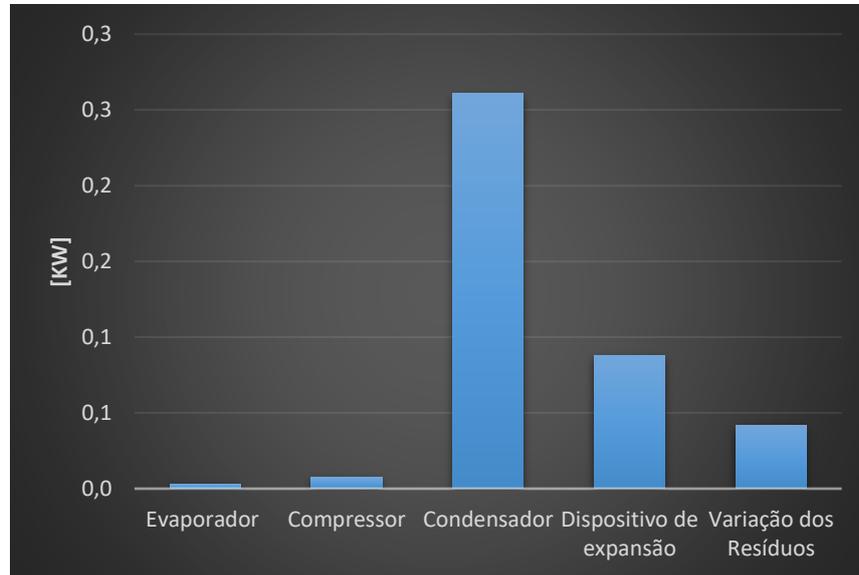
Fonte: O Autor

**Figura – Caso 2– Simulação de 15% de degradação no condensador**



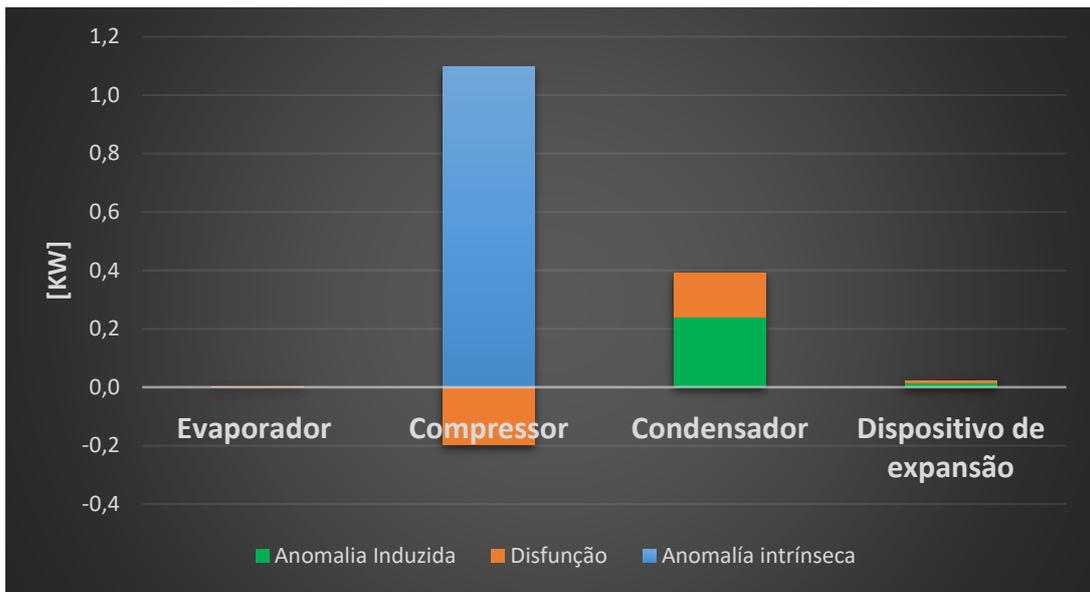
Fonte: O Autor

**Figura – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 2.**



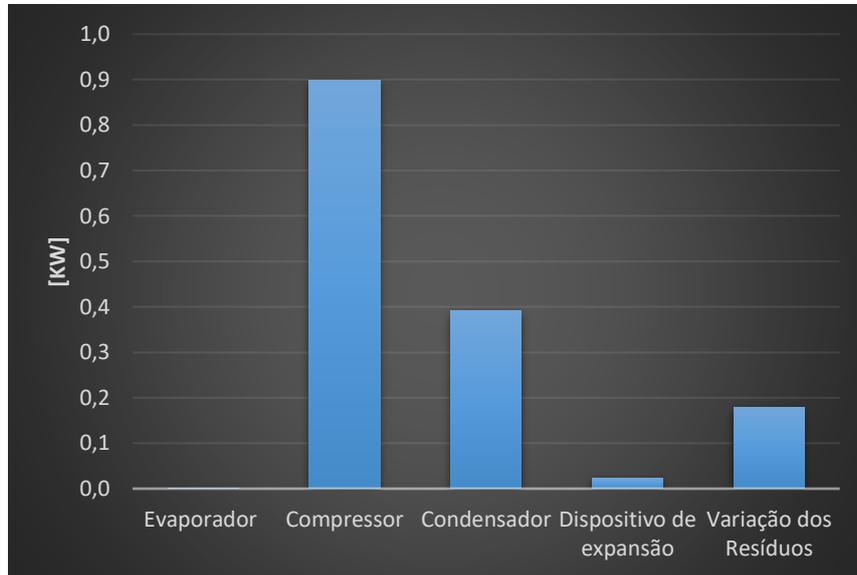
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 3 – Simulação de 15% de degradação no compressor



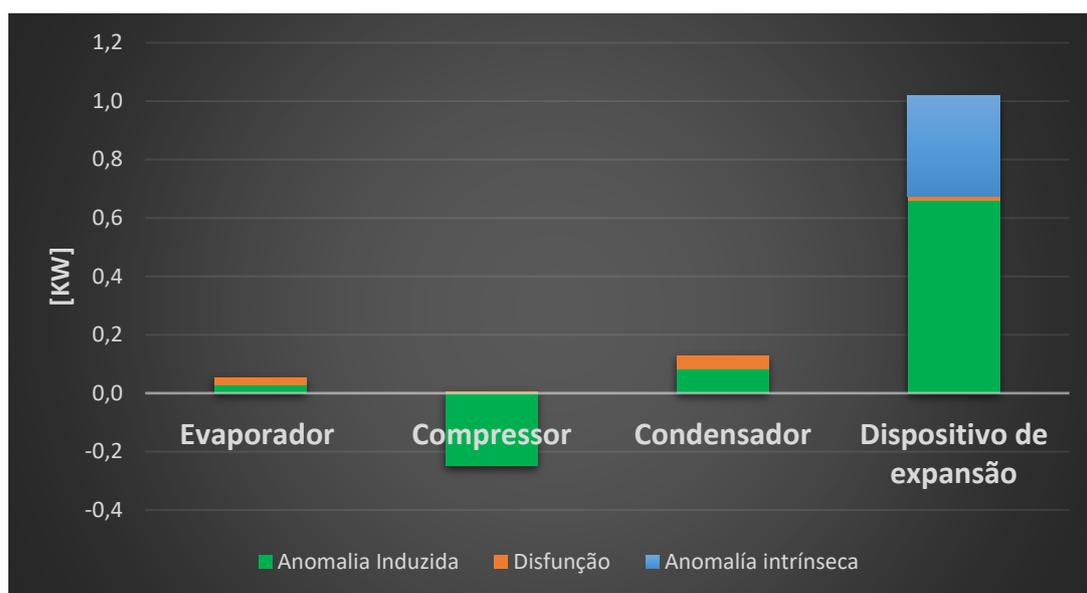
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 3.



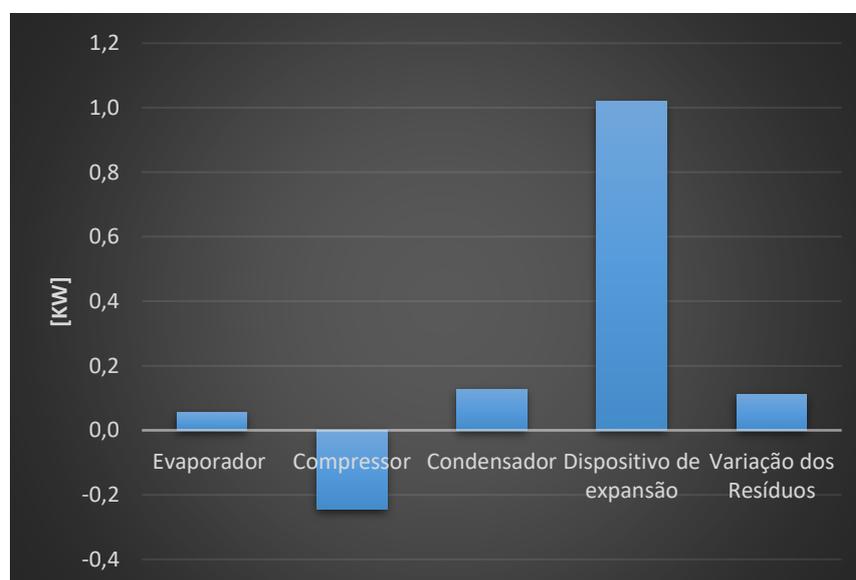
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 4 – Simulação de 15% de degradação na válvula de expansão



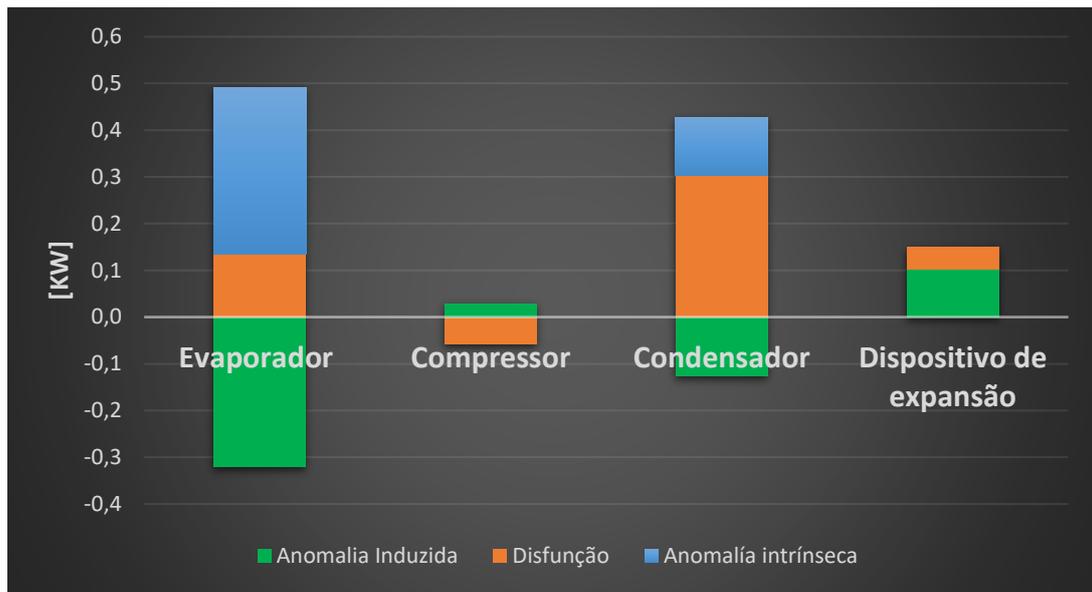
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 4.



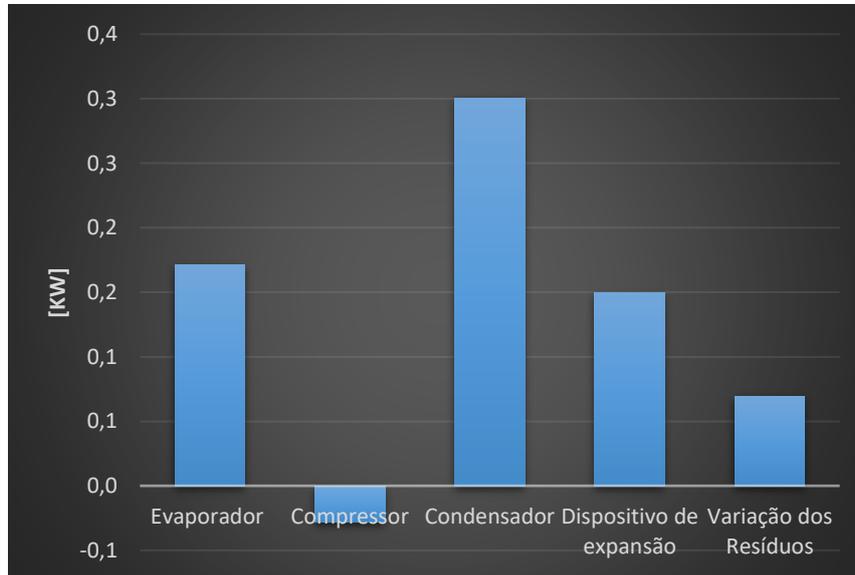
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 5 – Simulação de 15% de degradação no evaporador e condensador



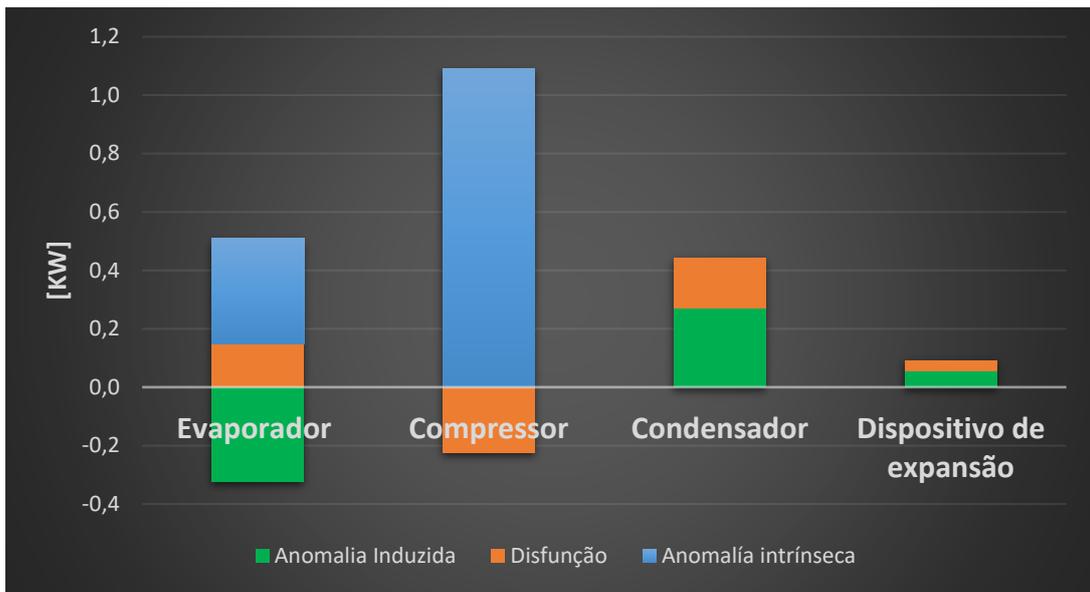
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 5.



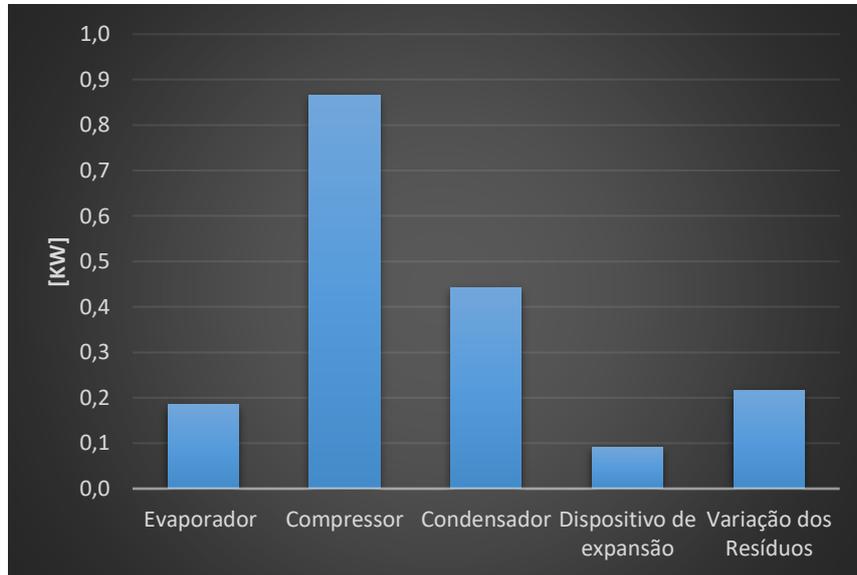
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 6– Simulação de 15% de degradação no evaporador e compressor



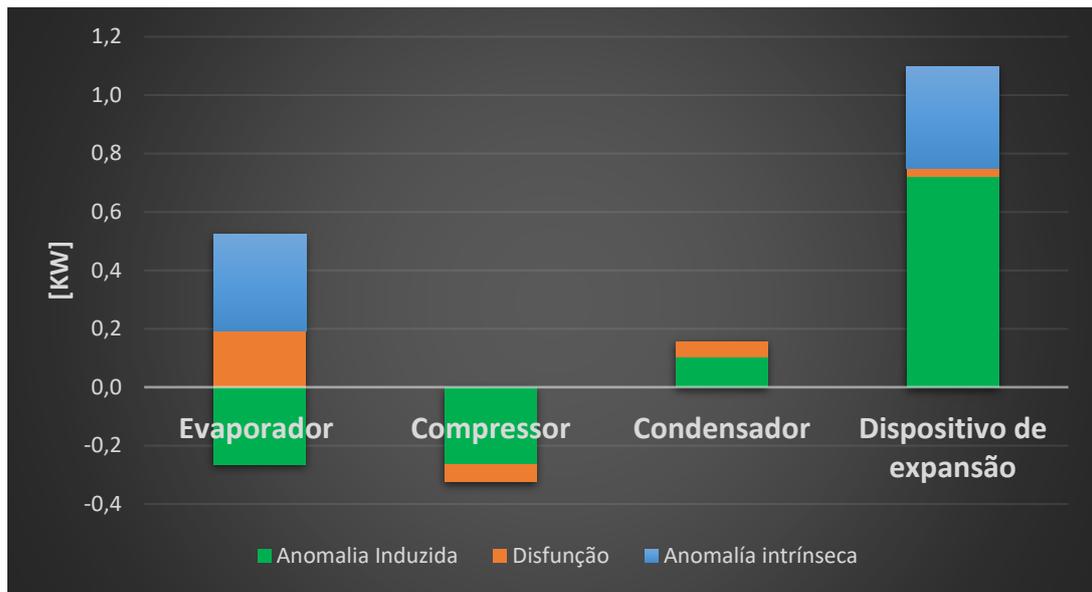
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 6.



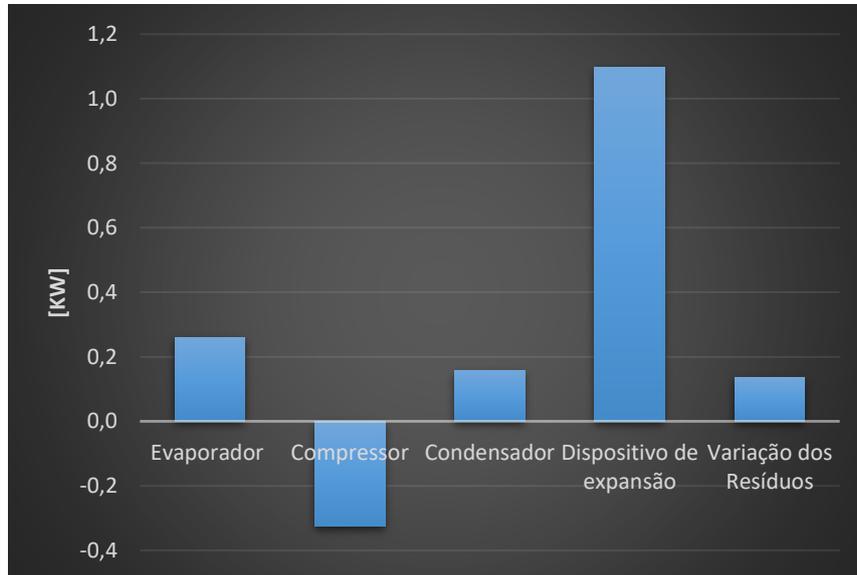
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 7– Simulação de 15% de degradação no evaporador e válvula de expansão



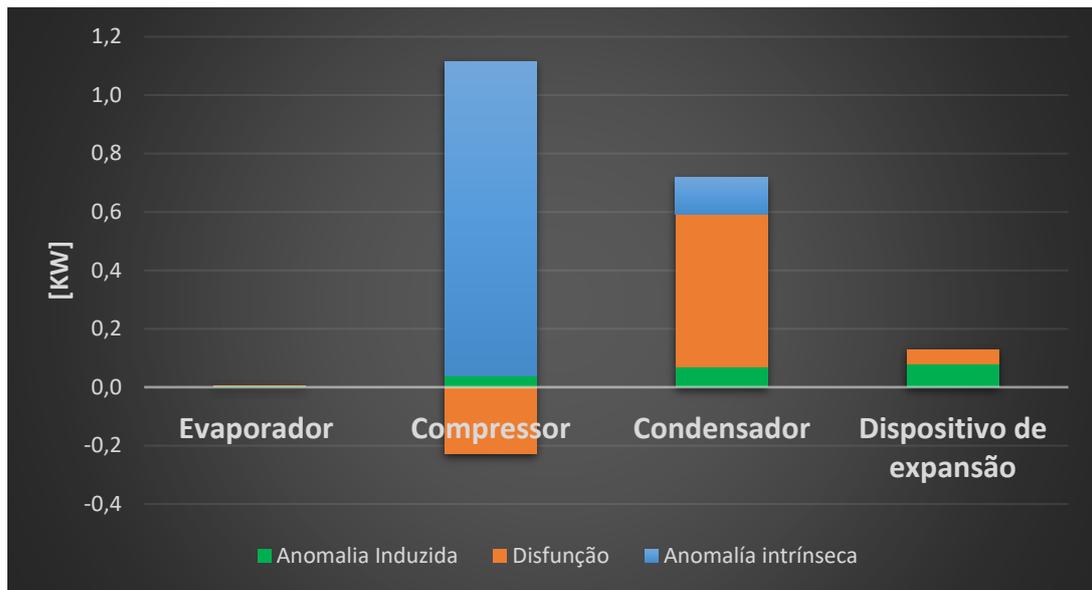
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 7.



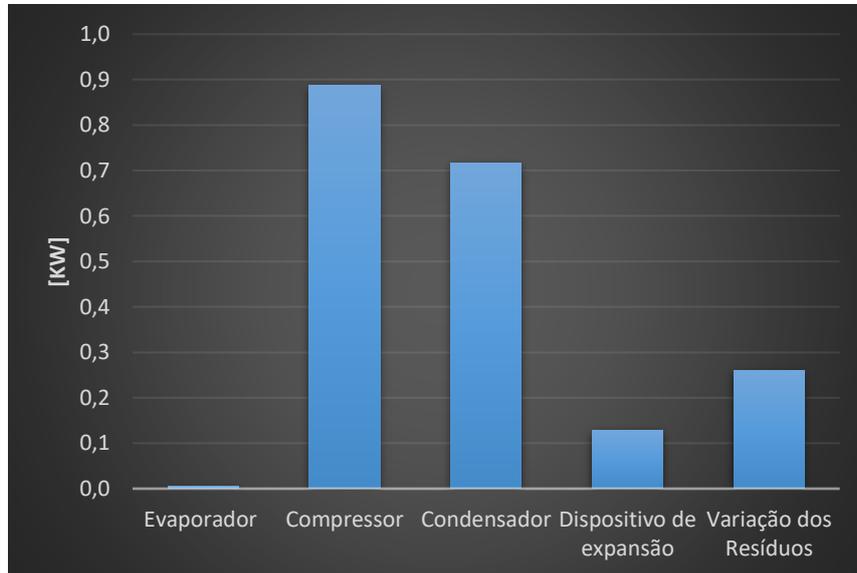
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 8 – Simulação de 15% de degradação no condensador e compressor



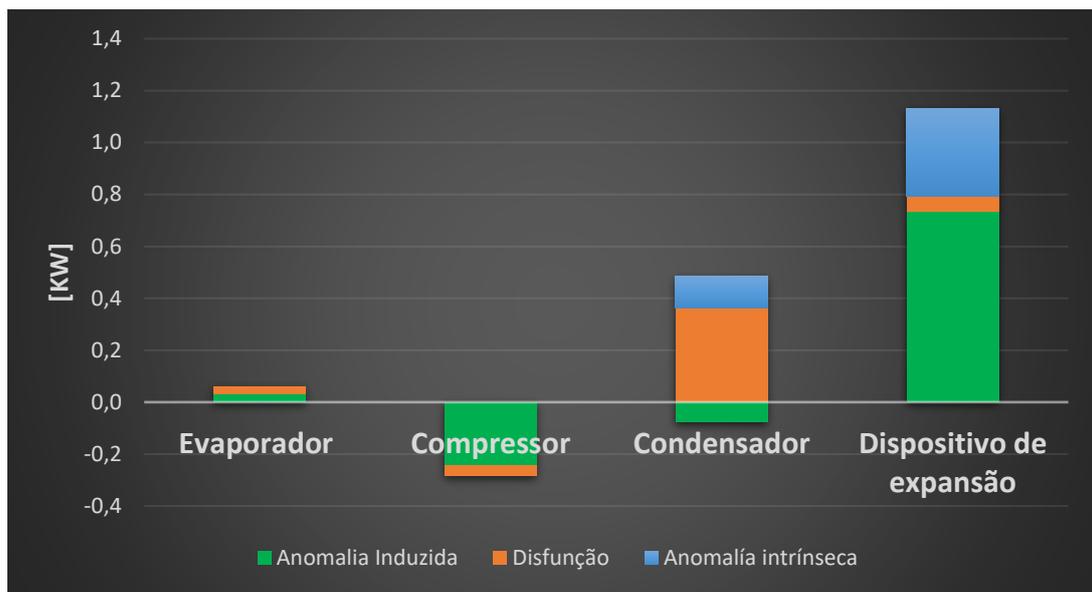
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 8.



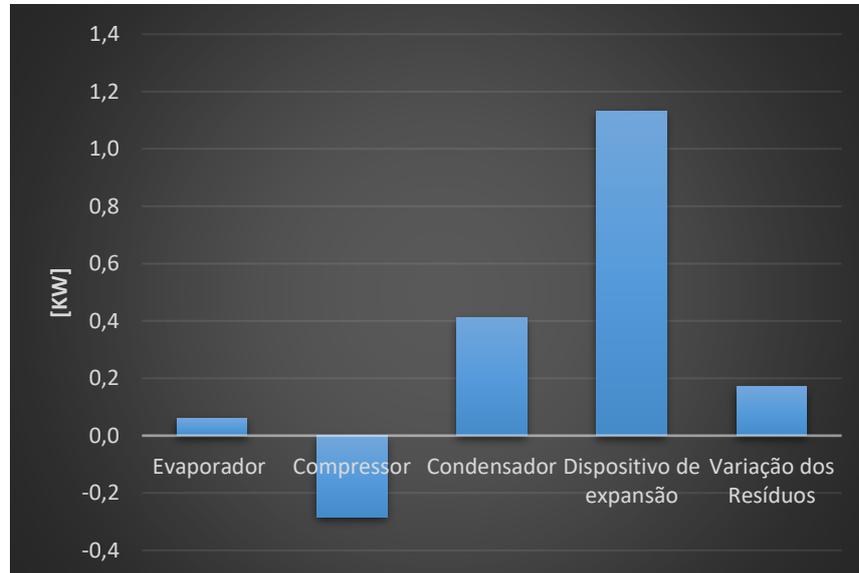
Fonte: O Autor

**Figura – Caso 9 – Simulação de 15% de degradação no condensador e válvula**



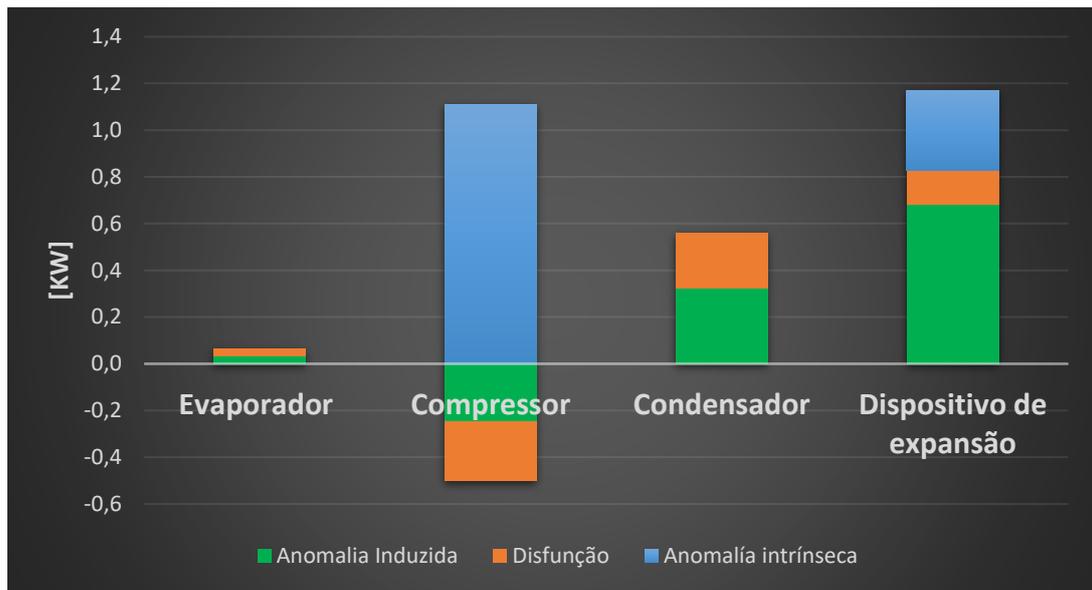
Fonte: O Autor

**Figura – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 9.**



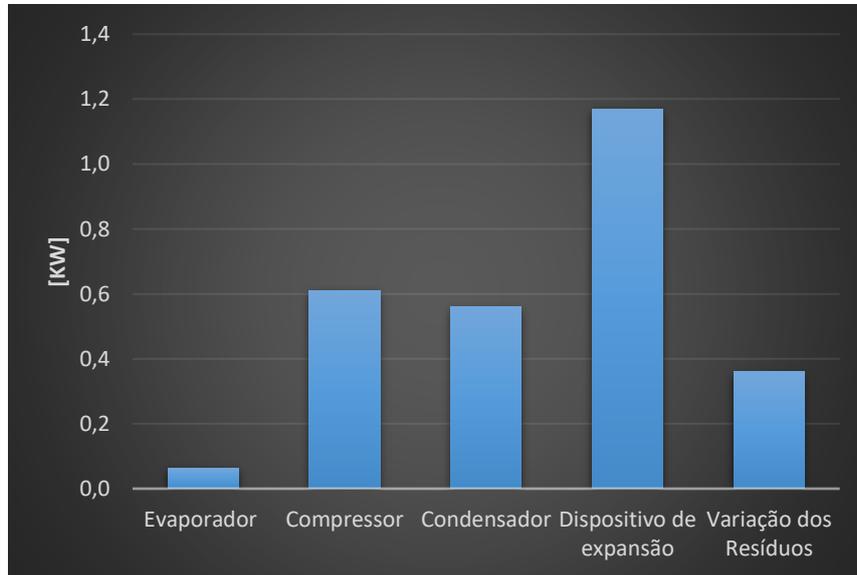
Fonte: O Autor

**Figura – Caso 10 – Simulação de 15% de degradação no compressor e válvula**



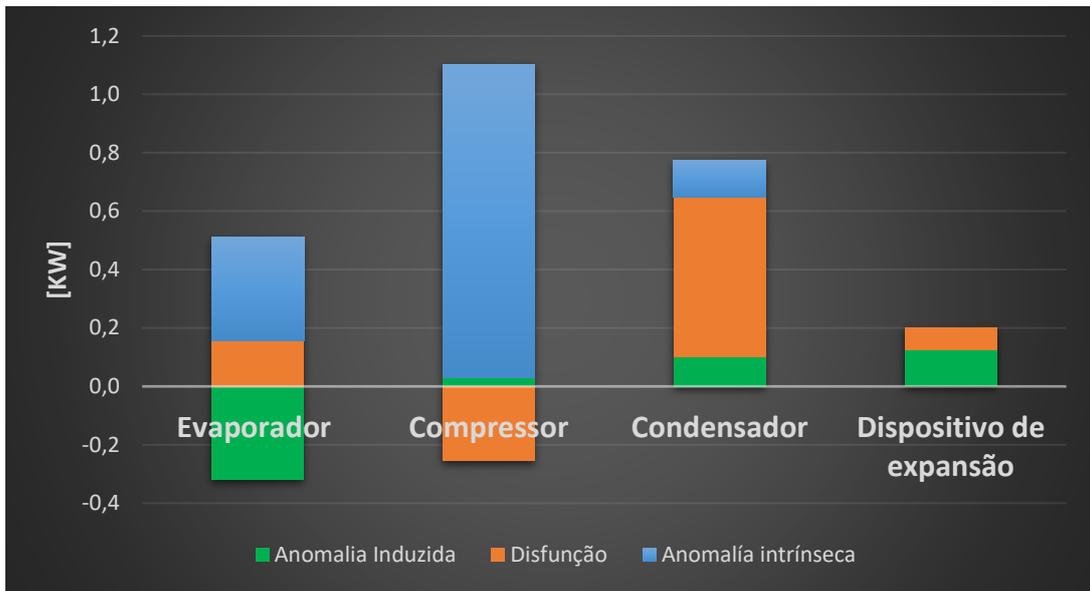
Fonte: O Autor

**Figura – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 10.**



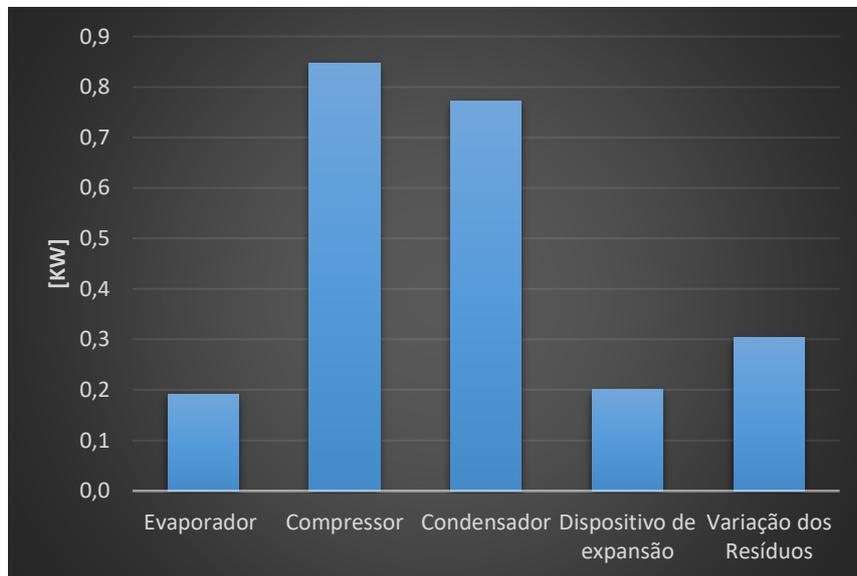
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 11 – Simulação de 15% de degradação no evaporador, condensador e compressor



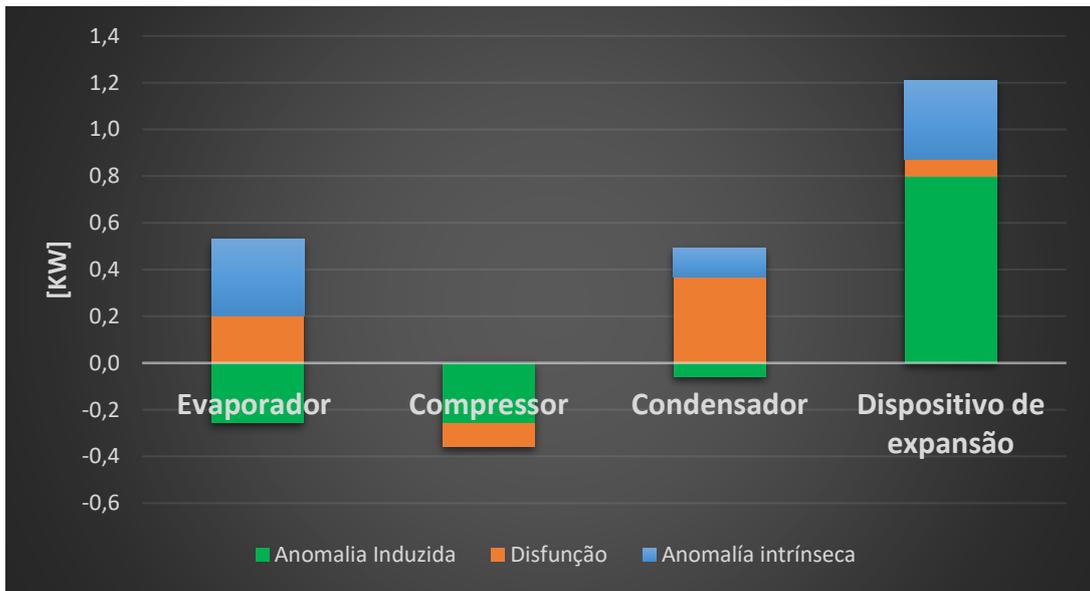
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 11.



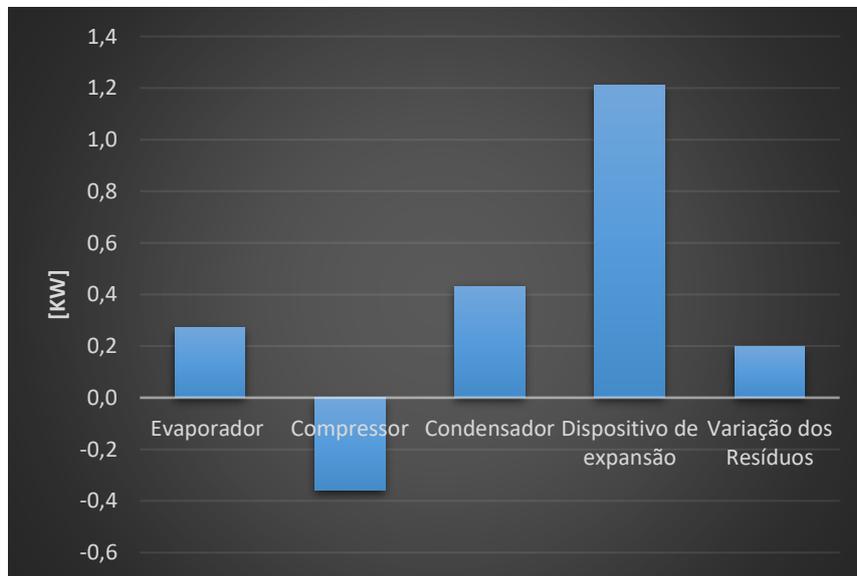
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 12 – Simulação de 15% de degradação no evaporador, condensador e válvula



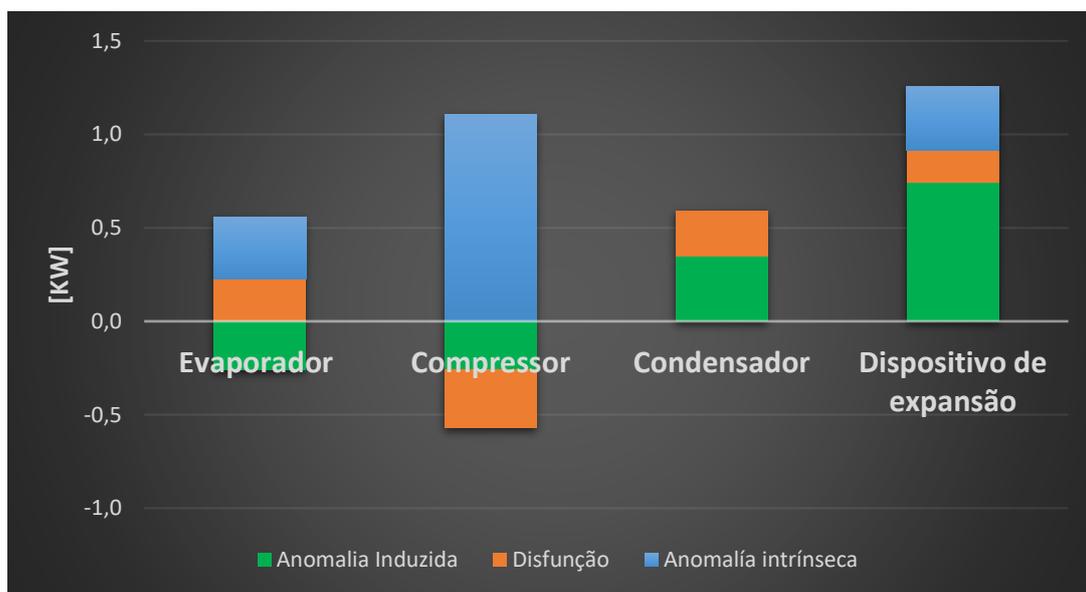
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 12.



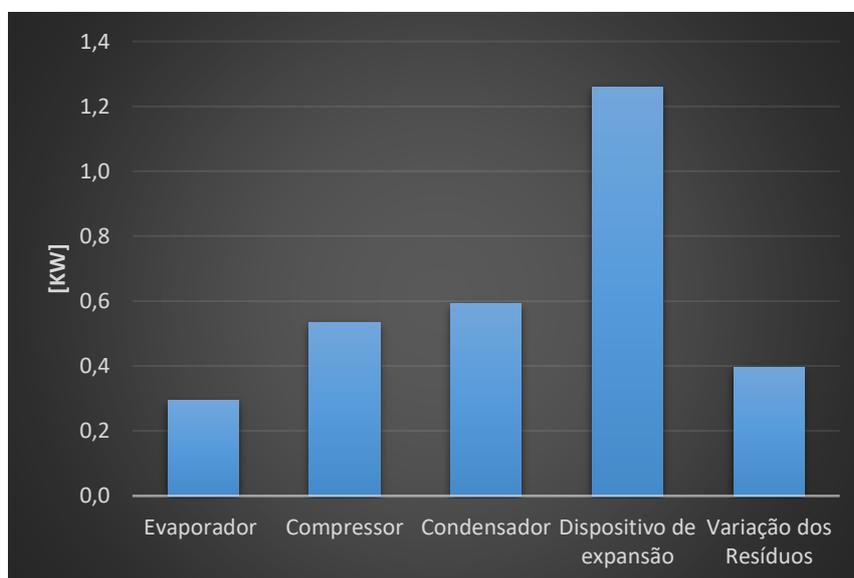
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 13 – Simulação de 15% de degradação no evaporador, compressor e válvula



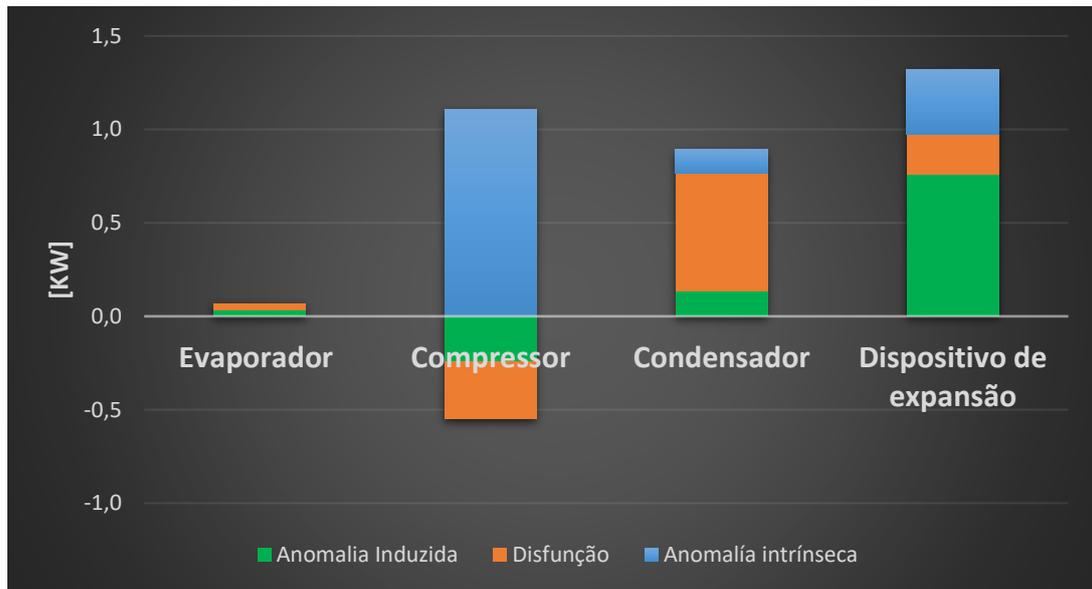
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 13.



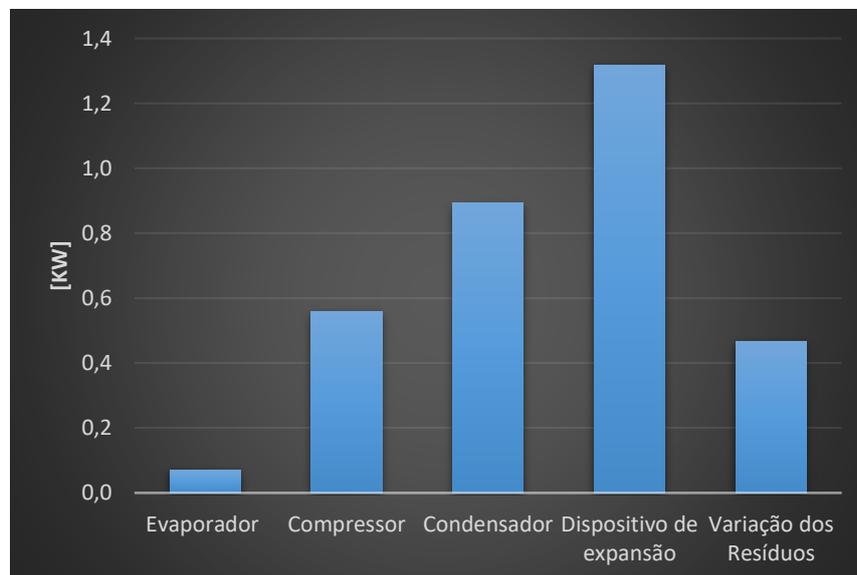
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 14 – Simulação de 15% de degradação no condensador, compressor e válvula



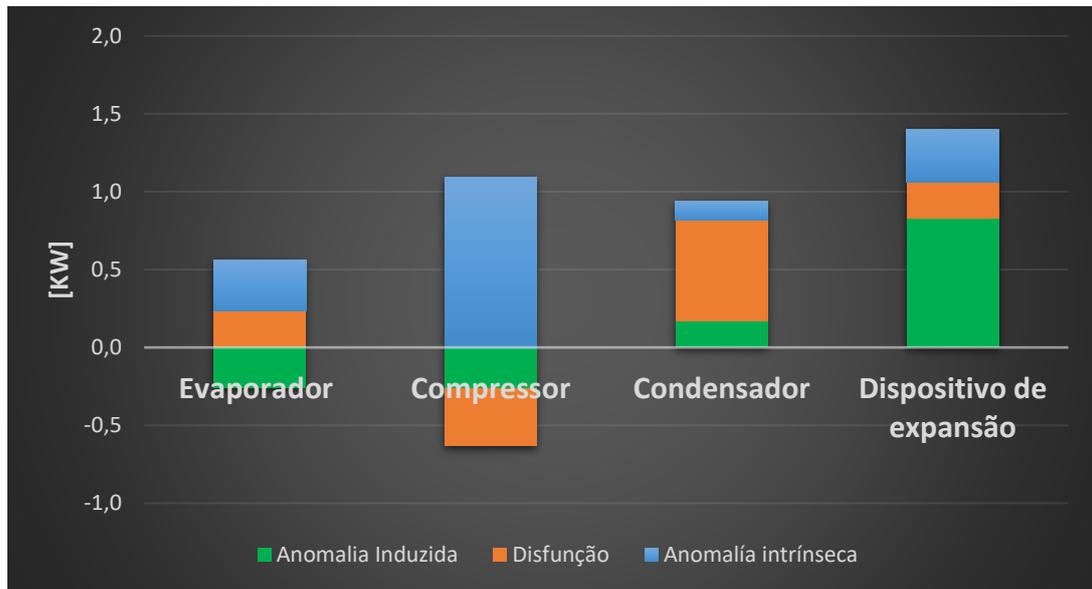
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 14.



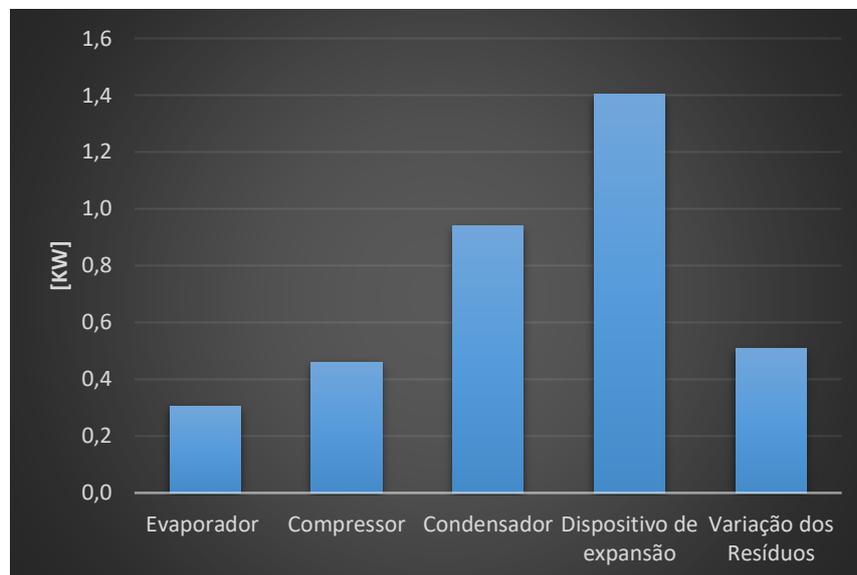
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 15 – Simulação de 15% de degradação em todos os equipamentos: no evaporador, condensador, compressor e válvula de expansão.



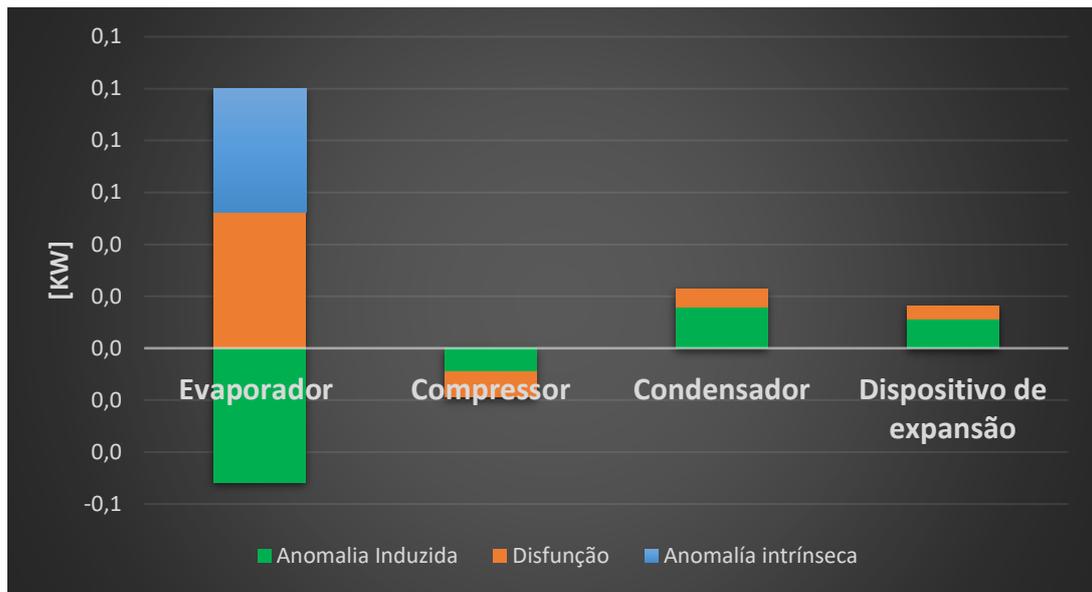
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 15.



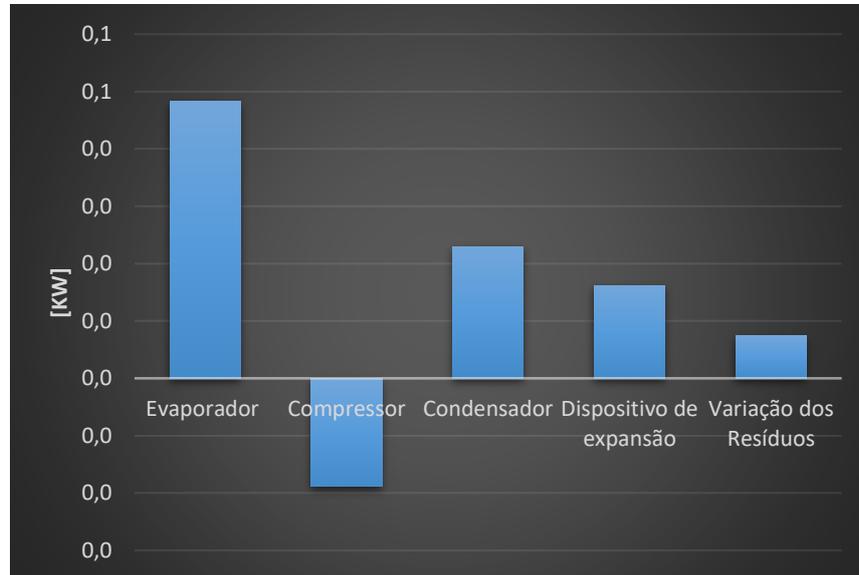
Fonte: O Autor

**Figura – Caso 1 – Simulação de 5% de degradação no evaporador**



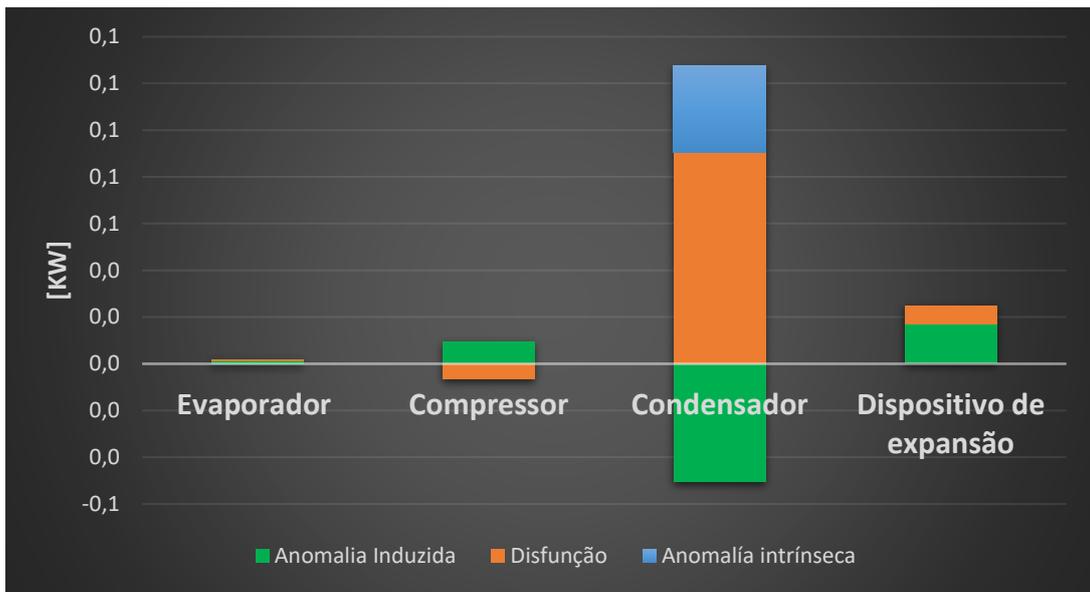
Fonte: O Autor

**Figura – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 1.**



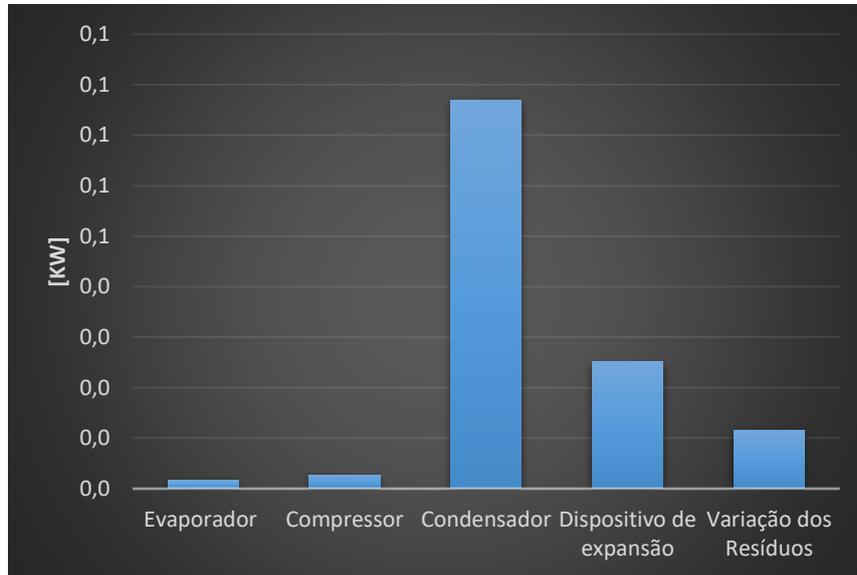
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 2– Simulação de 5% de degradação no condensador



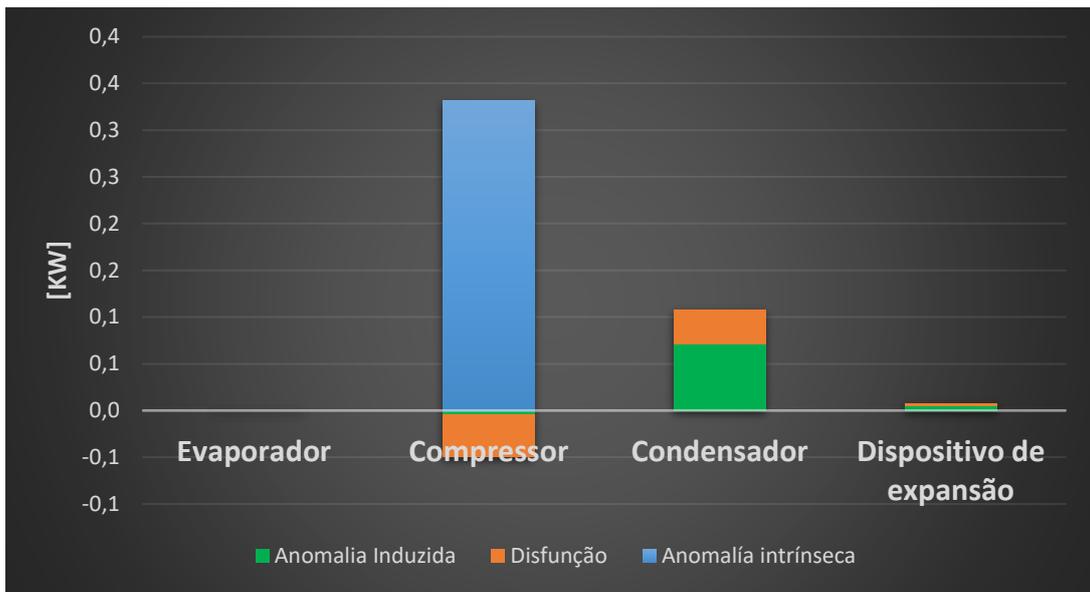
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 2.



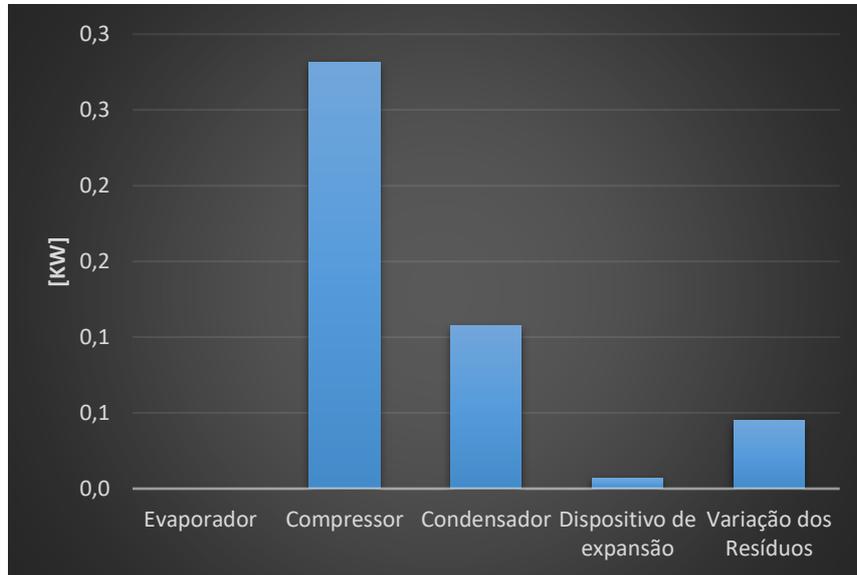
Fonte: O Autor

**Figura – Caso 3 – Simulação de 5% de degradação no compressor**



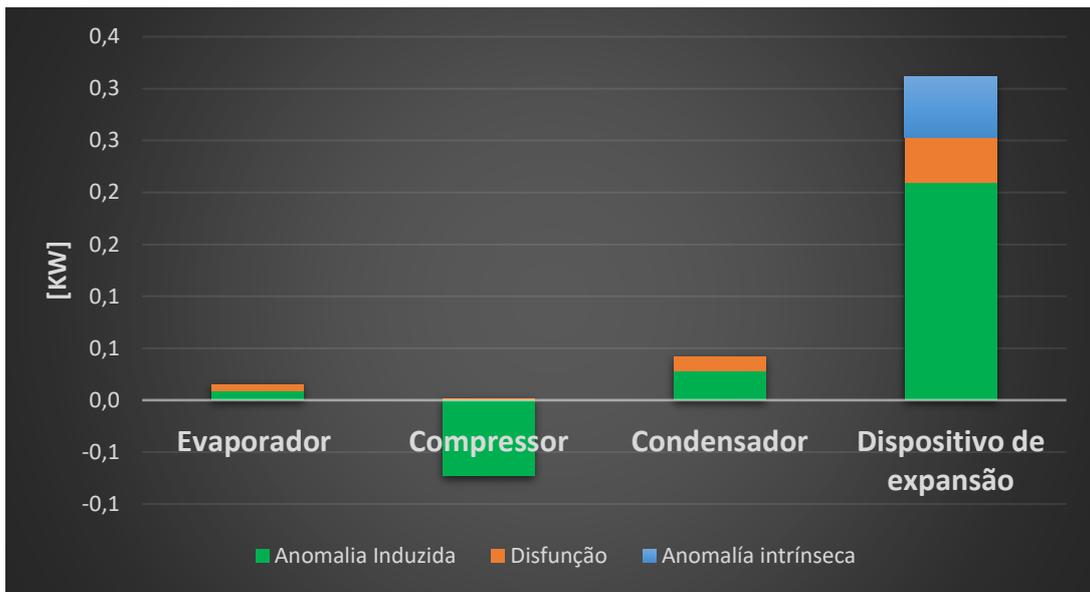
Fonte: O Autor

**Figura – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 3.**



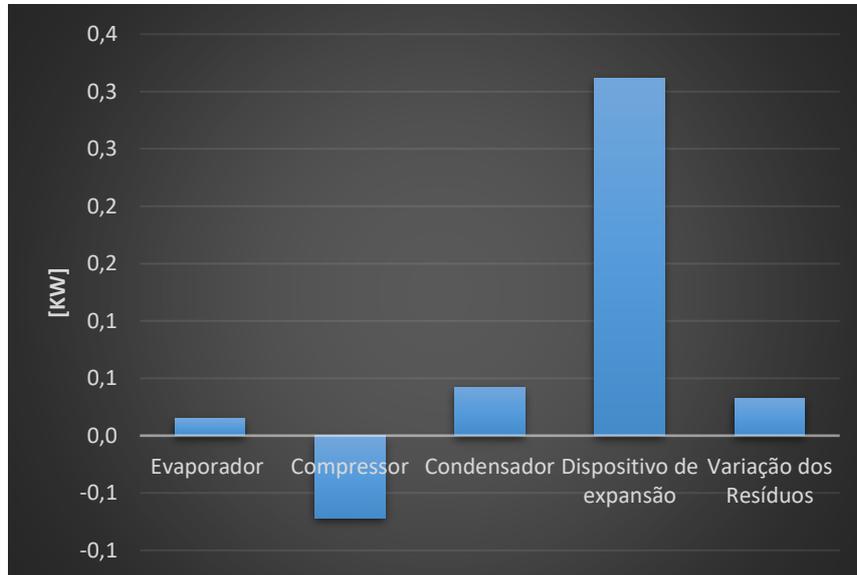
Fonte: O Autor

**Figura – Caso 4 – Simulação de 5% de degradação na válvula de expansão**



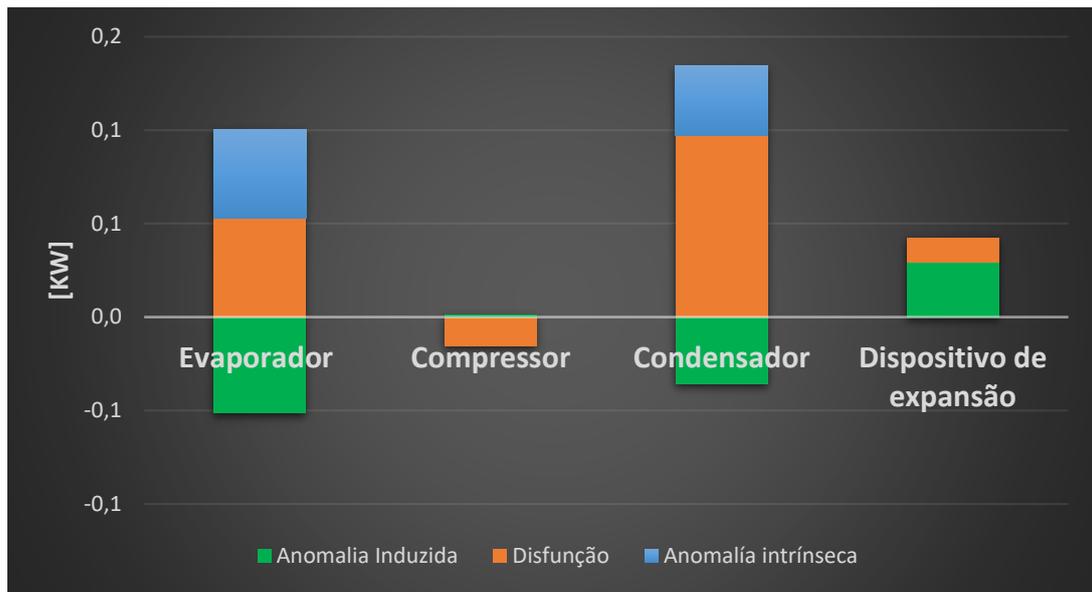
Fonte: O Autor

**Figura – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 4.**



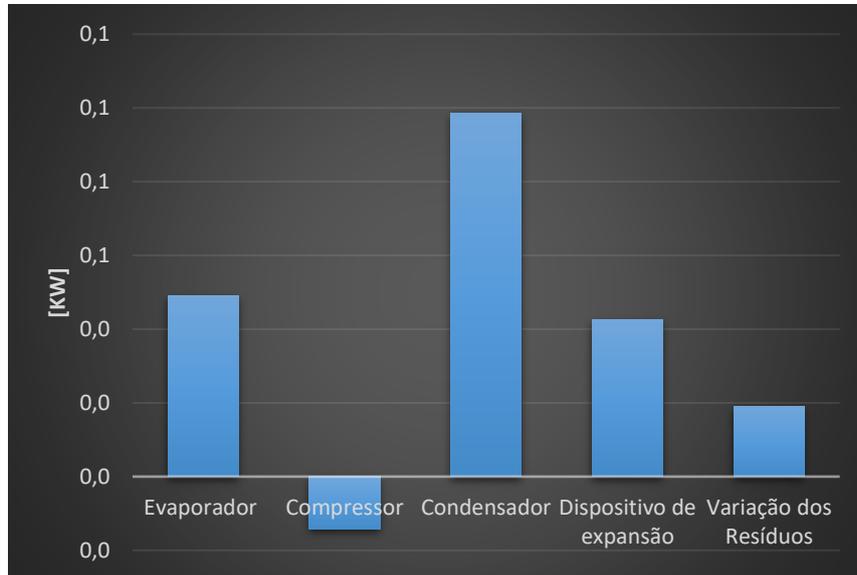
Fonte: O Autor

**Figura – Caso 5 – Simulação de 5% de degradação no evaporador e condensador**



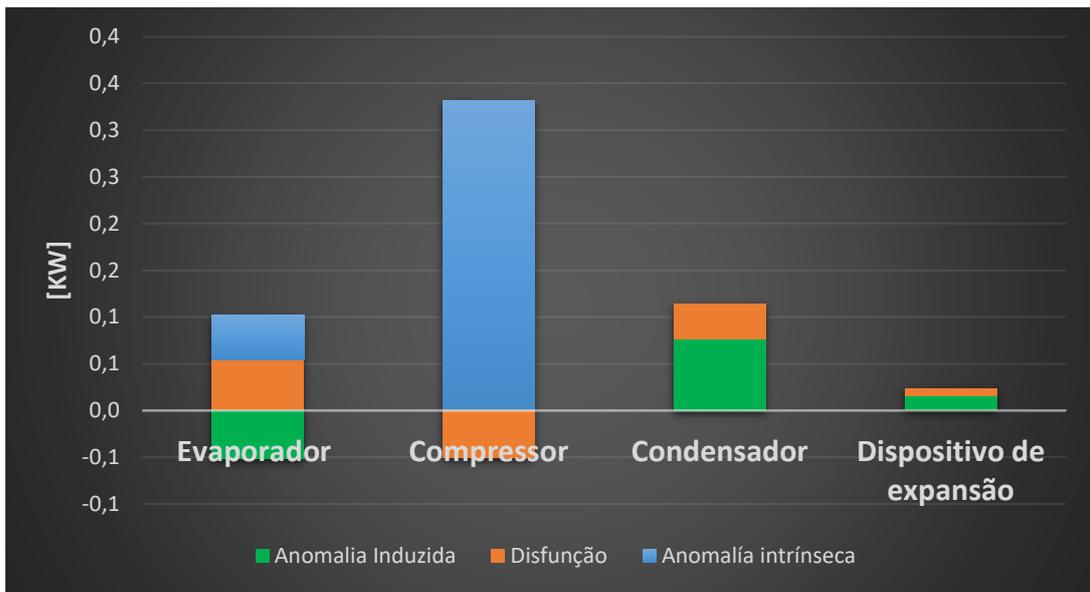
Fonte: O Autor

**Figura – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 5.**



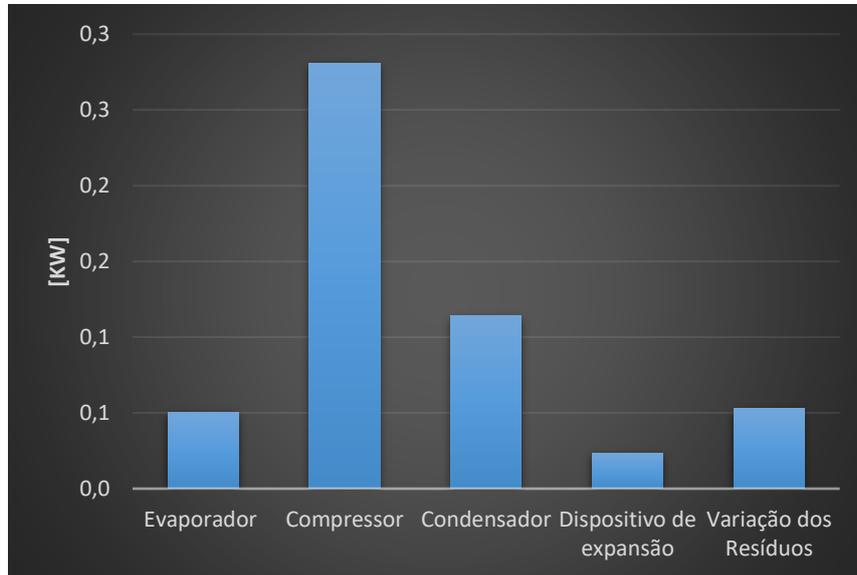
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 6– Simulação de 5% de degradação no evaporador e compressor



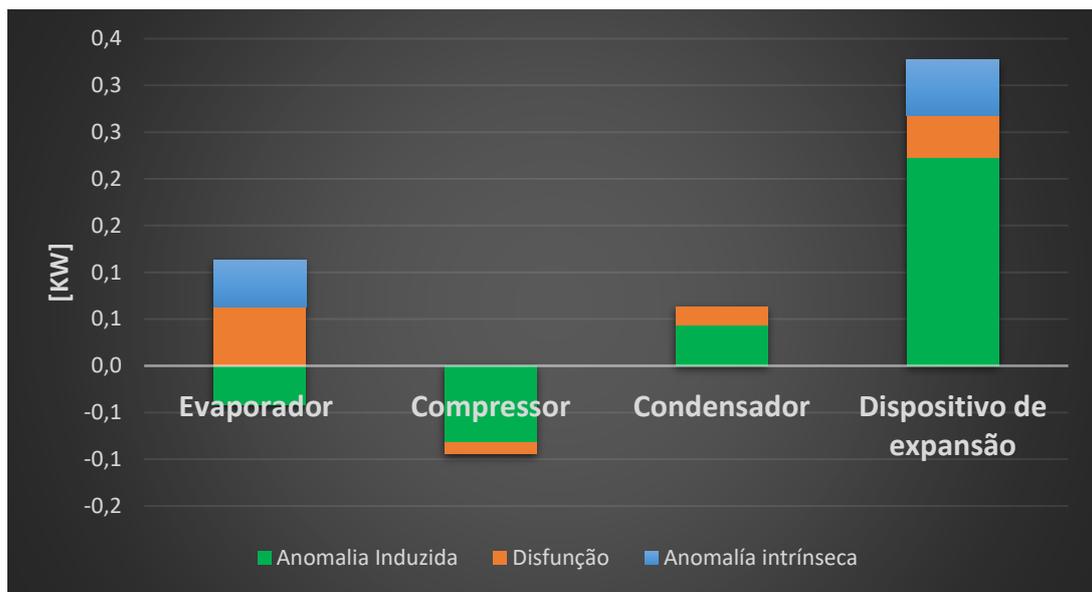
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 6.



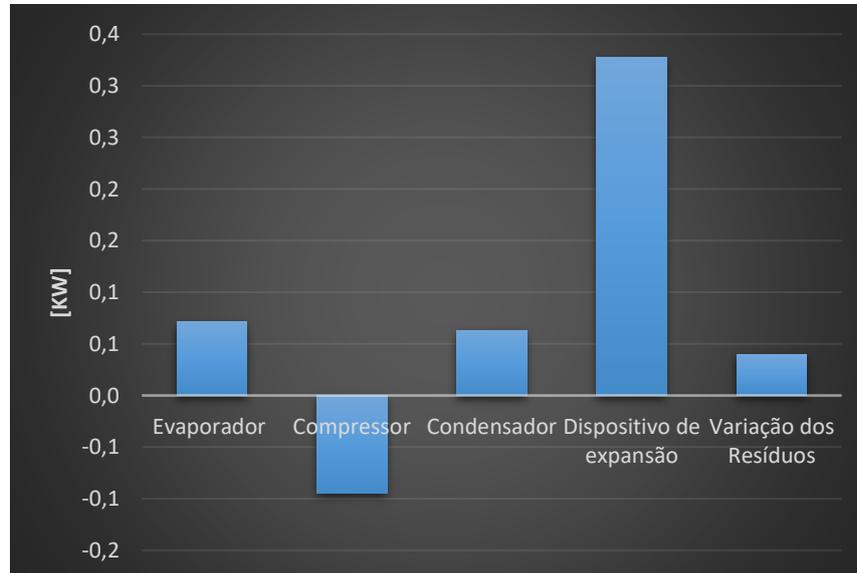
Fonte: O Autor

**Figura – Caso 7– Simulação de 5% de degradação no evaporador e válvula de expansão**



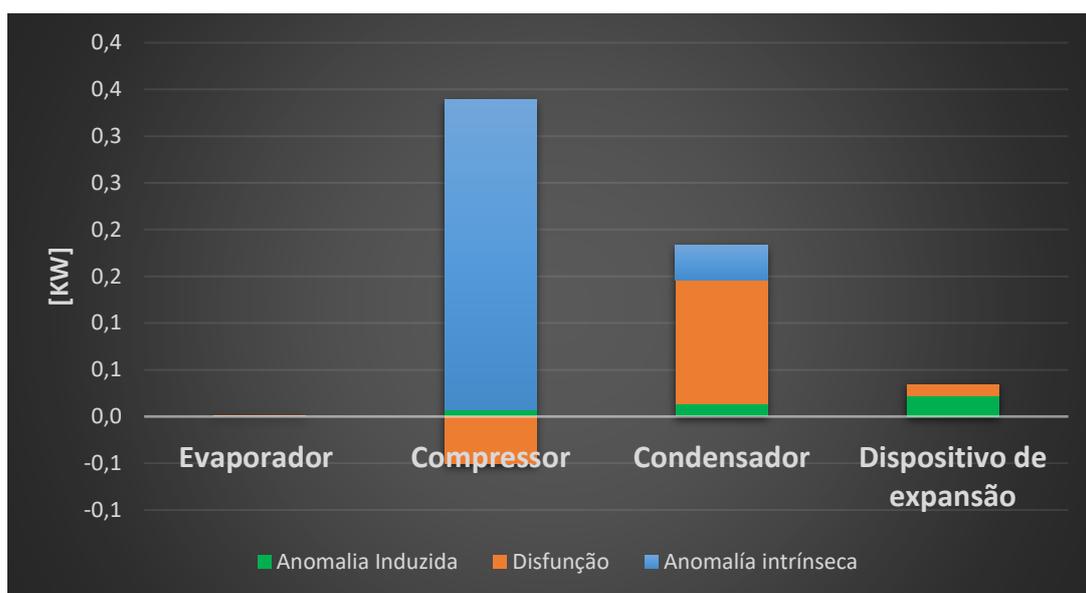
Fonte: O Autor

**Figura – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 7.**



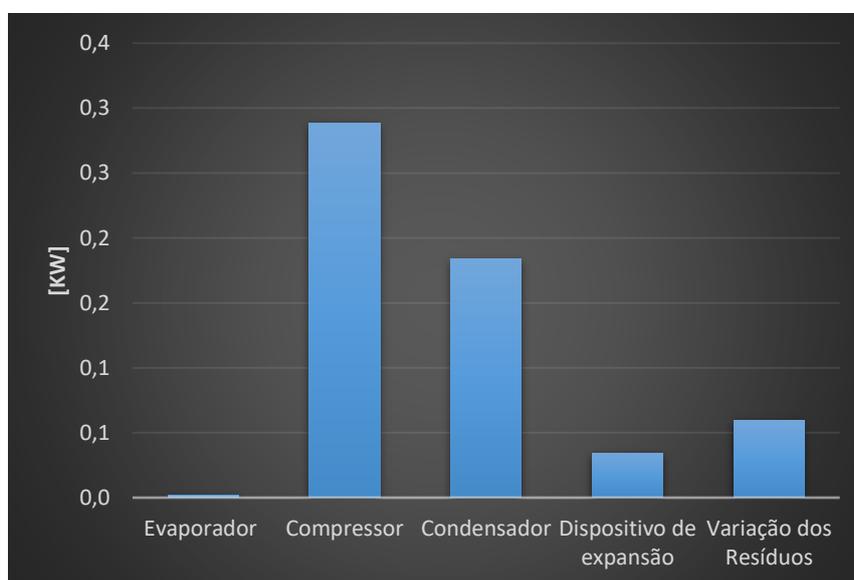
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 8 – Simulação de 5% de degradação no condensador e compressor



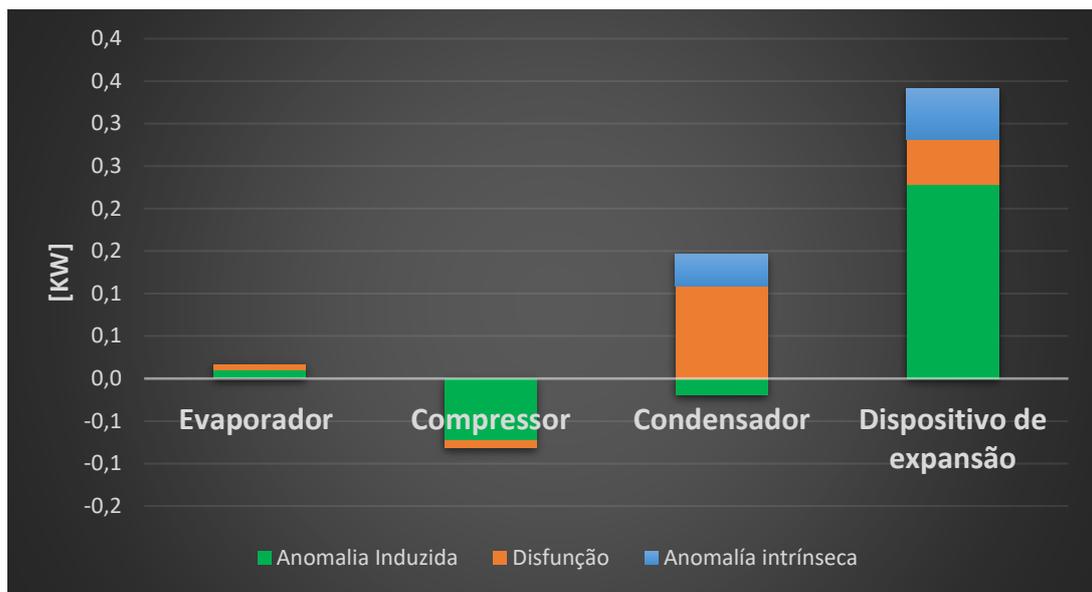
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 8.



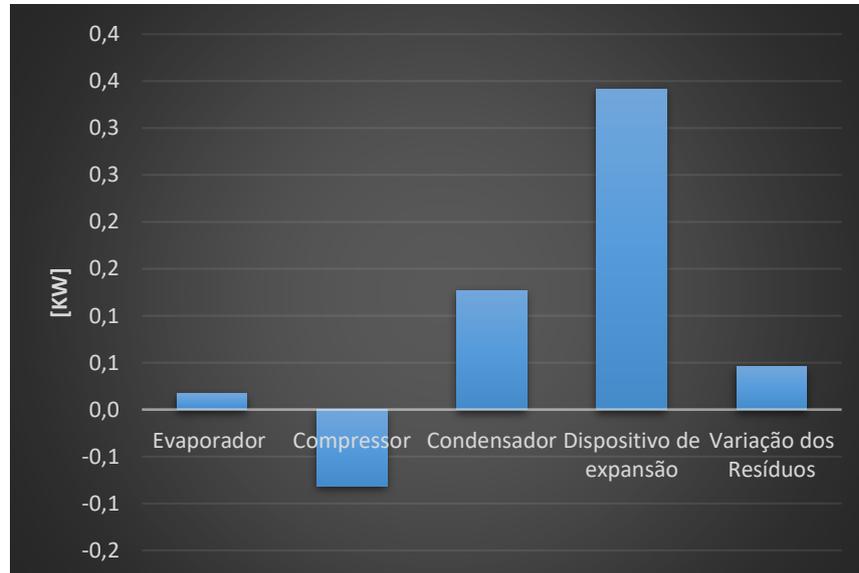
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 9 – Simulação de 5% de degradação no condensador e válvula



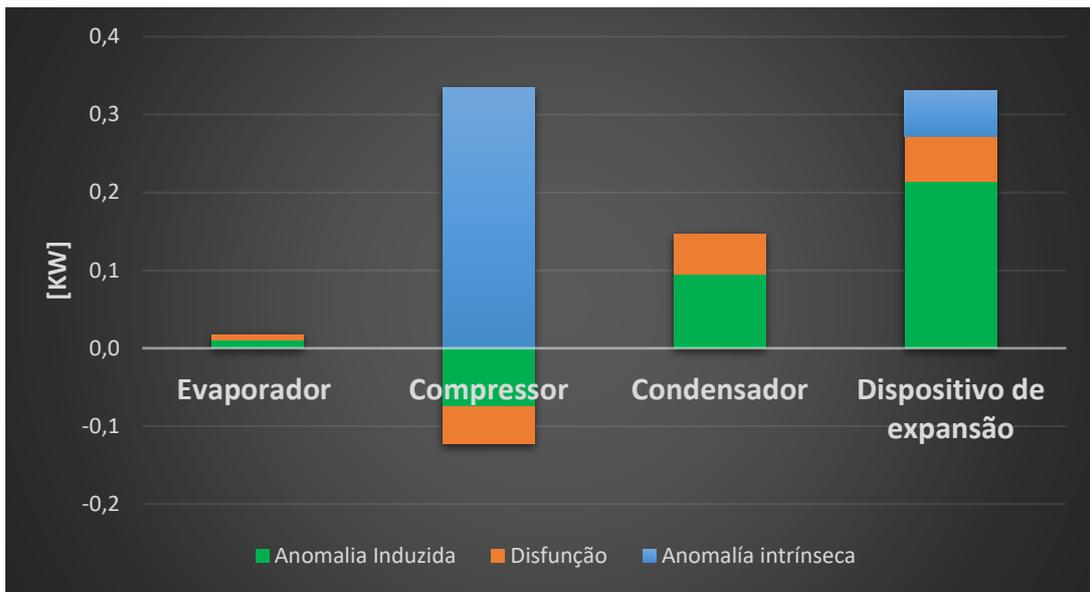
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 9.



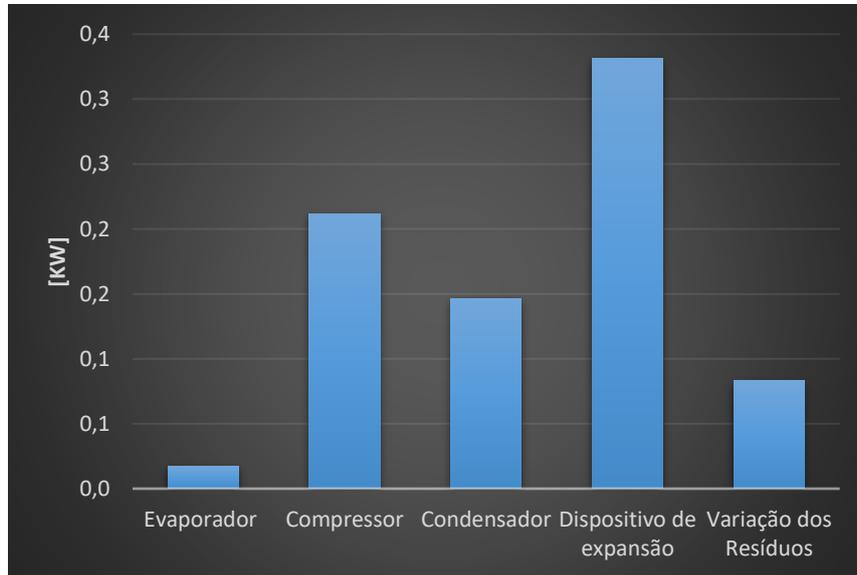
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 10 – Simulação de 5% de degradação no compressor e válvula



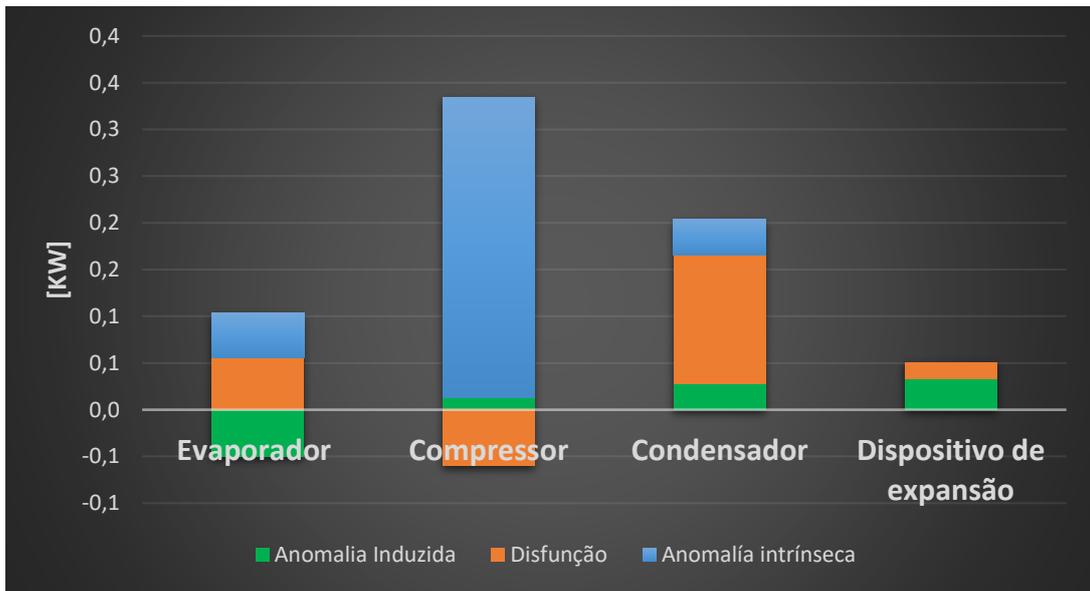
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 10.



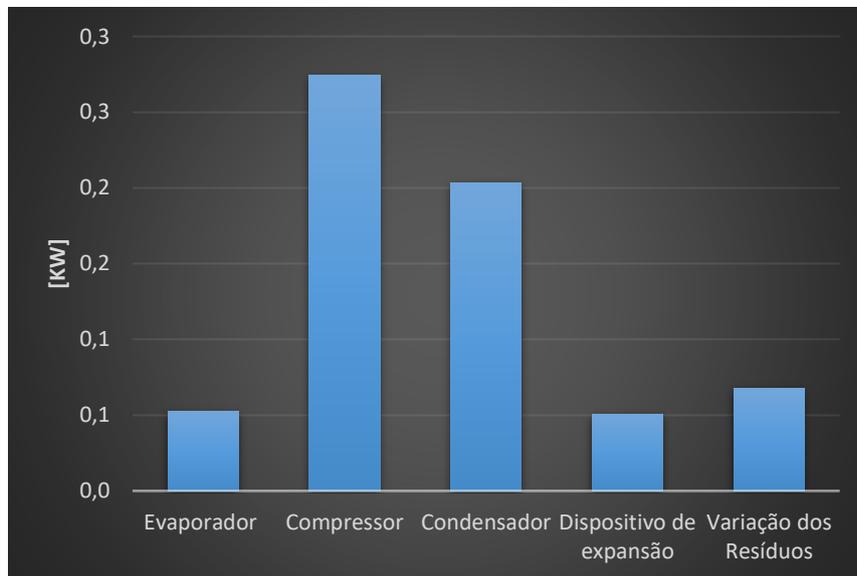
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 11 – Simulação de 5% de degradação no evaporador, condensador e compressor



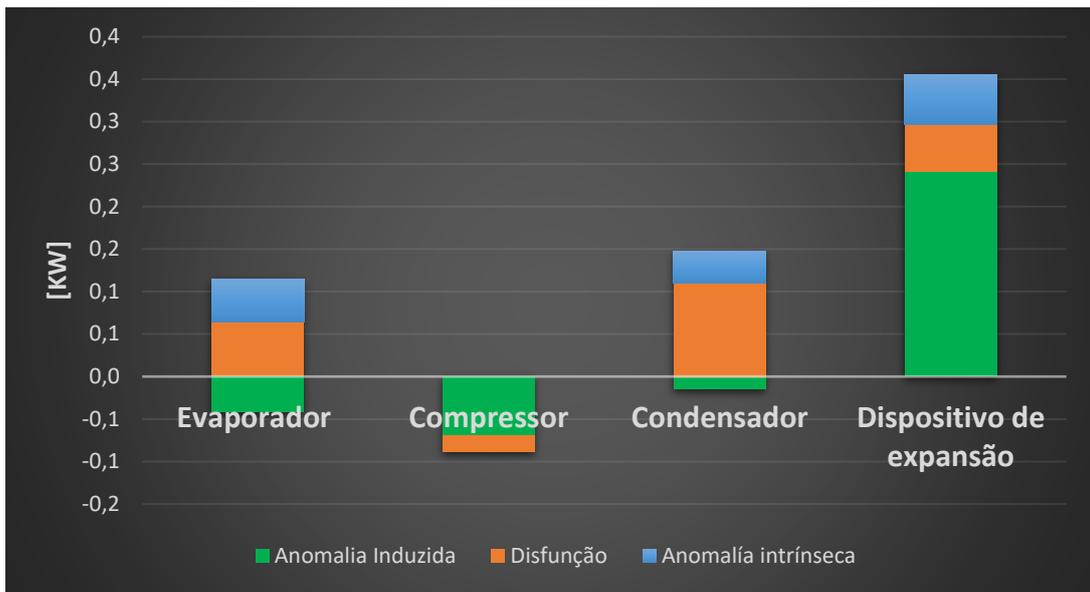
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 11.



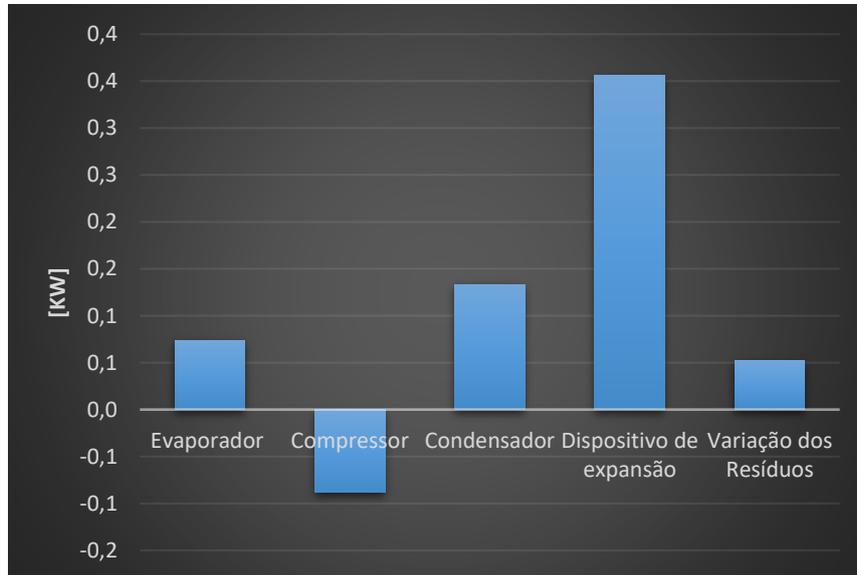
Fonte: O Autor

**Figura – Caso 12 – Simulação de 5% de degradação no evaporador, condensador e válvula**



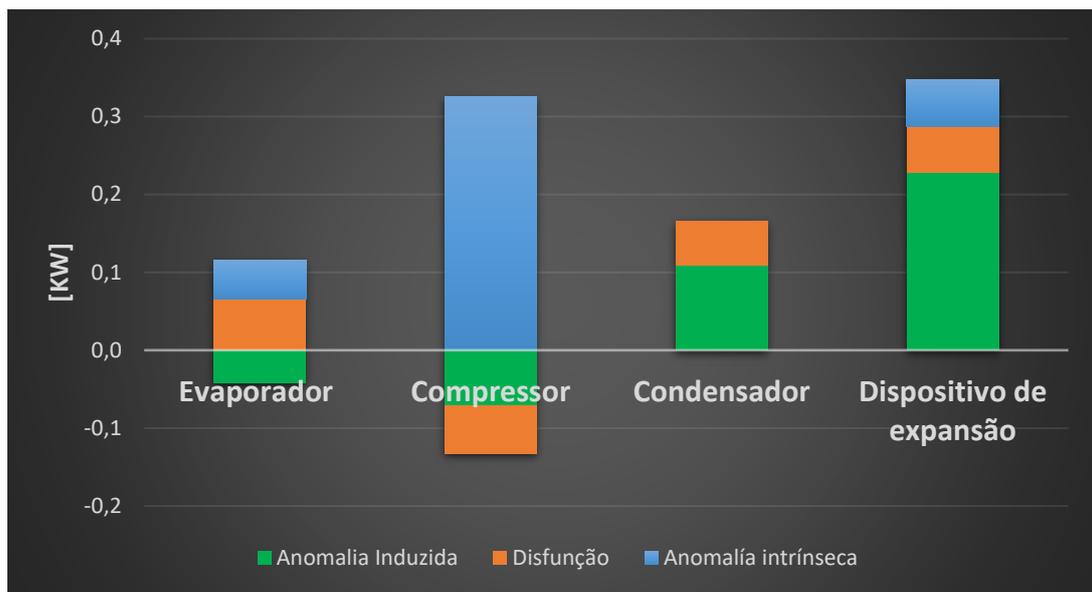
Fonte: O Autor

**Figura – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 12.**



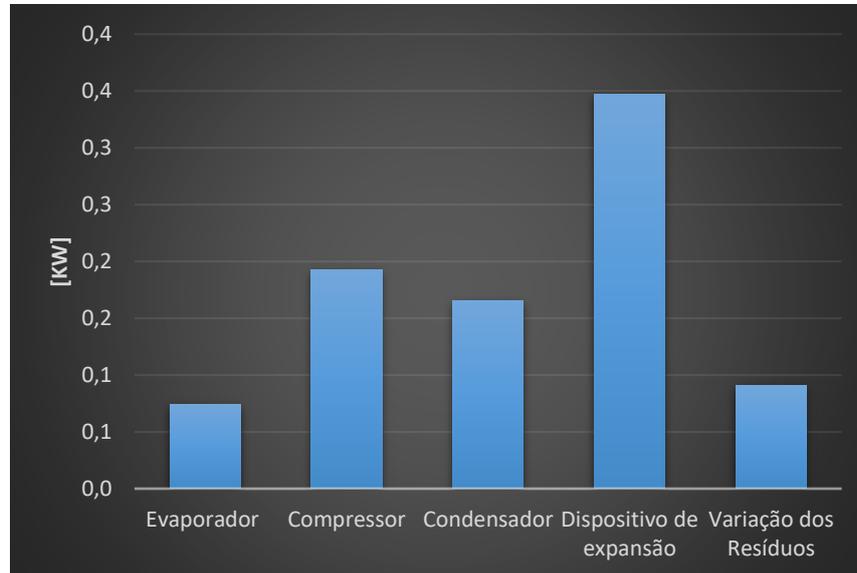
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 13 – Simulação de 5% de degradação no evaporador, compressor e válvula



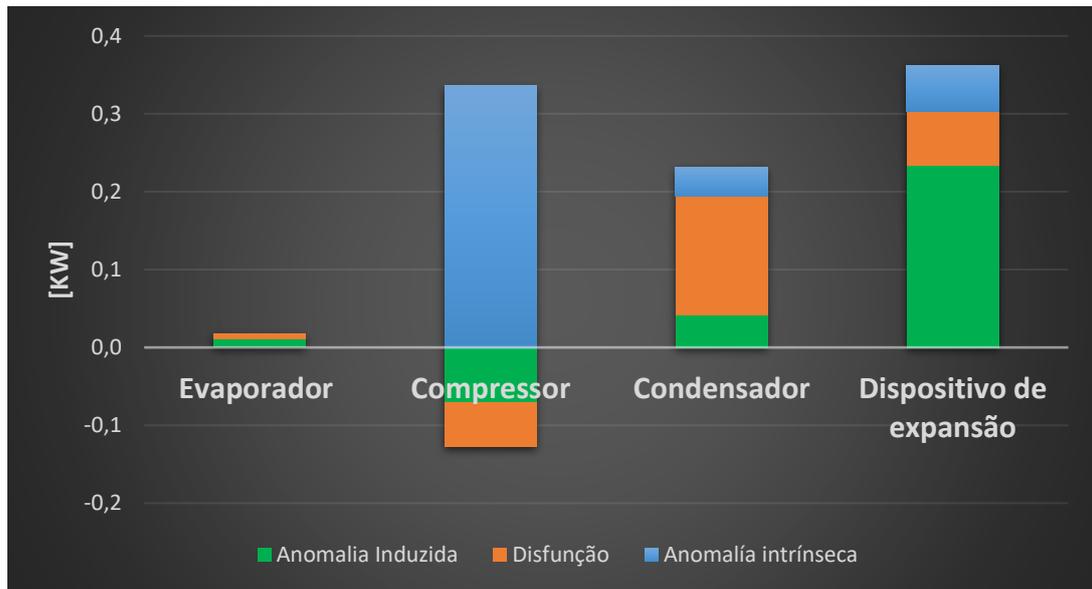
Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 13.



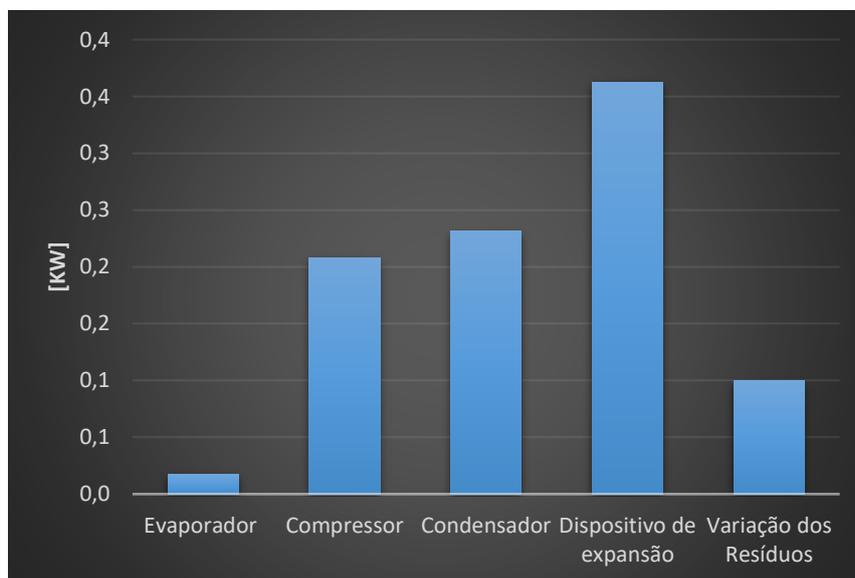
Fonte: O Autor

**Figura – Caso 14 – Simulação de 5% de degradação no condensador, compressor e válvula**



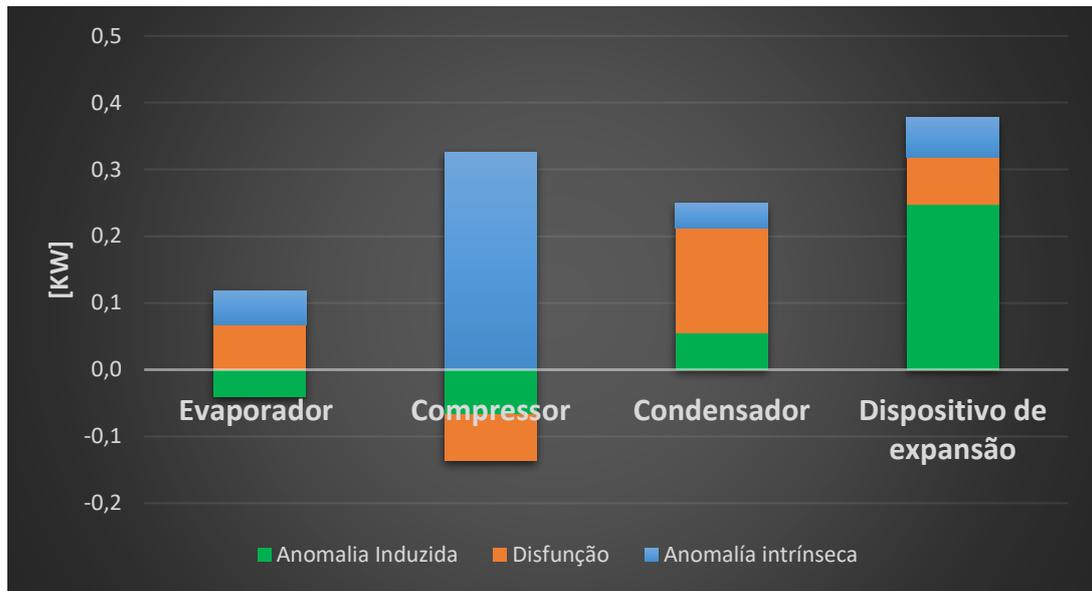
Fonte: O Autor

**Figura – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 14.**



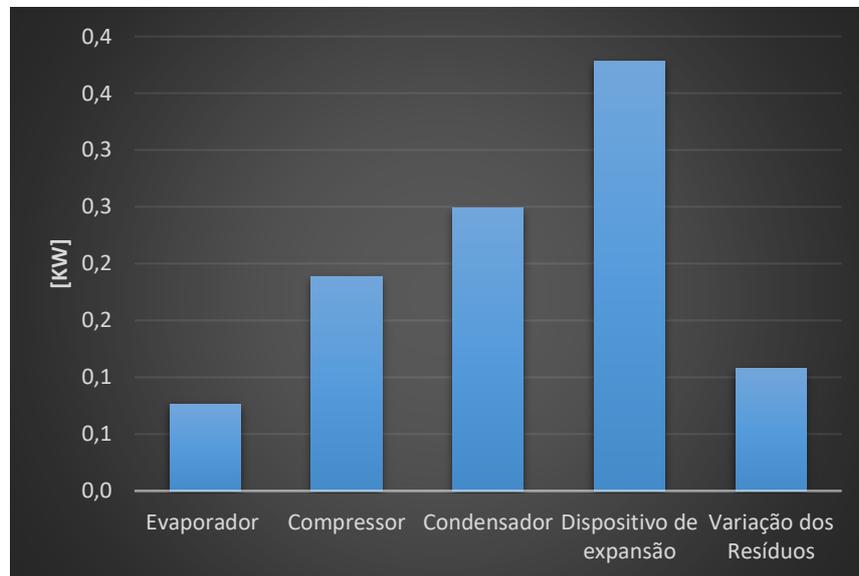
Fonte: O Autor

**Figura** – Caso 15 – Simulação de 5% de degradação em todos os equipamentos: no evaporador, condensador, compressor e válvula de expansão.



Fonte: O Autor

**Figura** – Contribuição de cada componente no impacto no consumo de energia elétrica, devido à simulação do caso 15.



Fonte: O Autor

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, B. S. G. **Análise exergoeconômica avançada de um sistema de cogeração otimizado.** 2018.

BP. **Statistical Review of World Energy** – 69<sup>th</sup> edition. 2020. Disponível em: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf>

CATRINI, P. et al. **An integrated approach based on Life Cycle Assessment and Thermoconomics: Application to a water-cooled chiller for an air conditioning plant.** *Energy*, v. 160, p. 72–86, out. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544218312878>>.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Air conditioning use emerges as one of the key drivers of global electricity-demand growth.** 2018. Disponível em: <https://www.iea.org/news/air-conditioning-use-emerges-as-one-of-the-key-drivers-of-global-electricity-demand-growth>.

IEA – INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Electricity Information: Overview.** 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview>

LEIVA-ILLANES, Roberto et al. **Comparison of the levelized cost and thermo-economic methodologies – Cost allocation in a solar polygeneration plant to produce power, desalted water, cooling and process heat.** *Energy Conversion and Management*, v. 168, p. 215–229, jul. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890418304552>>.

LORENZONI, R. A., **Uma Avaliação da Melhoria na Precisão do Diagnóstico Termoeconômico Por Meio da Desagregação da Exergia e do Isolamento de Equipamentos Dissipativos.** 2017.

LOURENÇO, Atilio Barbosa. **Uma abordagem termoeconômica sistemática para modelagem de ciclos termodinâmicos.** 2016.

MENDES, T. et al. **Disaggregation models for the thermo-economic diagnosis of a vapor compression refrigeration system.** *Energy*, v. 193, p. 116731, fev. 2020. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544219324260>>.

MENDES, T. **Desenvolvimento de um Sistema de Diagnóstico Termoeconômico para Sistemas de Refrigeração Industrial Utilizando Redes Neurais Artificiais.** 2018. 246 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2018.

- MORAN, M.J.; SHAPIRO, H.N. **Princípios de termodinâmica para engenharia**, 7ª edição. Rio de Janeiro: LTC Editora, 2013.
- OMER, A. M. **Energy, environment and sustainable development. Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 2008.
- OROZCO, D. J. R. **Operadores Exergéticos: uma Nova Abordagem de Diagnóstico Termoeconômico para Identificar Anomalias Intrínsecas em Ciclos Térmicos de Potência**. 2017. UNIFEI, 2017.
- PIACENTINO, A.; TALAMO, M. **Critical analysis of conventional thermoeconomic approaches to the diagnosis of multiple faults in air conditioning units: Capabilities, drawbacks and improvement directions. A case study for an air-cooled system with 120 kW capacity**. International Journal of Refrigeration, v. 36, n. 1, p. 24–44, 2013.
- PICALLO-PEREZ, A. et al. **A novel thermoeconomic analysis under dynamic operating conditions for space heating and cooling systems**. Energy, v. 180, p. 819–837, ago. 2019. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544219309752>>.
- PICALLO-PEREZ, A., LAZZARETTO, A., SALA, J. M. **Overview and implementation of dynamic thermoeconomic & diagnosis analyses in HVAC&R systems**. Journal of Building Engineering, 101429. 2020. doi:10.1016/j.job.2020.101429.
- QUADRI, N. **Sistemas de Aire Condicionado: Calidad del aire interior**. 1ª Edição, Elsina, 2001.
- SALA, L. J.M. P; PICALLO-PEREZ, A. **Operational diagnosis of thermal installations in buildings**. Exergy Analysis and Thermoeconomics of Buildings. [S.l.]: Elsevier, 2020. p. 721–788. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780128176115000096>>.
- MONTEIRO, M.A.G. et al. **Eficiência energética em sistemas de refrigeração industrial e comercial**. Rio de Janeiro, Eletrobras; Procel, 2005. 316 p.
- PICALLO-PEREZ, A. et al. **Delving into Thermoeconomics: A Brief Theoretical Comparison of Thermoeconomic Approaches for Simple Cooling Systems**. Frontiers in Sustainability, v. 2, 9 abr. 2021.
- STOECKER, W., F., JABARDO, J., M. S. **Refrigeração industrial**. 2ª Edição, Edgard Blücher, 2002.
- SZARGUT, J. **Chemical Exergies of the Elements**. Applied Energy, v. 32, n. 4, p. 269–286, 1989.

TORRES, C.; VALERO, A. **The Exergy Cost Theory Revisited**. *Energies*, vol. 14, n° 6, p. 1594, 13 mar. 2021. DOI 10.3390/en14061594. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/en14061594>.

TORRES, C. et al. **Structural theory and thermoeconomic diagnosis. Part I: on malfunction and dysfunction analysis**. ECOS. Anais...Tokyo: 1999.

VALERO, A. et al. **GAUDEAMO: A system for energetic/exergetic optimization of coal power plants**. *Computer-aided Engineering of Energy Systems*, v. 1, n. Optimization-AES-Vol. 2-1, p. 43–49, 1986.

VALERO, A.; LOZANO, M. A.; MUÑOZ, M. **A general theory of exergy savings – part I: On the exergetic cost**. *Computer-aided Engineering of Energy Systems*, v. 3, n. Second Law Analysis and Modelling, p. 1–8, 1986.

VALERO, A., SERRA, L., UCHE, J. **Fundamentals of Exergy Cost Accounting and Thermoeconomics. Part II: Applications**. *Journal of Energy Resources Technology*. 2006.

VALERO, A., & Torres, C. **Relative Free Energy Function and Structural Theory of Thermoeconomics**. *Energies*, 13(8), 2024. doi:10.3390/en13082024. 2020.

WANG, K. S. **Handbook of air conditioning and refrigeration**. McGraw-Hill, 2000.

YILMAZ, Ceyhun. **Thermoeconomic cost analysis and comparison of methodologies for Dora II binary geothermal power plant**. *Geothermics*, v. 75, p. 48–57, set. 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0375650518300026>>.

## 9. ANEXOS

### 9.1 ANEXO A: Dados do catálogo para o evaporador

Figura A1 – Dados do catálogo para o evaporador FTBH841 escolhido para regressão linear

DADOS DE CAPACIDADES												
Modelo	¹Capacidade Nominal (kcal/h) $\Delta t$ : 6K										Motoventiladores	
	Temperatura de Evaporação (°C)										Qtde Ø 450 (mm)	Vazão de ar (m³/h)
	10	5	0	-5	-10	-15	-20	-25	-30	-35		
FTBH 811	5.496	5.388	5.166	4.953	4.749	4.679	4.610	4.542	4.474	4.344	1	6.940
FTBH 812	6.779	6.499	6.190	5.895	5.652	5.568	5.486	5.275	5.024	4.785	1	6.845
FTBH 813	7.728	7.409	7.104	6.811	6.530	6.433	6.338	6.245	6.152	6.062	1	6.760
FTBH 821	11.176	10.850	10.403	9.974	9.563	9.422	9.282	9.145	9.010	8.877	2	13.880
FTBH 822	13.479	12.923	12.391	11.880	11.390	11.222	11.056	10.892	10.731	10.573	2	13.690
FTBH 823	15.561	14.919	14.304	13.714	13.149	12.955	12.763	12.575	12.389	12.206	2	13.520
FTBH 831	16.175	16.015	15.355	14.722	14.115	13.975	13.837	13.700	13.564	13.430	3	20.820
FTBH 832	20.886	20.025	19.199	18.408	17.649	17.388	17.131	16.878	16.629	16.144	3	20.535
FTBH 833	23.382	22.418	21.494	20.608	19.758	19.466	19.178	18.895	18.616	18.073	3	20.280
<b>FTBH 841</b>	<b>24.936</b>	<b>24.447</b>	<b>23.439</b>	<b>22.472</b>	<b>21.546</b>	<b>21.228</b>	<b>21.017</b>	<b>20.809</b>	<b>20.603</b>	<b>20.299</b>	<b>4</b>	<b>27.360</b>
FTBH 842	31.293	30.003	28.766	27.580	26.443	26.052	25.667	25.288	24.914	23.728	4	27.000

¹Capacidades para 60 Hz, multiplicar por 0,9 para 50 Hz.

Fonte: O autor

## 9.2 ANEXO B: Dados do catálogo para o compressor

Figura B1 – Dados do catálogo do software da Bitzer para o compressor ESH730 escolhido para regressão linear

[1] BITZER Software v6.17.2 rev2594

Projeto Modo Opções Janela

Brasil Português SI

Compressor Scroll

Modo: Refrigeração e Ar Condic

Refrigerante: R22

Temperatura de referência: Ponto de Orvalho

Tipo do compressor: Compressor único

Série: ES - Série (vertical)

Seleção compressor

Capac. Frigorífica: 60

Compressor modelo: ESH730

Incluir modelos antigos:

Ponto de operação

Temp. Evaporação SST: 0 °C

Temp. Condensação SDT: 50 °C

Condições de operação

Sub resfriamento líquido: 0 K

Superaquecimento do gás: 10 K

Superaquecimento útil: 100 %

Controle de capacidade

Sem

Suprimento de eletricidade

Frequência de alimentação: 50Hz

Tensão de alimentação: 400V-Y (40S)

### Tabela de performance

Temp. Evaporação SST (to) valor inicial: 0 valor etapa: 2

Temp. Condensação SDT (tc) Dados de Entrada: 30 35 50

▼ tc	► to	0°C	-2°C	-4°C	-6°C	-8°C	-10°C	-12°C	-14°C
30 °C	Q [W]	28605	26690	24872	23147	21511	19961	18493	17102
	Q* [W]	28401	26471	24645	22916	21281	19733	18269	16884
	P [kW]	5,28	5,29	5,29	5,30	5,31	5,32	5,32	5,33
	I [A]	10,50	10,50	10,51	10,52	10,53	10,54	10,54	10,55
	Qc [W]	33886	31976	30164	28448	26821	25279	23818	22432
	COP [-]	5,42	5,05	4,70	4,37	4,05	3,75	3,47	3,21
	COP* [-]	5,38	5,01	4,66	4,32	4,01	3,71	3,43	3,17
	m [kg/h]	584	548	513	480	448	418	389	362
35 °C	Q [W]	27195	25353	23603	21943	20368	18875	17459	16117
	Q* [W]	27041	25190	23436	21775	20202	18712	17302	15966
	P [kW]	5,95	5,95	5,96	5,97	5,98	5,98	5,98	5,98
	I [A]	11,25	11,26	11,27	11,28	11,28	11,29	11,29	11,29
	Qc [W]	33141	31306	29564	27912	26344	24856	23443	22101
	COP [-]	4,57	4,26	3,96	3,68	3,41	3,16	2,92	2,69
	COP* [-]	4,55	4,23	3,93	3,65	3,38	3,13	2,89	2,67
	m [kg/h]	577	540	505	472	441	410	382	354
50 °C	Q [W]	22913	21285	19736	18263	16863	15531	14265	--
	Q* [W]	22908	21286	19745	18279	16886	15562	14301	
	P [kW]	8,31	8,31	8,31	8,30	8,29	8,27	8,25	
	I [A]	14,29	14,29	14,28	14,28	14,26	14,24	14,21	
	Qc [W]	31222	29593	28042	26562	25151	23803	22514	
	COP [-]	2,76	2,56	2,38	2,20	2,03	1,88	1,73	
	COP* [-]	2,76	2,56	2,38	2,20	2,04	1,88	1,73	
	m [kg/h]	551	515	480	447	415	384	355	

### Legenda

Q [W]	Capac. Frigorífica	Qc [W]	Capacidade do Condensador
Q* [W]	Capac. Frigorífica *	COP [-]	COP/EER
P [kW]	Potência absorvida	COP* [-]	COP/EER*
I [A]	Corrente	m [kg/h]	Vazão em massa

Fonte: O autor

### 9.3 ANEXO C: Dados do catálogo para a válvula de expansão termostática (VET)

Os dados obtidos para a válvula de expansão termostática, diferentemente dos do catálogo do *software* do compressor, não eram fornecidos em tabelas no *software*, o procedimento para a regressão linear foi realizado ao simular várias vezes as condições da figura C1 e copiar os valores marcados de vermelho na figura C1, para uma planilha do Excel, por meio desses valores foi possível obter a regressão linear e validar os dados simulados.

Figura C1 – Dados do catálogo do *software* da Danfoss para a válvula de expansão termostática (VET) de modelo TE 5 – 2, escolhida para regressão linear

The screenshot shows the Coolselector2 software interface. On the left, there is a schematic diagram of a refrigeration system with a compressor, condenser, evaporator, and expansion valve. The system is set to 'Seco' (dry) and 'R22' refrigerant. The selected line is 'Linha de líquido'. The right panel shows simulation conditions: Capacity 23,15 kW, Evaporation temperature -7,7 °C, Condensation temperature 40,0 °C, Mass flow 511,0 kg/h, Useful superheat 5,0 K, and Heating capacity 30,19 kW. Below this is a table of TE 5 series models. The TE 5-2 model is selected and highlighted with a red box.

Selecionado	Tipo	NS	Faixa	Capacidade Nominal [kW]	Capacidade mínima [kW]	Carga [%]	DP [bar]	Velocidade, entrada [m/s]	Resultado
<input type="radio"/>	TE 5 - 0.5	16	N	9,418	2,355	246	11,49	0,80	⚠
<input type="radio"/>	TE 5 - 1	16	N	17,31	4,328	134	11,49	0,80	⚠
<input checked="" type="radio"/>	TE 5 - 2	16	N	24,17	6,043	96	11,49	0,80	✓
<input type="radio"/>	TE 5 - 3	16	N	30,67	7,669	75	11,49	0,80	✓
<input type="radio"/>	TE 5 - 4	16	N	41,84	10,46	55	11,49	0,80	✓
<input type="radio"/>	TE 5 - 5	22	N	40,01	12,48	45	11,49	0,80	✓

Below the table, there is a 'Curva de desempenho' section with tabs for 'Detalhes de desempenho', 'Seleção de número de código', and 'Notas'. The selected model is TE 5 - 2, and the line is 'Linha de líquido (Sistema de expansão seco. R22. TXV)'.

Fonte: O autor

#### 9.4 ANEXO D: Dados do catálogo para o condensador

Figura D1 – Dados do catálogo da McQuay - Heatcraft de modelo 099E, escolhida para a regressão linear

TABELA 06 Capacidades e Vazão de Ar - Modelos de 12 pólos - 60Hz								
Modelo ARC	Modelo Padrão				10 Aletas por Polegada		12 Aletas por Polegada	
	Circuitos	Aletas por polegada	Capacidade (Kcal/h $\Delta t=10^{\circ}\text{C}$ R-22)	Vazão de ar (m <sup>3</sup> /h)	Capacidade (Kcal/h $t=10^{\circ}\text{C}$ R-22)	Vazão de ar (m <sup>3</sup> /h)	Capacidade (Kcal/h $t=10^{\circ}\text{C}$ R-22)	Vazão de ar (m <sup>3</sup> /h)
053E	4	10	17600	9700	<b>17600</b>	<b>9700</b>	18400	9600
059E	4	14	19600	9100			18400	9600
<b>099E</b>	<b>8</b>	<b>14</b>	<b>32500</b>	<b>19900</b>	29900	20500	31200	20200
130E	8	12	42800	18200	41000	18500	42800	18200
154E	8	14	50800	29900	46800	30800	48800	30400
178E	16	14	58700	27900	54000	28700	56300	28300
196E	16	14	69500	34500	64000	35500	66800	35000
226E	24	12	79000	32200	75700	32700	79000	32200
257E	24	12	85800	31500	82200	32000	85800	31500
288E	50	10	92400	45600	<b>92400</b>	<b>45600</b>	96400	44900
316E	50	14	101400	42900			96400	44900
342E	34	12	109900	41900	105300	42500	109900	41900
382E	34	14	122600	69000	112800	71100	117700	70100
430E	50	10	133900	68400	<b>133900</b>	<b>68400</b>	139700	67400
475E	50	14	148000	64300			139700	67400
508E	68	12	158300	62900	151700	63800	158300	62900
577E	50	14	179900	76400	165600	78700	172800	77600
617E	68	12	192200	71600	184200	72600	192200	71600

Fonte: O autor