

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL**

**LUÍS HILÁRIO FERRIGO**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ÁRVORE DE DECISÃO PARA IDENTIFICAÇÃO  
DE ALTERAÇÕES NO PADRÃO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM  
SISTEMA DE ILUMINAÇÃO**

**CAXIAS DO SUL, RS**

**AGOSTO**

**2019**

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL**  
**ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**MESTRADO PROFISSIONAL**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ÁRVORE DE DECISÃO PARA IDENTIFICAÇÃO  
DE ALTERAÇÕES NO PADRÃO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM  
SISTEMA DE ILUMINAÇÃO**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto e Fabricação.

Linha de Pesquisa: Desempenho e Controle de Sistemas Energéticos.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dra. Marilda Machado Spindola.

**CAXIAS DO SUL, RS**

**AGOSTO**

**2019**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Universidade de Caxias do Sul  
Sistema de Bibliotecas UCS - Processamento Técnico

F391a Ferrigo, Luís Hilário

Aplicação do método de árvore de decisão para identificação de alterações no padrão de consumo de energia elétrica em sistema de iluminação / Luís Hilário Ferrigo. – 2019.

55 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado) - Universidade de Caxias do Sul, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.

Orientação: Marilda Machado Spindola.

1. Energia elétrica - Consumo. 2. Iluminação elétrica. 3. Indústria têxtil. I. Spindola, Marilda Machado, orient. II. Título.

CDU 2. ed.: 620.9

Catalogação na fonte elaborada pela(o) bibliotecária(o)  
Paula Fernanda Fedatto Leal - CRB 10/2291

**LUÍS HILÁRIO FERRIGO**

**APLICAÇÃO DO MÉTODO DE ÁRVORE DE DECISÃO PARA IDENTIFICAÇÃO  
DE ALTERAÇÕES NO PADRÃO DE CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA EM  
SISTEMA DE ILUMINAÇÃO**

Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Área de Concentração: Projeto e Fabricação.

Linha de Pesquisa: Desempenho e Controle de Sistemas Energéticos.

Orientador: Prof<sup>a</sup>. Dra. Marilda Machado Spindola.

**Aprovado em 15/08/2019**

**Banca Examinadora**

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Marilda Machado Spindola  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Dr. Carlos Alberto Costa  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Dr. Carlos Roberto Altafini  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

---

Prof. Dr. Leonardo Dagnino Chiwiacowsky  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

É com muito orgulho que dedico este trabalho à minha esposa Juliana Tedesco Ferrigo, a qual me acompanhou assiduamente e me deu forças para percorrer esta trajetória.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar saúde e sabedoria para concluir esta etapa.

Aos meus pais Luiz Carlos e Helena, que com excelência me ensinaram os principais valores da vida.

À minha esposa Juliana, pelo seu companheirismo, amor, apoio e motivação. Por sempre estar ao meu lado e nunca medir esforços para me auxiliar no que fosse preciso.

À professora Marilda Machado Spindola, responsável pela orientação deste trabalho, a qual sempre esteve à disposição e contribuiu de maneira significativa no desenvolvimento do trabalho.

Ao SENAI e colegas desta instituição, pelo apoio, ideias e contribuições.

À empresa EfficienC pelo apoio e disponibilização dos dados.

Aos professores membros da banca examinadora que dedicaram seu tempo para análise do trabalho e contribuíram com sugestões para a melhoria.

Aos demais familiares, professores, colegas e amigos que me auxiliaram ao longo desta jornada.

*“Tu te tornas eternamente responsável por aquilo que cativas”*

*Antoine de Saint-Exupéry*

## RESUMO

O consumo de energia elétrica tem sido um dos parâmetros avaliados na indústria como potencial para a redução de custos. Como contribuição a esta demanda, este trabalho apresenta um método genérico para eficientização de sistemas energéticos e identificação de alterações no padrão de consumo de energia elétrica de sistemas consumidores. A proposta visa a identificar os períodos diários onde há consumos extras de energia elétrica em um sistema de iluminação de uma indústria têxtil sem a justificativa necessária de uso. Como sistema de identificação, foi utilizado o conceito de Inteligência Artificial, por meio do método de Árvore de Decisão. A plataforma selecionada para a implementação desta ferramenta foi o Sipina Research, que permitiu uma análise sobre os dados coletados, indicadora de respostas satisfatórias no sistema desenvolvido. Para validação do método proposto, o mesmo foi aplicado em um sistema de iluminação de uma indústria têxtil, onde utilizou-se um conjunto de dados para treinamento do sistema e outro conjunto de dados de mesma dimensão para validação do aprendizado. Os dados resultantes da validação do método foram analisados por meio do conceito de matriz de confusão. Como resultado deste estudo, obteve-se um método genérico para eficientização de sistemas energéticos e controle do consumo, aliado a uma redução de 32% do consumo de energia elétrica no sistema utilizado para validação da ferramenta desenvolvida, evidenciando a eficácia do método.

**Palavras-chave:** Consumo de Energia Elétrica, Sistemas de Iluminação, Árvore de Decisão, Sipina Research, Indústria Têxtil.

## ABSTRACT

Electricity consumption was one of the reduction parameters in the industry with potential for cost reduction. As a contribution to this demand, this work presents a generic method for the efficiency of energy systems and identification of changes in the pattern of electric energy consumption of electric systems. A visa proposal to identify the daily periods where there is extra consumption of electricity in a textile industry lighting system with no necessary justification of use. As the identification system, the concept of Artificial Intelligence was used through the Decision Tree method. The platform selected for the implementation of this tool was the Sipina Survey, which allowed an analysis of the collected data, indicating satisfactory responses in the developed system. To validate the proposed method, it was applied to a lighting system of a textile industry, where a data set for system training and another data set of the same dimension were used for learning validation. The data selected for validation of the method were analyzed using the concept of confusion matrix. As a result of this study, use a generic method for power system efficiency and consumption control, coupled with a 32% reduction in power consumption in the system used to validate the tool used, showing the effectiveness of the method.

**Keyword:** Electricity Consumption, Lighting Systems, Decision Tree, Sipina Research, Textile Industry.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| FIGURA 1 - FLUXO DA ENERGIA ELÉTRICA BRASILEIRA .....                                 | 12 |
| FIGURA 2 - CICLO DE GESTÃO DE ENERGIA .....   | 18 |
| FIGURA 3 – DIVISÃO DE DADOS REALIZADA PELO SVM .....                                  | 22 |
| FIGURA 4 – MÉTODO DE ÁRVORE DE DECISÃO.....   | 24 |
| FIGURA 5 - INTERFACE DA FERRAMENTA SIPINA. ....                                       | 26 |
| FIGURA 6 - DIAGRAMA DE BLOCOS DO MÉTODO PROPOSTO .....                                | 28 |
| FIGURA 7 - DEMANDA DE POTÊNCIA SEGMENTADA.....  | 32 |
| FIGURA 8 - CONSUMO MENSAL DE ENERGIA ELÉTRICA SEGMENTADO.....                         | 33 |
| FIGURA 9 - HISTÓRICO DE CONSUMO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO .....                        | 34 |
| FIGURA 10 - SISTEMA DE ILUMINAÇÃO ABORDADO .....                                      | 35 |
| FIGURA 11 - SISTEMA DE ILUMINAÇÃO COM COMPORTAMENTO INDESEJADO                        | 36 |
| FIGURA 12 - FLUXOGRAMA DE COMPORTAMENTO IDEAL DO SISTEMA DE<br>ILUMINAÇÃO .....       | 37 |
| FIGURA 13 - SISTEMA DE ILUMINAÇÃO COM COMPORTAMENTO DESEJADO ....                     | 38 |
| FIGURA 14 – DIAGRAMA DE BLOCOS DO <i>HARDWARE</i> . ....                              | 39 |
| FIGURA 15 - INTERFACE PARA VISUALIZAÇÃO DOS DADOS EM TEMPO REAL..                     | 40 |
| FIGURA 16 - INTERFACE GRÁFICA DA PLATAFORMA ENISCOPE ANALYTICS....                    | 40 |
| FIGURA 17 – EXEMPLO DE DADOS NO FORMATO .CSV ADQUIRIDOS DO<br>SISTEMA DE COLETA ..... | 41 |
| FIGURA 18 - DADOS DIVIDIDOS EM COLUNAS NO FORMATO .XLSX.....                          | 41 |
| FIGURA 19 - PLANILHA DE VALIDAÇÃO DO SISTEMA.....                                     | 43 |
| FIGURA 20 - FLUXOGRAMA GERADO A PARTIR DA ÁRVORE DE DECISÃO.....                      | 44 |
| FIGURA 21 - APLICAÇÃO DO ALGORITMO EM UM NOVO CONJUNTO DE DADOS<br>.....              | 45 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>1. INTRODUÇÃO</b> .....   | <b>11</b> |
| <b>1.1. Justificativa</b> .....  | <b>11</b> |
| <b>1.2. Problema</b> .....   | <b>14</b> |
| <b>1.3. Objetivos</b> .....  | <b>14</b> |
| 1.3.1. Objetivo geral .....  | 15        |
| 1.3.2. Objetivos específicos .....   | 15        |
| <b>1.4. Ambiente do trabalho</b> .....   | <b>15</b> |
| <b>1.5. Estrutura do trabalho</b> .....  | <b>16</b> |
| <b>2. REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....  | <b>17</b> |
| <b>2.2. Sistemas de iluminação industrial</b> .....                                      | <b>19</b> |
| <b>2.3. Projetos em sistemas de iluminação</b> .....                                     | <b>21</b> |
| <b>2.4. Métodos para monitoramento do consumo de energia</b> .....                       | <b>21</b> |
| 2.4.1. <i>Support Vector Machine</i> (SVM) .....   | 22        |
| 2.4.2. Técnica de árvore de decisão.....   | 23        |
| 2.4.2.1. Algoritmos de Árvore de Decisão C4.5.....                                       | 25        |
| 2.4.2.2. Ferramenta Sipina – W.....  | 26        |
| <b>3. METODOLOGIA PROPOSTA NA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA</b> .....           | <b>28</b> |
| <b>4. MÉTODO APLICADO NA EMPRESA – ESTUDO DE CASO</b> .....                              | <b>32</b> |
| <b>4.1. Caracterização do ambiente experimental</b> .....                                | <b>32</b> |
| <b>4.2. Identificação do padrão de consumo do sistema de iluminação da empresa</b> ..... | <b>35</b> |
| <b>4.3. Aquisição de dados</b> .....   | <b>39</b> |
| <b>4.4. Modelagem de tratamento de dados mais adequada para o monitoramento</b> .....    | <b>40</b> |
| <b>4.5. Implementação do sistema de monitoramento</b> .....                              | <b>43</b> |
| <b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....   | <b>45</b> |
| <b>5.1. Validação do método</b> .....  | <b>45</b> |
| <b>5.2. Conclusões</b> .....   | <b>47</b> |

|  |           |
|--|-----------|
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                       | <b>49</b> |
| <b>Apêndice A – Interface de dados do Sipina.....</b>          | <b>52</b> |
| <b>Apêndice B – Árvore de decisão gerada pelo sipina.....</b>  | <b>53</b> |
| <b>Apêndice C – Algoritmo de implementação do sistema.....</b> | <b>54</b> |

## **1. INTRODUÇÃO**

O aumento da competitividade na indústria, aliado ao expressivo aumento dos custos de insumos energéticos, tais como a energia elétrica, vem despertando a necessidade de realizar ações e adotar hábitos de consumo consciente. Estas ações e hábitos devem resultar na redução de consumo de energia elétrica. Em virtude da instabilidade e insegurança de diversos setores quanto a decisões sobre o mercado financeiro, o investimento em novas tecnologias visando à redução do consumo energético acaba, por muitas vezes, ficando comprometido, despertando a necessidade de reduzir o consumo com ações sem investimentos ou com reduzido tempo de retorno. Este trabalho busca o desenvolvimento de um método capaz de auxiliar no processo de racionalização e gestão do consumo de energia elétrica em um sistema de iluminação industrial através da aplicação de uma ferramenta de classificação por meio do método de árvore de decisão.

Embora a proposta busque um processo de efficientização em sistemas de iluminação industrial, propõe-se que a busca deste modelo metodológico possa ser aplicada para outras áreas de consumo de energia.

### **1.1. Justificativa**

A energia elétrica tornou-se uma das principais fontes de energia nas mais diversas atividades econômicas mundiais, tais como processos produtivos, comerciais, de ensino, prestação de serviços, entre outros. Ela serve como energia propulsora para iluminar, movimentar, processar, aquecer, resfriar, entre outros fins. Devido a sua importância e forte utilização nos mais diversos setores, este insumo acaba influenciando diretamente na formação dos preços de produtos e serviços (MORALES, 2007; ROCHA, 2009).

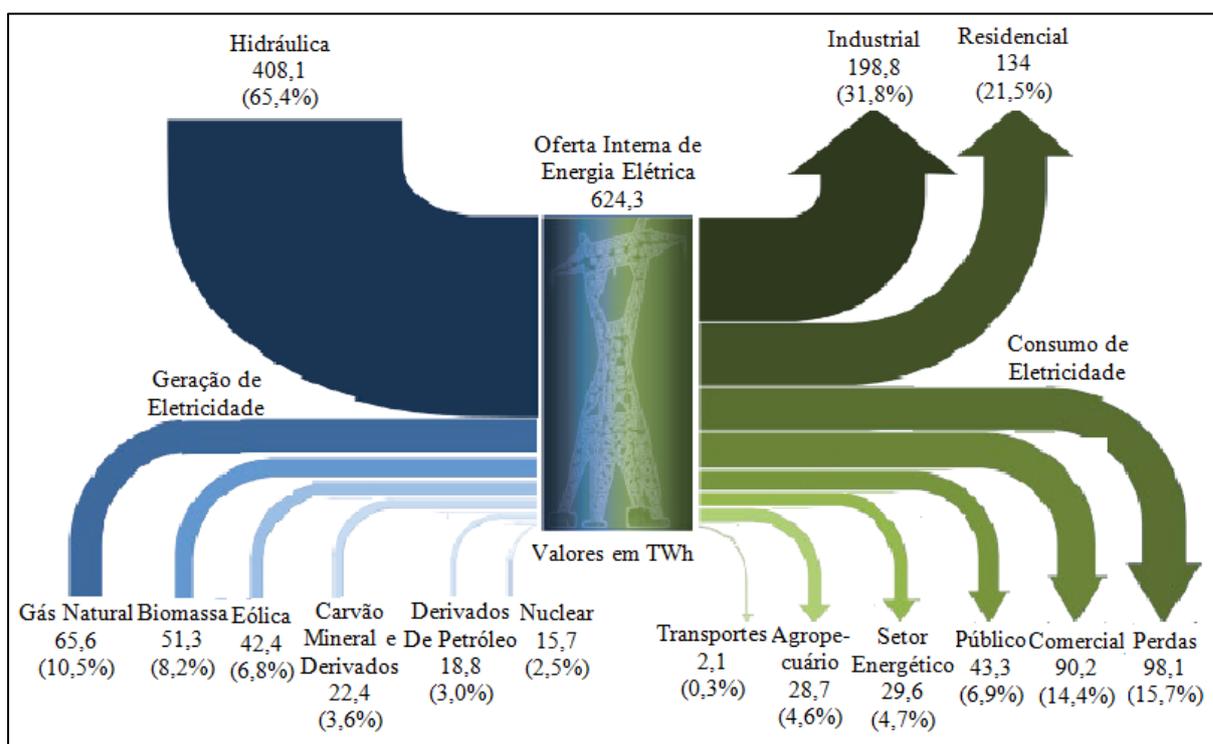
Segundo Rocha (2009), o crescimento populacional, aliado à crescente utilização dos mais variados recursos energéticos, justificam a necessidade de pesquisas e desenvolvimento de tecnologias e procedimentos visando à otimização da utilização destes recursos, tendo em vista também a conservação do meio ambiente.

Controlar os custos oriundos do consumo de energia elétrica é fundamental em todos os setores econômicos, principalmente na indústria, comércio e serviços, onde este insumo se torna representativo no custo do produto final, melhorando também a competitividade perante

o mercado do seu segmento e contribuindo com a preservação da natureza. (MORALES, 2007).

A Figura 1 mostra o Fluxo de Energia Elétrica no Brasil, obtido no Balanço Energético Nacional 2018, onde fica evidenciada a importância das usinas hidroelétricas, pois aproximadamente 65,4% da energia elétrica do Brasil é gerada por meio desta fonte e menos de 35% é proveniente de outras fontes, tais como gás natural, biomassa, eólica, carvão mineral, derivados de petróleo e nuclear. A geração de energia fotovoltaica não é representada no gráfico por se tratar de uma parcela muito pequena (MME, EPE, 2018).

Figura 1 - Fluxo da Energia Elétrica Brasileira



Fonte: Adaptado de MME, EPE (2018)

A Figura 1 ainda mostra que a indústria é a principal consumidora de energia elétrica do Brasil, representando 31,8% do consumo total, seguido pelas residências, as quais representam 21,5%, setor comercial, 14,4%, setor público, 6,9% e setor energético, agropecuário e transportes que juntos totalizam 9,6%. Destaca-se que as perdas na transmissão da energia representam 15,7%, tornando-se o terceiro maior grupo consumidor. O sistema de iluminação na indústria brasileira representa cerca de 9% do consumo industrial total de energia elétrica (MME, EPE, 2018).

Devido ao fato da matriz energética brasileira ser muito dependente da capacidade hídrica, fatores climáticos como o baixo volume de chuvas, influenciam diretamente na proporção de geração de energia, resultando no aumento do custo da geração (LEME, 2008). Nos períodos onde ocorrem a redução da capacidade hídrica, devido ao baixo volume de chuvas, a geração pode ser compensada através de outras fontes não renováveis, implicando no aumento dos custos da energia elétrica (CORTELETTI, 2015).

O avanço da industrialização, o crescimento populacional e dos mercados consumidores, a constante evolução tecnológica e a busca pelo maior conforto pessoal, acarretam em um crescente aumento da demanda de energia elétrica, tendo ainda a oferta de energia limitada pela capacidade dos sistemas de geração. Estes fatores, aliados ao aumento da carga tributária e dos custos de distribuição fazem com que ocorra elevação dos valores da energia elétrica, superiores a indicadores econômicos referenciais, tornando os recursos energéticos mais caros e limitados. (CORTELETTI, 2015; SAIDEL, 2005).

Segundo Saidel (2005), estes fatores motivam o desenvolvimento de soluções para buscar o desenvolvimento sustentável da sociedade, atendendo as necessidades energéticas, o qual é um dos maiores problemas mundiais deste século.

Para que ocorra a atenuação destes problemas, torna-se essencial para a humanidade a utilização racional e a efficientização da energia, contemplando os processos de geração, transmissão e distribuição, tendo em vista que se está convivendo com a escassez de recursos naturais e com as consequências do aquecimento global, ocasionados parcialmente pelos impactos causados pela geração da energia elétrica (ROCHA, 2009; CORTELETTI, 2015).

Diante deste cenário, a inserção de tecnologias envolvendo energias renováveis e a eficiência energética tornaram-se uma das principais soluções para a busca da sustentabilidade, podendo ser implantadas através de simples ações de gestão do consumo até grandes inovações tecnológicas (SAIDEL, 2005). Segundo Fenerich, Costa e Lima (2017) e Bunse, Schonsleben e Ernest (2011), os estudos voltados para a eficiência energética são norteados pelo aumento do preço da energia, novas legislações ambientais associadas à emissão de CO<sub>2</sub> e a mudança do perfil consumidor.

Em alguns casos, a implantação de programas ou de novas tecnologias visando o aumento da eficiência energética não se tornam atrativas do ponto de vista econômico, isto se deve ao tempo de retorno do investimento inicial (MORALES, 2007). Com isso, torna-se fundamental os estudos de processos e novas tecnologias de baixo custo de implementação.

Muitos empresários e gestores dos setores público e privado afirmam que devido ao atual cenário econômico, investimentos em aquisição de equipamentos mais eficientes ou até mesmo a mudança da tecnologia utilizada estão cada vez mais escassos. Sendo assim, a gestão da energia elétrica aparece como uma importante ferramenta na busca da racionalização e economia dos insumos energéticos. Para que se obtenha uma boa gestão da energia elétrica, é necessário conhecer profundamente as instalações, os processos que utilizam a energia elétrica e o contrato firmado com a concessionária fornecedora (MORALES, 2007).

Dentro deste contexto, este trabalho propõe o desenvolvimento de uma metodologia que auxilie na detecção de desvios em um padrão pré-definido de consumo de energia elétrica. Para isto, serão utilizados conceitos de inteligência artificial através da classificação de dados por meio do método de árvore de decisão, pelo qual se obteve resultados satisfatórios quando comparados ao monitoramento manual.

## **1.2. Problema**

A indústria do setor têxtil, alvo deste estudo, possui a necessidade de reduzir custos de produção, a fim de manter-se competitiva no mercado. Para isto, é fundamental que a redução de custos ocorra de forma a não impactar na qualidade de seus produtos. Diante deste cenário, os custos com energia elétrica foram classificados como forte impactantes no valor do produto final, tornando-se necessária a realização de um estudo para a sua redução destes, sem afetar na qualidade dos produtos e sem a realização de investimentos financeiros. Ao longo do diagnóstico de eficiência energética, observou-se que o sistema de iluminação da planta fabril sofria grandes alterações no padrão de consumo, o que gerou o seguinte questionamento: um sistema de monitoramento de desvios no padrão de consumo de energia elétrica em um sistema de iluminação de uma indústria têxtil pode reduzir o consumo da mesma?

## **1.3. Objetivos**

Para atender a proposta do trabalho, os objetivos são descritos a seguir.

### 1.3.1. Objetivo geral

Visto que as incertezas econômicas restringem ou dificultam investimentos em aquisição de novos equipamentos mais eficientes, ou adequação dos já existentes para se alcançar um menor consumo de energia elétrica, este trabalho, busca a redução do consumo de energia elétrica por meio do gerenciamento energético de um sistema de iluminação de uma indústria têxtil. Isto implica o uso de uma metodologia com conceitos de inteligência artificial pelo método de árvore de decisão, para atender o gerenciamento energético deste sistema.

Este trabalho tem como objetivo geral o desenvolvimento de um método que permita a identificação de alterações no padrão de consumo de energia elétrica do sistema de iluminação de uma indústria têxtil.

### 1.3.2. Objetivos específicos

Para atender ao objetivo geral, foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) conhecer o comportamento do sistema de iluminação atual da empresa em questão;
- b) identificar o padrão de consumo mais adequado para este sistema;
- c) aplicar a classificação por meio do método de árvore de decisão para identificar os parâmetros do sistema em questão;
- d) implementar o sistema de monitoramento selecionado sobre dados obtidos durante o período de observação;
- e) validar a utilização da técnica de árvore de decisão no presente estudo de caso;
- f) analisar a eficácia do sistema implementado.

## 1.4. Ambiente do trabalho

O experimento foi realizado no sistema de iluminação da área fabril de uma empresa de médio porte, situada no município de Caxias do Sul - Rio Grande do Sul. Atuando no segmento têxtil. A empresa é constituída por um parque fabril composto por máquinas e equipamentos capazes de realizar operações de corte e costura em diversos tipos de tecidos. Sua área construída totaliza 2.522 m<sup>2</sup>, constituída pelas seguintes áreas: produção,

almoxarifado, expedição, vestiários, refeitório/cozinha e administração. Possui somente um turno de trabalho, o qual se inicia às 7 horas e 30 minutos e finaliza às 17 horas e 30 minutos, com intervalo de almoço de uma hora dividido em duas etapas: uma parte da equipe inicia seu intervalo às 11 horas e 45 minutos e os demais às 12 horas e 15 minutos. A empresa conta com uma equipe de 48 funcionários, dos quais, 29 integram o setor produtivo. O setor produtivo é gerido por um supervisor de produção, o qual está vinculado hierarquicamente ao diretor da empresa. O projeto de pesquisa será aplicado no sistema de iluminação da área fabril desta empresa, o qual é dotado de lâmpadas fluorescentes tubulares de diversas potências.

### **1.5. Estrutura do trabalho**

Este trabalho está estruturado sob a forma de capítulos, seguindo a orientação ABNT (QUADROS, 2019). Além do capítulo 1 apresentado, o capítulo 2 é referente à revisão bibliográfica, situando o leitor sobre conceitos e tecnologias recentemente apresentadas na solução de problemas similares. O capítulo 3 descreve o procedimento metodológico adotado para a solução do problema. O capítulo 4 descreve o processo aplicado na empresa, apresentando dados do cenário, materiais e os procedimentos executados. No capítulo 5 são descritos os resultados obtidos e as considerações finais sobre o projeto.

## **2. REFERENCIAL TEÓRICO**

A eletricidade é hoje a principal fonte de energia utilizada na grande parte dos processos industriais, nos mais diversos setores produtivos. Este recurso, que por sua vez sempre foi muito limitado, vem requerendo uma atenção especial nos últimos anos. Pelo fato do Brasil ser muito dependente de sua capacidade hídrica para geração de energia elétrica, a escassez de chuvas pode afetar fortemente a capacidade de geração de energia elétrica. O risco de possíveis apagões nos períodos secos resulta ainda na elevação monetária deste recurso.

Diante deste cenário, tornou-se fundamental o desenvolvimento de pesquisas e investimentos voltados para processos alternativos de geração de energia elétrica, tais como geração eólica e solar. Além disso, estudos e programas voltados para a conservação de energia elétrica e um melhor gerenciamento deste recurso, escasso e cada vez mais caro, vêm tornando-se presentes e intensos, nos mais diversos setores consumidores de energia elétrica.

### **2.1. Gestão de sistemas de energia elétrica**

O termo gestão da energia elétrica se refere ao uso racional, consciente e eficiente deste recurso. Na busca da melhor utilização dos sistemas de energia elétrica, são utilizadas ferramentas que gerenciam, otimizam e realizam a manutenção da eficiência. Estas ferramentas fornecem informações e geram indicadores que são utilizados como referência na identificação de potenciais de economia e possíveis mudanças comportamentais (MORALES, 2007). Estes dados são fundamentais para embasar as decisões dos gestores da área de recursos energéticos.

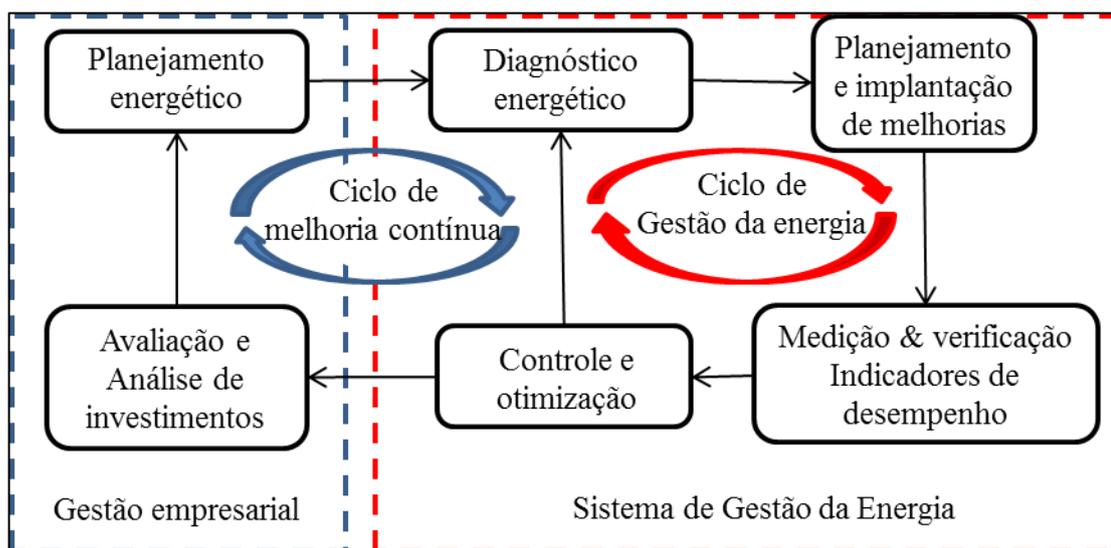
O processo de gestão de energia utiliza ferramentas e técnicas que visam à conservação da energia, de modo a obter um bom aproveitamento deste recurso, buscando um futuro sustentável e reduzindo conflitos socioambientais (SAIDEL, 2005).

Para desenvolver atividades econômicas mais sustentáveis, é necessário conhecer os insumos energéticos e seus consumos em sua plenitude, sabendo onde, quanto e quando cada equipamento consome. Deve-se ainda monitorar os históricos de consumo, a fim de controlar e detectar rapidamente possíveis consumos indevidos e tomar ações imediatas ou ainda utilizar estes dados para avaliar, desenvolver, aplicar e supervisionar ações que otimizam o consumo energético (FERREIRA E FERREIRA, 1994).

Segundo Sola (2006 apud CORTELETTI, 2015), a economia de energia elétrica é muito dependente das atitudes do grupo de pessoas que ocupam o ambiente. Deste modo o comprometimento, a motivação, a qualificação e a educação dos envolvidos são peças fundamentais no processo de gestão da energia. Deve-se ainda definir metas de economia, estimular a criatividade dos colaboradores, promover a participação de todos no processo e fazer uso das mais diversas experiências profissionais em busca do uso racional da energia elétrica (MORALES, 2007).

Mathias (2014) explica que um sistema de gestão de energia consiste em um ciclo de melhoria contínua, o qual envolve o planejamento energético, diagnóstico energético, planejamento e implementação de melhorias, medição e verificação, controle, otimização e avaliação e análise de investimentos, conforme ilustrado na Figura 2. Este processo deve envolver todos os níveis hierárquicos da organização, sendo de fundamental importância para o seu sucesso, com o apoio de quem detém o poder e tem a tomada de decisão.

Figura 2 - Ciclo de gestão de energia



Fonte: Adaptado de (Mathias, 2014)

Com base nas afirmações dos autores listados, define-se que a gestão energética constitui-se de conceitos, métodos e procedimentos que possibilitam a atuação sobre um recurso energético extremamente importante para a sociedade atual, como é o caso da energia elétrica, fundamental para o crescimento e desenvolvimento das nações.

O sistema desenvolvido neste trabalho fará parte do “Ciclo de Gestão da Energia”, apresentado no ciclo de gestão de energia da Figura 2, pois atuará como estratégia de controle

de consumo de energia elétrica, sendo uma ferramenta de auxílio para que o consumo deste insumo se mantenha conforme o padrão planejado.

## **2.2. Sistemas de iluminação industrial**

Dentre todos os sistemas energéticos consumidores industriais, o sistema de iluminação sempre está presente em todas as indústrias dos mais diversos segmentos, porém pelo fato de representar cerca de 9% do consumo industrial brasileiro (MME, EPE, 2018), muitas vezes não são aplicadas ações para aumento da eficiência e otimização do consumo deste sistema. Estudos comprovam que a ineficiência no sistema de iluminação no Brasil é muito comum, oportunizando assim a realização de ações simples e bastante significativas para a redução do consumo de energia elétrica (HADDAD, 2012).

Gan et al. (2013) explicam que a melhor eficiência da energia elétrica no sistema de iluminação pode ser alcançada por meio da substituição de tecnologias de luminárias, também por sistemas que melhor aproveitam a iluminação natural. Outros autores afirmam que o interior das edificações deve ser iluminado ao máximo pela iluminação solar (DUFLOU et al., 2012), ações de manutenção preditiva e corretiva (ABDELAZIZ; SAIDUR; MEKHILEF, 2011) e ainda pela adoção de sistemas de controle (KRALIKOVA; ANDREJIOVA; WESSELY, 2015).

Para Carvalho (2006) e Corteletti (2015), a primeira ação a ser realizada para a redução do consumo de energia do sistema de iluminação é reduzir o período em que as lâmpadas ficam ligadas, implicando na melhor utilização da iluminação natural. Em áreas como corredores de circulação, depósitos, sanitários e outros ambientes em que a iluminação pode ser reduzida, pode ser instalado um sistema de controle para desligar automaticamente a iluminação quando não há movimentação, sem que sejam gerados inconvenientes.

Para Corteletti (2015), em sistemas de iluminação onde o controle do acionamento se aplica simultaneamente a muitos pontos, existe grande oportunidade de conservação energética. Nesses casos, torna-se interessante a instalação de circuitos de acionamento setorizados, sejam eles acionados por meio de interruptores ou sensores de presença a cada 11 m<sup>2</sup> de área iluminada (PROCEL, 2001), permitindo assim que pequenas áreas sejam controladas individualmente nos momentos em que se deseja iluminar um determinado setor. Este procedimento evita que seja acionada a iluminação de locais sem necessidade. A divisão

dos circuitos de iluminação, a instalação de sensores de presença com fotocélula e sistemas de controle proporcionais de iluminação podem acarretar em uma economia de até 50% do consumo energético (CARVALHO, 2006). Apenas a instalação de sensores de presença com a finalidade de desligar a iluminação em áreas com pouca circulação pode resultar em uma economia de até 37% nestes ambientes (GAN et al., 2013).

Outra ação com forte potencial de redução do consumo no sistema de iluminação é a pintura com cores reflexivas e claras ou a simples limpeza das paredes internas, teto e piso. Estas ações possibilitam o uso de lâmpadas com menor potência, mantendo o mesmo nível de iluminação no ambiente (CORTELETTI, 2015). A adoção de cores claras em superfícies internas, além de reduzir a carga instalada do sistema de iluminação, ainda influencia significativamente no aproveitamento da iluminação natural (SOUZA, 2003). Segundo Abdelaziz; Saidur; Mekhilef (2011), paredes claras refletem feixes luminosos e paredes escuras os absorvem.

Corteletti (2015), salienta que a limpeza periódica das janelas, paredes, pisos e forros também aumenta a capacidade destas superfícies refletirem luz. Outro procedimento que muitas vezes não está presente nos planos de manutenção das empresas é a limpeza periódica de refletores e luminárias, as quais afetam negativamente a eficiência luminosa do conjunto lâmpada/refletor, requerendo assim lâmpadas mais potentes para a obtenção da iluminação adequada para o ambiente. Cabe, ainda, a inspeção quanto à deterioração das lentes, refletores e das superfícies das lâmpadas. Segundo Abdelaziz; Saidur; Mekhilef (2011), as práticas de manutenção através da limpeza de refletores e lâmpadas podem resultar em uma redução de perdas da eficiência luminosa do conjunto. Corteletti (2015) ainda expõe que a manutenção periódica através da limpeza do conjunto de luminárias é extremamente importante para que estas mantenham a capacidade de luminosidade original, uma vez que, em um ano, a poeira acumulada pode resultar em uma redução de 15% a 20% da luminosidade, podendo chegar em até 60% em ambientes industriais mais agressivos, contudo o consumo energético permanece inalterado.

Os sistemas de iluminação de muitas edificações industriais estão localizados a alturas superiores a 10 metros em relação ao piso. Isto se deve à altura elevada do pé direito, o qual geralmente é dimensionado para possibilitar a instalação de guindastes ou pontes rolantes, exigindo assim a utilização de lâmpadas com potências mais elevadas e também dificultando as ações de limpeza e manutenção. Neste contexto, observa-se uma grande

oportunidade de efficientização do sistema de iluminação, por meio da redução dos sistemas de iluminação com alturas elevadas e utilizando um sistema de iluminação pontual, dimensionado e direcionado para o posto de trabalho. Isso possibilita uma redução de até 20% no consumo de energia elétrica se comparado com um sistema de iluminação em pontos altos (KRALIKOVA; ANDREJIOVA; WESSELY, 2015).

### **2.3. Projetos em sistemas de iluminação**

Ao realizar projetos e estudos de intervenções em sistemas de iluminação, deve-se ter amplo conhecimento de suas diversas variáveis. O manual de iluminação do PROCEL (2011), apresenta de forma clara e objetiva conceitos das variáveis envolvidas nos projetos de iluminação, sendo pertinentes a este projeto de pesquisa, as descritas a seguir:

a) iluminância: Consiste no fluxo luminoso incidente em uma superfície por unidade de área. Sua unidade de medida é o lux, o qual corresponde à iluminância de uma superfície plana com área de um metro quadrado, sobre a qual incide perpendicularmente um fluxo luminoso de um lúmem. A iluminância também pode ser definida como a densidade de luz necessária para a realização de uma tarefa visual. Para medir esta grandeza é utilizado um instrumento denominado luxímetro (PROCEL, 2011).

b) potência total: Também conhecida como demanda de potência, representa o somatório das potências individuais dos equipamentos do sistema de iluminação que estão acionados instantaneamente. A unidade de medida desta grandeza é o watt, geralmente é expressa pelo seu múltiplo quilowatt (PROCEL, 2011).

O alvo deste estudo é o controle da demanda de potência do sistema de iluminação em cada período do dia, tendo como resultado esperado a redução do consumo de energia elétrica, atendendo as condições de iluminação regulamentadas para o ambiente experimental. Para isto, é fundamental considerar as variáveis relacionadas ao estado temporal, tais como o dia da semana e a hora.

### **2.4. Métodos para monitoramento do consumo de energia**

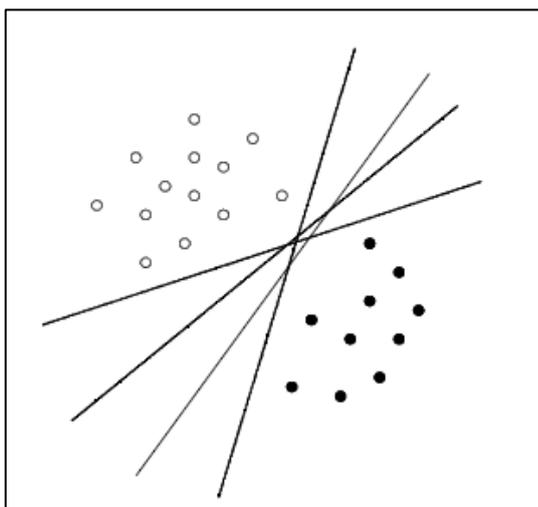
Além de todas as ações já comentadas que dizem respeito ao local de instalação das luminárias, a limpeza das luminárias e do ambiente, da tecnologia de luminárias, aproveitamento da iluminação natural, instalação de sistemas de controle proporcional e desligamento automático, as tecnologias para a efficientização dos sistemas de energia, em

especial os sistemas de iluminação industrial contam com métodos de classificação e monitoramento advindos da inteligência artificial, como os casos de aplicação de classificadores como *Support Vector Machine* (SVM) e o método de árvore de decisão, os quais são mais utilizados para identificar e diagnosticar desvios do padrão de consumo auxiliando no processo de gestão energética.

#### 2.4.1. *Support Vector Machine* (SVM)

Segundo Silva e Scarpel (2007), o SVM consiste em uma técnica matemática de programação, a qual foi desenvolvida no ano de 1998 por Vladimir Vapnik, sendo uma ferramenta utilizada para reconhecimento de padrões binários, ou seja, devem possuir apenas duas classes. O SVM utiliza o aprendizado estatístico e é capaz de separar os dados utilizados no aprendizado em apenas dois grupos divididos por linhas, conforme mostrado na Figura 3 (ANDREOLA, 2009).

Figura 3 – Divisão de dados realizada pelo SVM



Fonte: Adaptado de Silva e Scarpel (2007)

Lorena e Carvalho (2007) concluíram que o SVM apresenta resultados menos satisfatórios que a técnica de classificação por árvore de decisão para aprendizados realizados em conjuntos de dados menores.

#### 2.4.2. Técnica de árvore de decisão

A técnica de árvore de decisão consiste em modelos estatísticos, os quais utilizam um treinamento supervisionado para realizar a classificação e previsão de dados. Este processo é realizado através de um algoritmo de aprendizagem. Ele necessita em sua entrada de um conjunto de dados referenciais constituídos de valores de atributos, os quais serão utilizados no processo de aprendizagem. Uma das principais vantagens da árvore de decisão em relação ao SVM é apresentar resultados que permitem melhor aprendizado da rede, em casos onde o conjunto de dados coletados não se caracteriza como um banco de dados. Ao longo do processo de aprendizagem, um problema complexo é decomposto em sub-problemas mais simples, onde esta técnica é aplicada novamente e assim sucessivamente, até que se obtenha uma classificação apurada dos dados. Em sua saída, este algoritmo apresentará um esquema de classificação, predizendo classes baseadas nos valores dos atributos dos dados de entrada (GARCIA, 2003; JIANHUA, 2015).

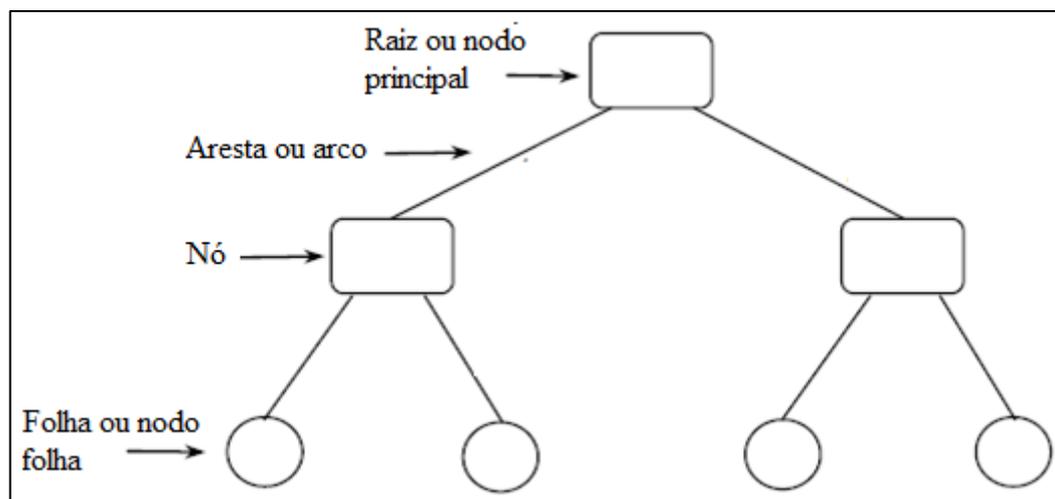
A classificação por árvore de decisão está entre os métodos mais utilizados para a auto classificação de dados e tem sido aplicada nas mais diversas áreas do conhecimento, desde engenharias até medicina (REIS FILHO, 2006).

Esta técnica se baseia em sucessivas divisões de um problema em vários subproblemas de dimensões menores, até que seja encontrada a solução para todos os problemas. Algumas de suas vantagens são seu pequeno tempo de processamento e a apresentação de sua classificação final de forma simbólica simples, intuitiva e de fácil compreensão, facilitando a análise do resultado, o qual pode facilmente ser representado por meio de regras do tipo “se-e-então” (GARCIA, 2003; ZUBEN, 2011).

Este método apresenta como principal problema a necessidade de uma grande quantidade de dados para extrair o aprendizado de estruturas complexas (SOUZA, 1999 apud REIS FILHO, 2006)

A Figura 4 representa a estrutura básica de uma árvore de decisão, composta pelo nodo principal ou raiz, arestas ou arcos e nodos folha. Pode-se visualizar que a classificação segue um caminho guiado pelos nodos existentes na árvore, até alcançar o nodo folha correspondente.

Figura 4 – Método de árvore de decisão



Fonte: Adaptado de Garcia (2003)

O Quadro 1 descreve brevemente a função de cada componente da árvore de decisão.

Quadro 1 - Componentes da árvore de decisão

| Componente             | Função  |
|------------------------|---|
| Raiz ou nodo principal | Primeiro nó da árvore   |
| Nó                     | Representa uma pergunta, é o teste de um atributo ou característica |
| Folha ou nodo folha    | Classificação final: sim ou não                                     |
| Aresta ou arco         | Ligação entre um nó e uma folha ou entre nós                        |

Fonte: Próprio autor

A classificação por meio de árvore de decisão é um método utilizado para classificar através da sucessiva divisão do conjunto de dados em subconjuntos, até que estes subconjuntos pertençam a uma mesma classe, não necessitando de novas divisões (QUINLAN, 1993). Para realizar estas divisões, é utilizado o critério da utilidade do atributo para a classificação, onde o atributo selecionado como teste para um determinado nó é aquele que possui maior informação. Após isso, inicia-se um novo processo de divisão. Os resultados obtidos são organizados de uma forma compacta, de forma a construir a árvore de decisão (QUINLAN, 1993).

Para executar o aprendizado da árvore de decisão, a fim de detectar desvios no consumo de energia elétrica do sistema de iluminação abordado, será necessário que o algoritmo de aprendizado seja treinado utilizando uma grande base de dados

como referencia. Torna-se extremamente importante que o banco de dados escolhido para a realização do treinamento contenha exemplos classificados como normais e anormais, para que o algoritmo consiga definir com precisão o que é considerado um comportamento normal e anormal.

#### 2.4.2.1. Algoritmos de Árvore de Decisão C4.5

Os algoritmos de árvores de decisão possuem como base modelos estatísticos, onde realizam a classificação e previsão de dados através de um treinamento supervisionado. Estes algoritmos selecionam o atributo de maior relevância e o subdividem em conjuntos de exemplos, de modo a criar um ramo para cada subdivisão do atributo raiz. O objetivo desta ação é a separação de exemplos em classes que não podem ser novamente divididas (GARCIA, 2003; PAULA, 2002).

O C4.5 é um algoritmo de auto aprendizagem, o qual foi apresentado por Quinlan (1993), sendo um aprimoramento do algoritmo ID3. O C4.5 tornou-se um dos algoritmos mais populares utilizado para treinamento de árvore de decisão. Ele utiliza em sua execução, atributos categóricos e quantitativos e adota o sistema de poda, onde elimina os ramos e nodos folha não significativos, a fim de deixar a árvore mais clara e limpa (GARCIA, 2003; REIS FILHO, 2006).

Quinlan (1993) pontuou as principais evoluções do algoritmo C4.5 em relação ao algoritmo ID3, são elas:

a) atua com atributos ordinais ou não ordinais e também com atributos contínuos. Para isto, ele divide os exemplos de modo binário, selecionando os atributos que são maiores, menores ou iguais ao valor definido;

b) representa os valores desconhecidos com um ponto de interrogação e trata estes de maneira especial, não os utilizando para os cálculos do ganho e de entropia, a qual mede a desordem do sistema;

c) realiza uma pós-poda, executa uma varredura na árvore de decisão gerada do final para o início, com o objetivo de transformar ramos que não apresentem ganhos significativos em nós folhas;

d) cria sub-árvores partindo da raiz em direção as folhas, dividindo a raiz em múltiplos subproblemas de decisão mais simples em comparação ao problema original.

A execução de um modelo de árvore de decisão, sob a forma de algoritmo, ocorre por meio de ferramentas desenvolvidas para tal objetivo. Entre as ferramentas mais conhecidas e aplicadas a árvore de decisão está a Sipina –W (GARCIA, 2003; QUINLAN, 1993; REIS FILHO, 2006).

#### 2.4.2.2. Ferramenta Sipina – W

A ferramenta Sipina-W foi desenvolvida no ano de 1995 por um grupo de pesquisa coordenado pelo professor D. A. Zighed da Universidade de Lyon, na França. Ela realiza a mineração de dados, extraindo conhecimentos de um banco de dados utilizando classificadores, onde ao final do processo, representa o conhecimento obtido através de árvore de decisão. É uma ferramenta de *software* livre para fins acadêmicos e de pesquisa (GARCIA, 2003, SIPINA, 2019). A interface do *software* pode ser visualizada na Figura 5.

Figura 5 - Interface da ferramenta Sipina.

|   | Dia da Seman | Hora  | Potencia (W) | Status |
|---|--------------|-------|--------------|--------|
| 1 | 1.00         | 00:00 | 19.16        | Normal |
| 2 | 1.00         | 00:15 | 19.36        | Normal |
| 3 | 1.00         | 00:30 | 19.49        | Normal |
| 4 | 1.00         | 00:45 | 19.35        | Normal |
| 5 | 1.00         | 01:00 | 19.62        | Normal |
| 6 | 1.00         | 01:15 | 19.17        | Normal |
| 7 | 1.00         | 01:30 | 18.88        | Normal |
| 8 | 1.00         | 01:45 | 19.24        | Normal |
| 9 | 1.00         | 02:00 | 18.76        | Normal |

Fonte: Próprio autor

Dentre as ferramentas que realizam o processo de auto aprendizado em banco de dados, o Sipina-W foi selecionado para a realização deste trabalho e se destaca por executar diferentes algoritmos de geração de árvores de decisão, realizar a descoberta no banco de dados automaticamente ou de forma interativa e apresentar como resultado ao final do processo de auto aprendizado uma visão gráfica de árvore de decisão. Com base nos resultados obtidos na árvore de decisão, é possível criar regras por meio de algoritmos, possibilitando a

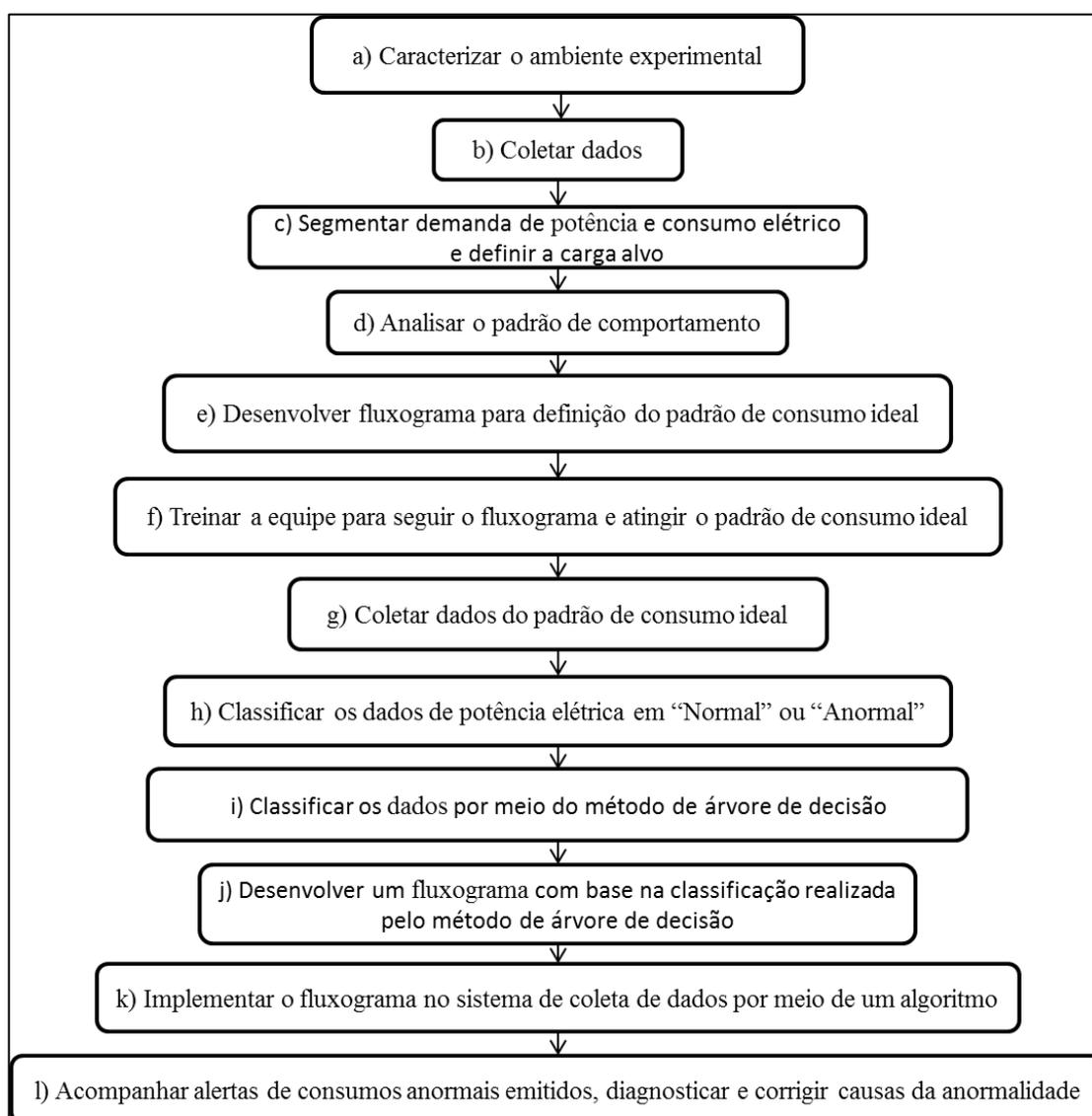
implementação destes em banco de dados ainda não descobertos (GARCIA, 2003; MOZANI, 2016).

Considerando a demanda proposta como um método para aprimorar os processos fabris com custos menores, especificamente no setor de iluminação fabril, o capítulo seguinte apresentará uma proposta metodológica para ser aplicada no processo de redução do consumo de energia elétrica.

### 3. METODOLOGIA PROPOSTA NA REDUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA ELÉTRICA

Este trabalho propõe um estudo sobre a identificação de alterações no padrão de consumo de energia elétrica do sistema de iluminação em uma indústria de médio porte do setor têxtil. Visando a identificar os períodos diários onde há consumos extras de energia sem a justificativa necessária de uso, utilizou-se o conceito de inteligência artificial, através do método de árvore de decisão. A Figura 6 apresenta um diagrama de blocos com o procedimento a ser seguido para a aplicação genérica do método proposto.

Figura 6 - Diagrama de blocos do método proposto



A descrição genérica do procedimento a ser seguido é apresentada a seguir:

- a) caracterizar o ambiente experimental, passo em que deve ocorrer o reconhecimento e o mapeamento do ambiente alvo do estudo, onde se deve conhecer os processos realizados, área construída, fontes de energias utilizadas, modo de contratação da energia, principais grupos consumidores, tecnologias utilizadas nos consumidores, forma de gestão do consumo e nível de instrução dos funcionários quanto à utilização consciente dos recursos energéticos. Além disso, é importante realizar uma divisão dos diferentes grupos consumidores, a fim de definir prioridades para a coleta de dados que será realizada posteriormente;
- b) coletar dados, que tem como base a divisão dos grupos consumidores realizada anteriormente, deve-se realizar a instalação de um sistema de coleta de dados, o qual deve coletar e armazenar dados de potência e consumo elétrico, bem como as datas e horários correspondentes às informações coletadas. A coleta deve ocorrer por um período suficiente para identificar o padrão de comportamento do consumo de cada grupo consumidor;
- c) segmentar a demanda de potência e consumo elétrico e definir a carga alvo. A partir dos dados coletados, deve-se realizar a segmentação da potência de cada grupo consumidor no horário de expediente da empresa e também do consumo elétrico mensal. É importante que seja analisado o histórico de consumo de cada sistema, levando em consideração as variáveis que possam influenciar na oscilação do consumo, procedimento que visa a identificar possíveis oscilações no consumo, devido à inexistência do padrão de comportamento. Com base nestas informações, deve-se escolher o grupo consumidor alvo do trabalho;
- d) analisar o padrão de comportamento, em que deve-se analisar o padrão de comportamento da demanda de potência do sistema alvo em relação ao horário e dia da semana. Ainda, deve-se avaliar a forma de utilização do sistema, formas de acionamento, acionamentos desnecessários, responsáveis pelo acionamento, utilização indevida, tecnologias utilizadas e possíveis fatores ou comportamentos que possam influenciar no consumo. Este procedimento tem por finalidade a identificação de possíveis oportunidades de redução de consumo de energia elétrica;

- e) desenvolver fluxograma para definição do padrão de consumo ideal, tendo como base as oportunidades evidenciadas na execução do item anterior, deve-se desenvolver um fluxograma modelado por questionamentos, que esteja em linguagem acessível para os usuários do sistema. Esse fluxograma servirá como um guia para identificar e eliminar possíveis consumos indevidos no sistema alvo;
- f) treinar a equipe para seguir o fluxograma e atingir o padrão de consumo ideal, devendo-se apresentar o fluxograma desenvolvido para a equipe responsável pela utilização do sistema alvo, explicando os procedimentos a serem seguidos e responsáveis pelas ações. Nesta etapa, é de fundamental importância o envolvimento da gerência da empresa, a fim de exigir que os procedimentos sejam executados;
- g) coletar dados do padrão de consumo ideal, de modo que após as ações visando a redução do consumo terem sido aplicadas, deve-se coletar novamente os dados de demanda de potência e consumo por um período suficiente para identificar o perfil de comportamento do sistema;
- h) classificar os dados de potência elétrica em “normal” ou “anormal”, onde os dados coletados devem ser importados para uma planilha eletrônica, dividindo-se em colunas distintas, contendo informações de data, dia da semana, horário e potência. Deve-se criar uma coluna adicional contendo a informação do status, onde cada linha de dados deve ser classificada como “Normal” caso a potência esteja abaixo do valor previsto para o horário para o momento, e em “anormal” caso o valor esteja acima do valor previsto;
- i) classificar os dados por meio do método de árvore de decisão, devendo-se realizar uma classificação por meio do método de árvore de decisão, tendo os dados de status como atributo de classificação e os dados de dia da semana, hora e potência como atributos preditivos;
- j) desenvolver um fluxograma com base na classificação realizada pelo método de árvore de decisão, a fim de facilitar a interpretação da classificação realizada através do método de árvore de decisão, devendo-se elaborar um fluxograma representando a classificação realizada, de forma que este seja usado como base para o desenvolvimento de algoritmos em diferentes linguagens de programação;

- k) implementar o fluxograma no sistema de coleta de dados por meio de um algoritmo, desenvolvendo-se um algoritmo com base no fluxograma desenvolvido no item anterior, este pode ser desenvolvido em uma planilha eletrônica ou diretamente no sistema de coleta de dados, caso for possível;
- l) acompanhar alertas de consumos anormais emitidos, diagnosticar e corrigir causas da anormalidade, em que os alertas de consumo anormais emitidos devem ser investigados, procurando corrigir a causa que provocou o consumo excessivo, evitando que venham a ocorrer novamente. Vale salientar que esta etapa não será executada neste trabalho.

Este procedimento pode ser aplicado em diferentes grupos consumidores, tanto na indústria, como no comércio, residências, setor público, entre outros. Como estudo de caso para validar o método proposto, esse foi aplicado no sistema de iluminação da área fabril de uma indústria têxtil, o qual é descrito no capítulo seguinte.

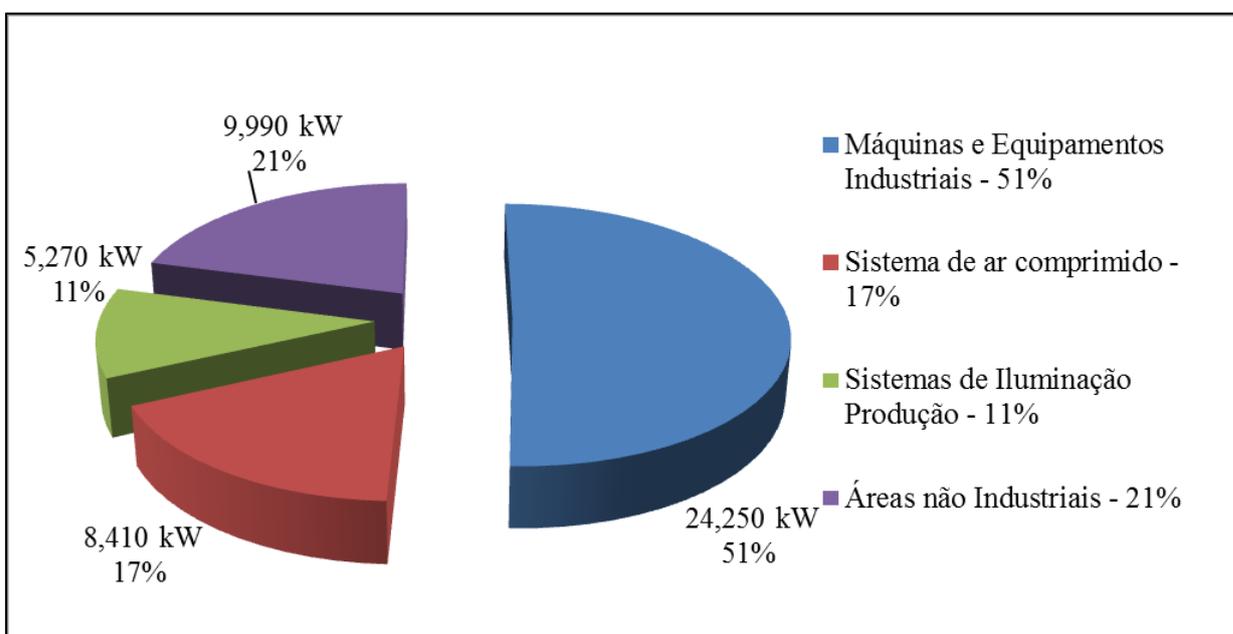
#### 4. MÉTODO APLICADO NA EMPRESA – ESTUDO DE CASO

Este capítulo descreve o processo de aplicação do método proposto no sistema de iluminação da área fabril da empresa alvo deste estudo, a qual foi caracterizada no capítulo 1.

##### 4.1. Caracterização do ambiente experimental

O consumo de energia elétrica característico da empresa ocorre basicamente nas máquinas de corte, costura e passadeiras, sistemas de ar comprimido, iluminação e climatização e equipamentos de escritório. Durante a caracterização dos sistemas, observou-se que é utilizada somente a energia elétrica como fonte de energia primária nas máquinas e processos.

Figura 7 - Demanda de Potência Segmentada

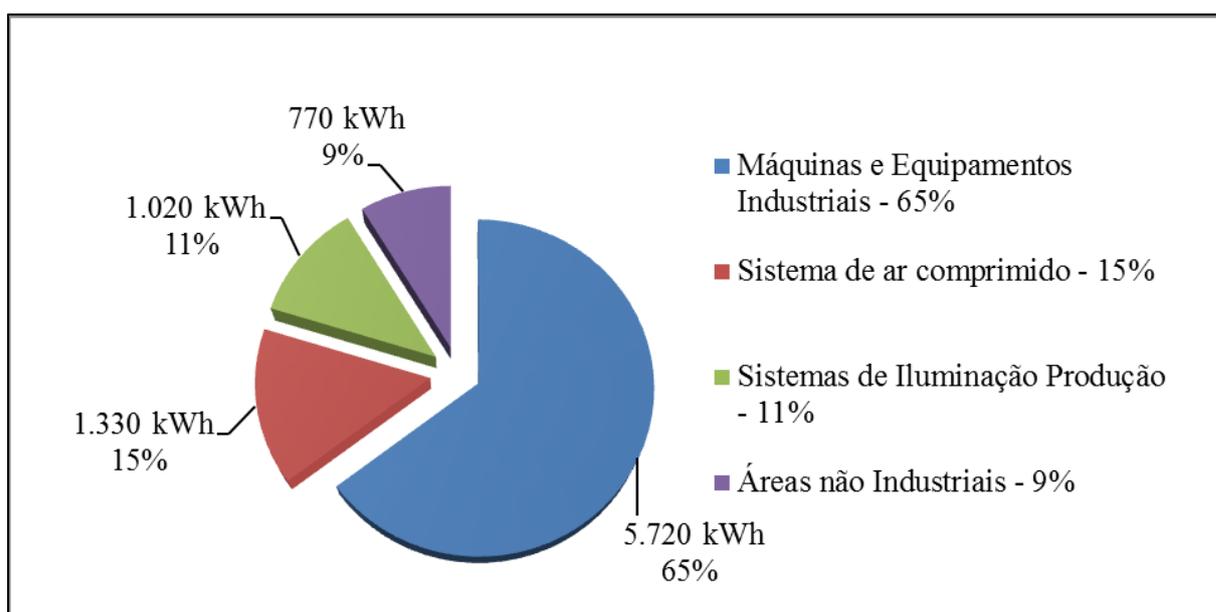


Fonte: Próprio autor

Com relação à demanda de potência, a qual representa a potência instantânea demandada da rede pela unidade fabril, a Figura 7 mostra o gráfico que traça o perfil da utilização da demanda nos diferentes sistemas elétricos. Fica evidente que a maior demanda de potência está associada às máquinas e equipamentos industriais, representando 51% da demanda total, seguido pelas áreas não industriais. Essas representam 21%, referente ao

sistema de ar comprimido, com 17%, e sistemas de iluminação da área fabril, representando 11% da demanda de potência total, o qual é o foco deste trabalho. O gráfico da Figura 8 mostra o consumo de energia elétrica segmentado entre os grupos consumidores de energia elétrica e a proporção de cada grupo no montante do consumo final da fábrica, considerando um total mensal de 8.840 kWh.

Figura 8 - Consumo mensal de energia elétrica segmentado



Fonte: Próprio autor

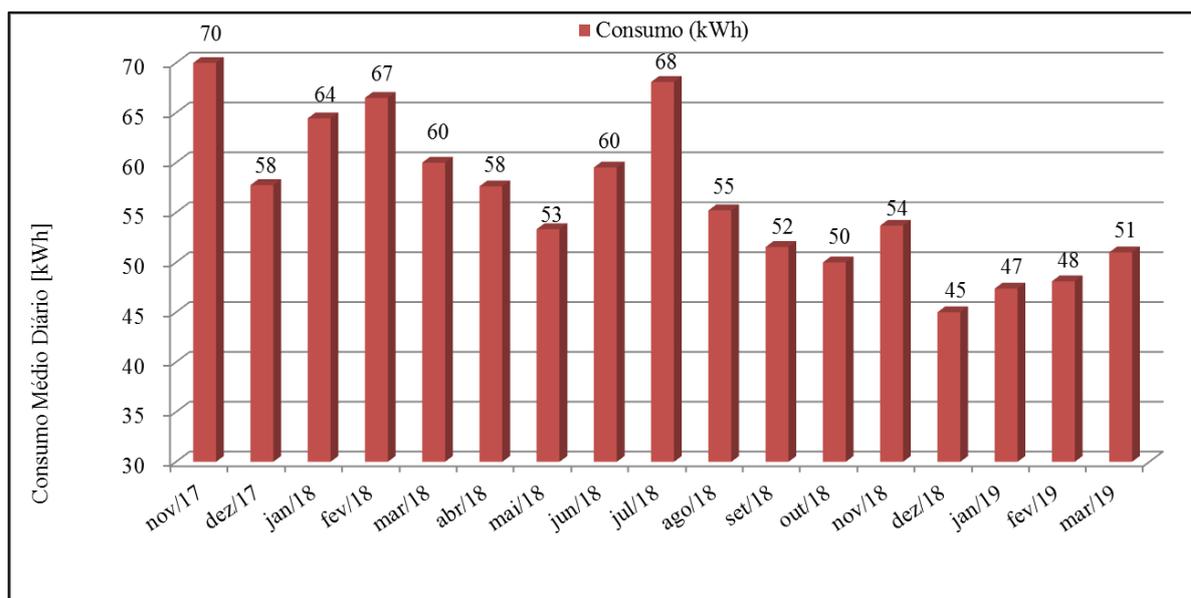
Analisando o gráfico da Figura 8, observa-se que as máquinas e equipamentos industriais representam a maior parcela do consumo de energia elétrica, 65% do total, em seguida o sistema de ar comprimido, com 15%, sistema de iluminação da área fabril, com 11% e áreas não industriais, representando 9%.

A Figura 9 mostra o histórico de consumo médio diário (medido em kWh) dos dias úteis mensais no período de novembro de 2017 a março de 2019, no sistema de iluminação do caso estudado. Nessa figura, verifica-se que o consumo médio diário oscilou entre 45 kWh/dia e 70 kWh/dia, com média diária de 56 kWh. Esta flutuação do consumo se deve à inexistência de um padrão definido de quais pontos de iluminação devem permanecer acionados ao longo do período de funcionamento da empresa. A tomada de decisão sobre o acionamento do sistema de iluminação fica a critério dos colaboradores. Desta forma, a iluminação alta é acionada sem necessidade, bem como outros pontos de iluminação. Em ambientes não ocupados, são indevidamente acionados, ou até mesmo, muitas luminárias não

são desligadas no intervalo do almoço ou logo após o término do expediente diário.

Evidencia-se, assim, a importância de definir um comportamento padrão de consumo ideal do sistema em questão e aplicar uma ferramenta capaz de emitir alertas em casos de divergências no padrão pré-definido.

Figura 9 - Histórico de consumo do sistema de iluminação



Fonte: Próprio autor

O sistema de iluminação abordado neste trabalho está dividido entre iluminação alta, a qual está instalada a cerca de 7 metros do piso, e iluminação baixa, a qual está instalada a 2,90 metros do piso. A Figura 10 apresenta o cenário estudado, destacando as áreas de trabalho e os respectivos sistemas de iluminação instalados, mostrando ainda que parte da iluminação alta encontra-se desligada e parte acionada, sem necessidade. Vale salientar que o prédio não possui telhas translúcidas ou janelas para aproveitamento de iluminação natural, sendo assim, a condição climática não interfere na luminosidade interna do ambiente fabril. Ainda, se evidencia que a iluminação baixa está ativa em locais sem ocupação. Sabendo-se que os fatores determinantes para o gasto energético no sistema de iluminação são a quantidade de luminárias acionadas e o tempo em que estas luminárias permanecem ativas, fica evidenciada a importância da padronização e controle para que o padrão seja seguido.

Figura 10 - Sistema de Iluminação abordado



Fonte: Próprio autor

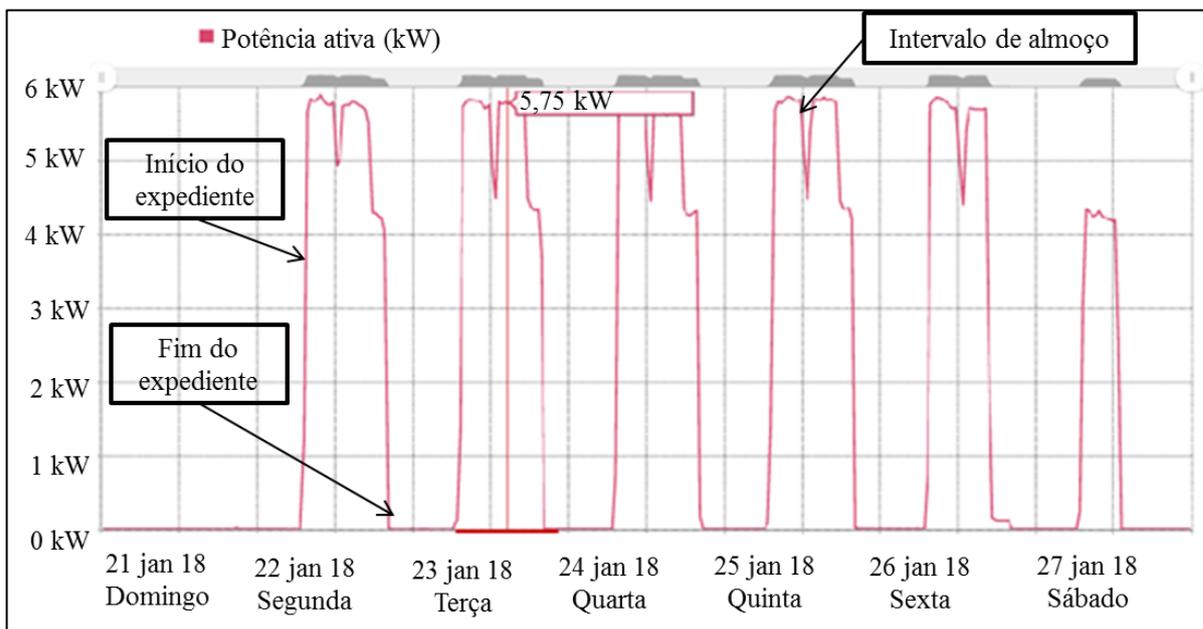
#### 4.2. Identificação do padrão de consumo do sistema de iluminação da empresa

O gráfico da Figura 11 mostra o comportamento da demanda de potência do sistema de iluminação, alvo deste estudo, antes do início da análise no período de uma semana entre os dias 21 e 27 de janeiro de 2018. Observando estes dados, juntamente com a estrutura física, *layout* do ambiente em questão e o comportamento dos funcionários, evidenciaram-se oportunidades de redução no consumo energético do sistema de iluminação.

Verificou-se que, em alguns dias, havia consumo no sistema de iluminação do setor produtivo em horários fora do expediente, sendo este proveniente do esquecimento de alguns circuitos de iluminação ativos. No intervalo do almoço, onde o setor fabril permanece sem ocupação, a iluminação também permanecia ativa, apenas os funcionários do setor de expedição tinham o hábito de desligá-la, justificando a queda de aproximadamente 1 kW na demanda no horário do almoço, conforme pode ser observado na Figura 11. Evidenciou-se

ainda um consumo anormal no sábado pela manhã, dia 27 de janeiro, o qual foi proveniente de horas realizadas esporadicamente.

Figura 11 - Sistema de iluminação com comportamento indesejado



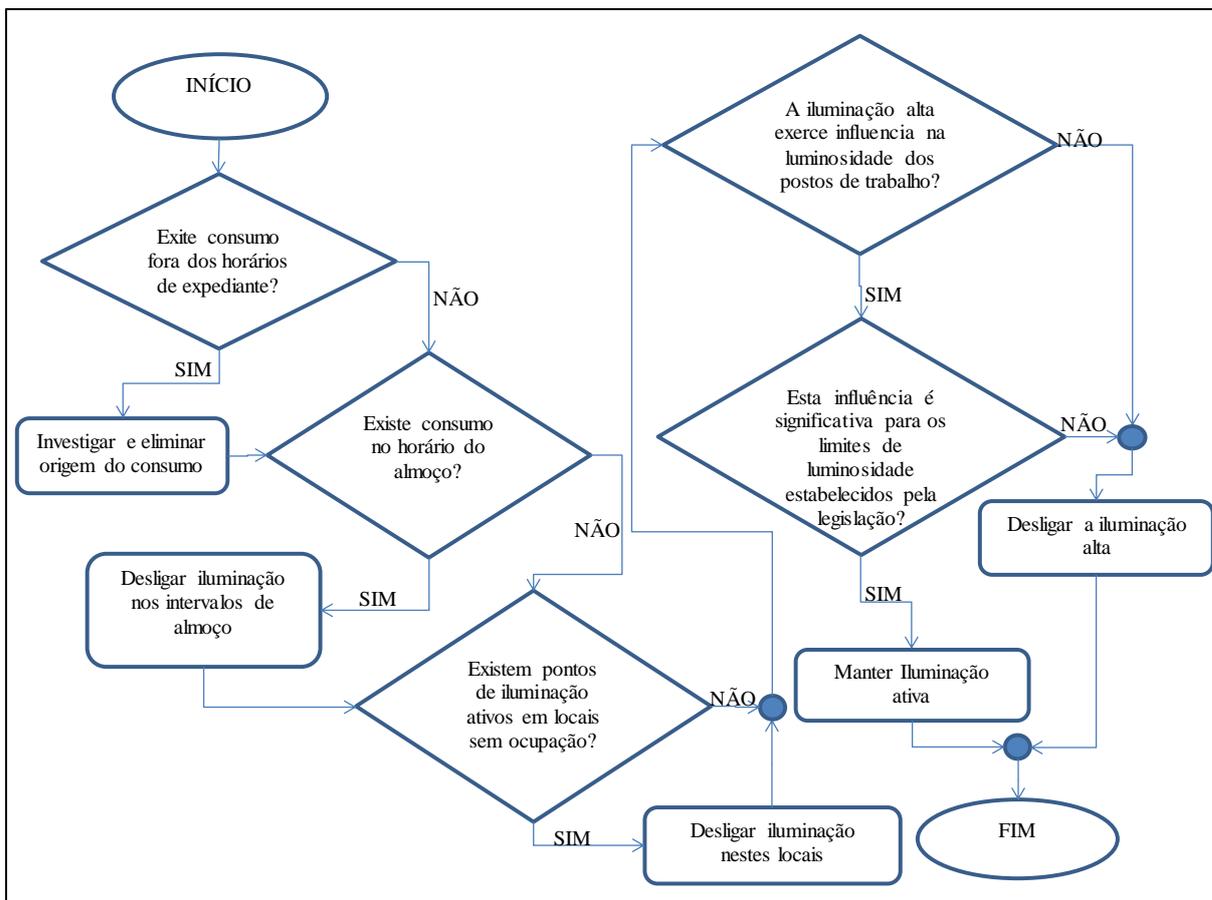
Fonte: Próprio autor

O projeto do sistema de iluminação existente foi concebido para o *layout* antigo dos equipamentos e postos de trabalho. Este *layout* foi alterado antes do início deste trabalho, a fim de obter melhorias no processo produtivo, mas o sistema de iluminação não foi alterado, fazendo com que algumas luminárias permanecessem em pontos sem ocupação de funcionários, sendo desnecessária sua ativação. Visto que todas luminárias eram acionadas através de um único ponto de comando, tornou-se necessário setorizar os circuitos de iluminação, tornando-se possível a ativação somente das luminárias necessárias.

Conforme mostrado na Figura 10, o ambiente fabril da empresa conta com um sistema de iluminação alta, onde evidenciou-se que o mesmo não exerce influência na luminosidade dos postos de trabalho, sendo possível a sua desativação sem que haja qualquer ônus às atividades desenvolvidas.

Com base nas oportunidades descritas anteriormente, criou-se o fluxograma apresentado na Figura 12, onde foi possível representar através de questionamentos, o caminho a ser seguido para identificar e eliminar possíveis consumos indevidos em sistemas de iluminação.

Figura 12 - Fluxograma de comportamento ideal do sistema de iluminação



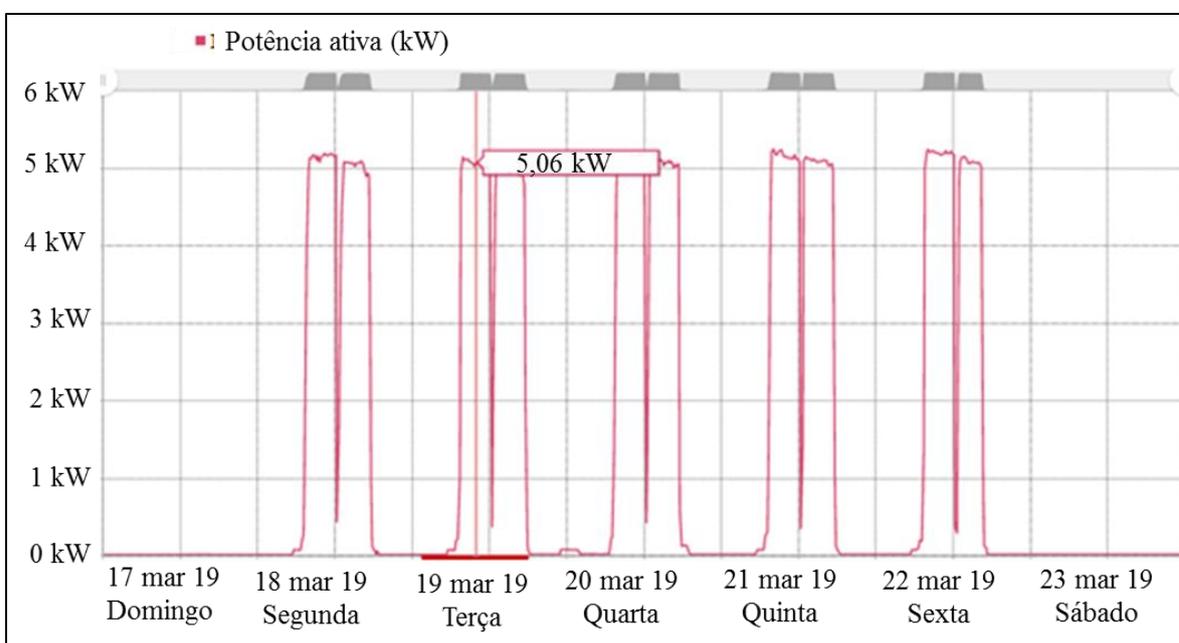
Fonte: Próprio autor

Aplicando o fluxograma da Figura 12, conseguiu-se reduzir significativamente o consumo do sistema de iluminação abordado, devido à execução das ações e aplicação das boas práticas. Houve empenho mútuo de todos os níveis hierárquicos da organização, onde o diretor da empresa salientou a importância da redução de gastos para se manter no mercado. A Figura 13 apresenta o gráfico da demanda de potência do sistema de iluminação após a aplicação deste fluxograma para o período de uma semana, entre os dias 17 e 23 de março de 2019. Observa-se que foi possível eliminar o consumo fora dos horários de expediente e reduzir o consumo no horário do almoço, onde os funcionários criaram o hábito de desligar a iluminação do seu posto de trabalho ao se ausentarem do mesmo. Os pontos de iluminação em locais sem ocupação foram desativados. Em ambientes com pouca circulação, tais como almoxarifado, banheiros e expedição, foram instalados sensores de presença com fotocélula, a fim de acionarem somente quando houvesse ocupação desses ambientes.

Por meio de uma medição realizada com auxílio de um luxímetro, evidenciou-se que mesmo com o sistema de iluminação alto desativado em dias nublados, a iluminância dos postos de trabalho ficava acima de 1500 lux. Esta iluminância é o limite mínimo para este tipo de ambiente de trabalho, conforme estabelecido pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, através da Norma Brasileira Regulamentadora 5413, (ABNT, 1992). Este resultado, torna possível a desativação do sistema de iluminação alta.

A Figura 13 mostra claramente a redução da demanda de potência em relação a Figura 11, onde, com a aplicação das ações relatadas, alcançou-se uma considerável redução do consumo de energia elétrica. Este será considerado o perfil ideal de consumo para o sistema abordado.

Figura 13 - Sistema de iluminação com comportamento desejado



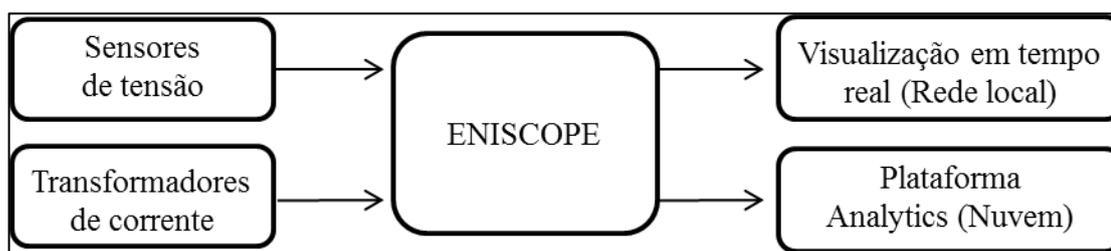
Fonte: Próprio autor

Após definido o padrão ideal de consumo, o desafio é manter este comportamento estável, sem que haja desvios de consumo oriundos de possíveis descuidos da equipe, podendo assim, o consumo retornar aos valores anteriores. Estes fatos tornam clara a necessidade de se desenvolver um sistema capaz de identificar possíveis desvios no comportamento do consumo ideal e emitir alertas instantâneos de maneira automática, possibilitando ações de correção imediatas, sendo este o objetivo do sistema proposto.

### 4.3. Aquisição de dados

A aquisição de dados foi realizada através do *hardware* Eniscope (BEST ENERGY, 2019), que através de sensores de tensão e transformadores de corrente, captura com precisão os dados energéticos do circuito desejado, conforme esquema mostrado na Figura 14. A informação coletada pelo *hardware* é registrada em tempo real e distribuída por toda a rede local e para a nuvem na plataforma de dados da fabricante, denominada Analytics, através da conexão com a internet.

Figura 14 – Diagrama de blocos do *hardware*.



Fonte: Próprio autor

A partir da informação coletada, o sistema disponibiliza planilhas, gráficos e telas que permitem uma fácil visualização de todas as variáveis elétricas medidas e calculadas. O dispositivo possui uma interface WEB para a configuração e visualização em tempo real da potência, tensão, corrente e fator de potência, conforme mostrado na Figura 15. Esta interface é acessada via endereço de IP de qualquer computador ou dispositivo conectado a mesma rede do *hardware* Eniscope.

O sistema ainda conta com uma plataforma de análise, denominada Eniscope Analytics (BEST ENERGY, 2019), mostrada na Figura 16, onde toda informação registrada pelo Eniscope é armazenada na nuvem, podendo ser acessada por qualquer dispositivo com acesso a internet em qualquer lugar do mundo. Esta plataforma permite visualizar os dados históricos com resolução máxima de um minuto, podendo realizar comparativos de dados e até mesmo controlar através de alarmes pré-definidos, todas as variáveis registradas, quando a variável desejada superar o limite estabelecido para o circuito monitorado. O sistema é capaz de emitir estes alertas para que sejam recebidos pelos usuários via e-mail ou SMS.

Figura 15 - Interface para visualização dos dados em tempo real



Fonte: Best Energy, 2019

Figura 16 - Interface gráfica da plataforma Eniscope Analytics



Fonte: Best Energy, 2019

#### 4.4. Modelagem de tratamento de dados mais adequada para o monitoramento

O sistema de aquisição de dados descrito na seção 4.3. permite a realização do download dos dados da grandeza elétrica em questão, no período desejado, em uma planilha de dados no formato .csv, onde todos dados ficam dispostos em uma única coluna, conforme mostrado na Figura 17, permitindo assim a manipulação desses dados em planilhas eletrônicas.

Figura 17 – Exemplo de dados no formato .csv adquiridos do sistema de coleta

|    | A                                       | B           | C               | D | E |
|----|---|-------------|-----------------|---|---|
| 1  | date,timestamp,"2-Ilumin. original - P" |             |                 |   |   |
| 2  | 2019-02-24 00:00,                       | 1550977200, | 19.182827250163 |   |   |
| 3  | 2019-02-24 00:15,                       | 1550978100, | 19.378419748942 |   |   |
| 4  | 2019-02-24 00:30,                       | 1550979000, | 19.493502553304 |   |   |
| 5  | 2019-02-24 00:45,                       | 1550979900, | 19.352341969808 |   |   |
| 6  | 2019-02-24 01:00,                       | 1550980800, | 19.616088358561 |   |   |
| 7  | 2019-02-24 01:15,                       | 1550981700, | 19.173704338074 |   |   |
| 8  | 2019-02-24 01:30,                       | 1550982600, | 18.884554608663 |   |   |
| 9  | 2019-02-24 01:45,                       | 1550983500, | 19.236529159546 |   |   |
| 10 | 2019-02-24 02:00,                       | 1550984400, | 18.781965192159 |   |   |
| 11 | 2019-02-24 02:15,                       | 1550985300, | 19.18520342509  |   |   |
| 12 | 2019-02-24 02:30,                       | 1550986200, | 19.638826115926 |   |   |
| 13 | 2019-02-24 02:45,                       | 1550987100, | 19.221548207601 |   |   |
| 14 | 2019-02-24 03:00,                       | 1550988000, | 19.603190867106 |   |   |

Fonte: Próprio Autor

Este arquivo no formato .csv foi convertido para o formato .xlsx, onde realizou-se a divisão dos dados contidos em uma única coluna para colunas distintas, conforme pode ser visto na Figura 18.

Figura 18 - Dados divididos em colunas no formato .xlsx

|    | A          | B             | C     | D            | E      |
|----|------------|---------------|-------|--------------|--------|
| 1  | Data       | Dia da Semana | Hora  | Potencia (W) | Status |
| 2  | 24/02/2019 | 1             | 00:00 | 19,18        | Normal |
| 3  | 24/02/2019 | 1             | 00:15 | 19,38        | Normal |
| 4  | 24/02/2019 | 1             | 00:30 | 19,49        | Normal |
| 5  | 24/02/2019 | 1             | 00:45 | 19,35        | Normal |
| 6  | 24/02/2019 | 1             | 01:00 | 19,62        | Normal |
| 7  | 24/02/2019 | 1             | 01:15 | 19,17        | Normal |
| 8  | 24/02/2019 | 1             | 01:30 | 18,88        | Normal |
| 9  | 24/02/2019 | 1             | 01:45 | 19,24        | Normal |
| 10 | 24/02/2019 | 1             | 02:00 | 18,78        | Normal |
| 11 | 24/02/2019 | 1             | 02:15 | 19,19        | Normal |
| 12 | 24/02/2019 | 1             | 02:30 | 19,64        | Normal |
| 13 | 24/02/2019 | 1             | 02:45 | 19,22        | Normal |
| 14 | 24/02/2019 | 1             | 03:00 | 19,60        | Normal |

Fonte: Próprio Autor

Inseriu-se uma coluna com valores inteiros referentes ao dia da semana, onde o número 1 representa domingo, 2 segunda-feira e assim sucessivamente. Para isto, utilizou-se a

função “DIA.DA.SEMANA” da planilha eletrônica utilizada. Estes dados serão utilizados para definir um padrão de comportamento para cada dia da semana.

A coluna denominada como “Status” indica a classificação de cada dado de Potência como “Normal” ou “Anormal”. Esta classificação foi realizada de forma manual, comparando os valores referentes a dia da semana, hora e potência de cada linha com o gráfico do padrão de comportamento desejado, apresentado anteriormente na Figura 13.

Para a realização deste estudo, utilizou-se dados com integralizações de 15 minutos, do período de 24/02/2019 a 13/04/2019, totalizando 4.704 registros. No início dos experimentos, realizou-se ensaios com dados referentes a uma semana, porém, esta amostragem inicial não foi suficiente para gerar resultados satisfatórios na classificação realizada pelo sistema de árvore de decisão. O conjunto de dados foi formado com um número de dados insuficientes para a análise. Na sequência, realizou-se testes com inclusão de dados semanais, onde observou-se melhorias na classificação realizada pela árvore de decisão. Evidenciou-se que quanto maior a quantidade de dados inseridos para a realização do aprendizado da árvore de decisão, melhor era a classificação resultante da mesma. Deste modo, trabalhou-se com os dados referentes a 49 dias, o qual era o maior período de amostragem disponível no momento da realização deste estudo, resultando em respostas mais satisfatórias. O período de integralização foi definido com base em uma limitação do sistema de aquisição de dados, pois o mesmo permite apenas a visualização de dados integralizados correspondente a 15 minutos de coleta, para períodos de análise superiores há sete dias.

Os dados no formato .xlsx mostrados na Figura 18 foram importados para a ferramenta Sipina, apresentada na subseção 2.4.2.2. . A interface de importação de dados do Sipina pode ser visualizada no Apêndice A. Definiu-se a coluna “Status” como atributo de classificação e as colunas “Dia da Semana”, “Hora” e “Potência” como atributos preditivos.

Com os atributos definidos, realizou-se o processo de aprendizado da árvore de decisão. A ferramenta Sipina retornou a classificação dos dados, conforme apresentados parcialmente no Apêndice B. A apresentação parcial da árvore de decisão na imagem se deve ao fato dela ser extensa lateralmente, impossibilitando sua demonstração em uma única imagem.

#### 4.5. Implementação do sistema de monitoramento

Com base na classificação dos dados da árvore de decisão gerada por meio do *software* Sipina, criou-se o fluxograma representado na Figura 20, onde o mesmo representa todas as informações geradas de forma compactada. Este fluxograma permite a criação de um algoritmo capaz de replicar o aprendizado adquirido através da técnica descrita na seção 4.4. .

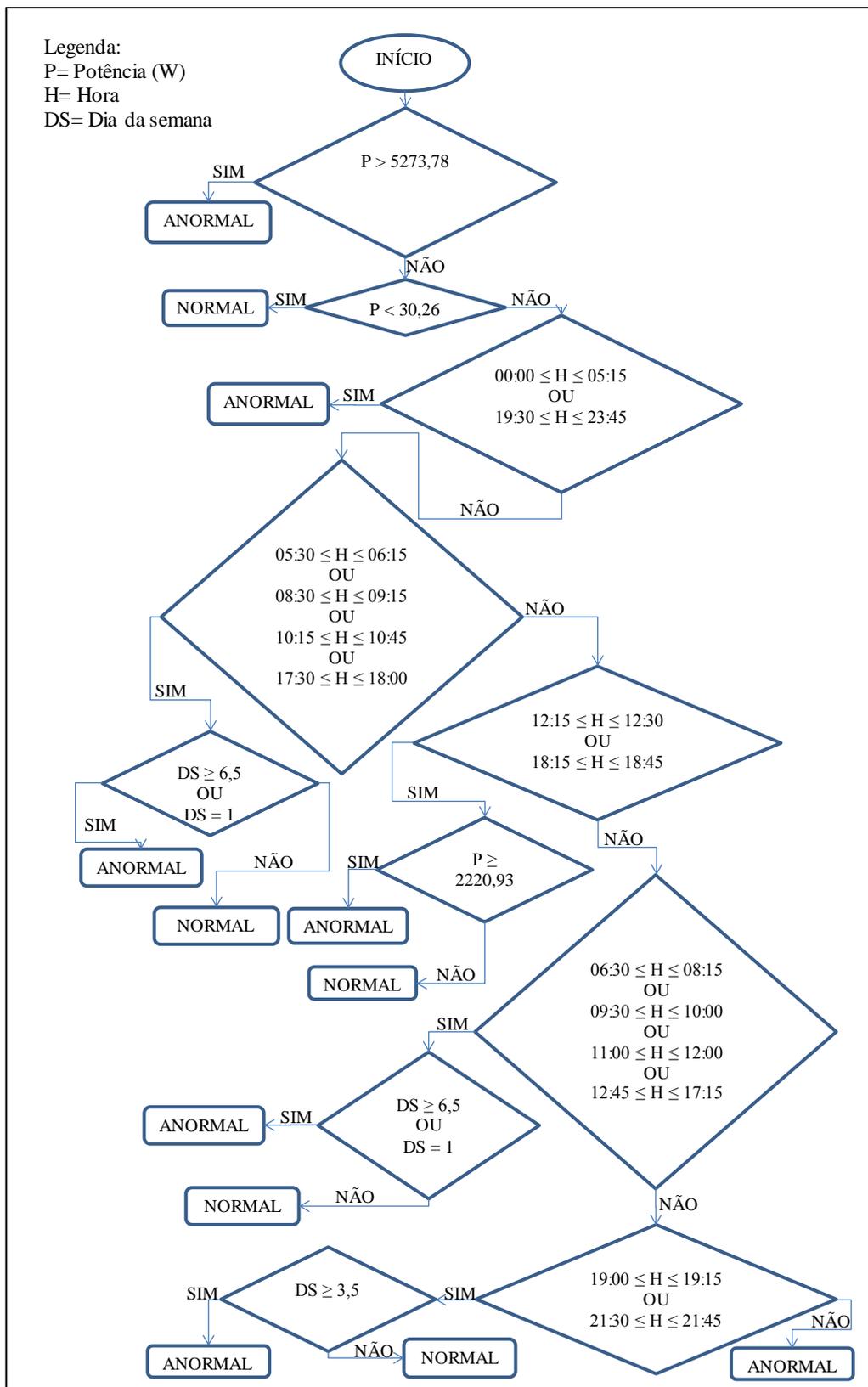
Com base no fluxograma apresentado na Figura 20, desenvolveu-se um algoritmo na planilha eletrônica demonstrada na Figura 18, a qual foi utilizada para realizar a classificação inicial dos dados. A codificação desenvolvida é apresentada no Apêndice C, onde a mesma classifica os dados de consumo em normal ou anormal. Este mesmo algoritmo poderá ser implementado para realizar a análise dos dados de forma automática e em tempo real através de sistemas computacionais.

A fim de validar o algoritmo desenvolvido, realizou-se uma comparação do *Status* real, o qual representa o *status* classificado manualmente com o *Status* Calculado, o qual representa o *status* classificado pelo algoritmo, no mesmo conjunto de dados utilizado para o aprendizado. Havendo divergências, a coluna denominada “Divergências”, na planilha mostrada na Figura 19, recebe o valor numérico 1. Ao final, são somadas as divergências encontradas. Se não houver dados divergentes, dentre os 4.704 dados analisados, tem-se o bom desempenho da classificação realizada através do método de árvore de decisão e do algoritmo desenvolvido.

Figura 19 - Planilha de validação do sistema.

| Data       | Dia da Semana | Hora  | Potencia (W) | Status  | Status Calculado         | Divergencias |
|------------|---------------|-------|--------------|---------|--------------------------|--------------|
| 24/02/2019 | 1             | 00:00 | 19,18        | Normal  | Normal                   | 0            |
| 24/02/2019 | 1             | 00:15 | 19,38        | Normal  | Normal                   | 0            |
| 24/02/2019 | 1             | 00:30 | 19,49        | Normal  | Normal                   | 0            |
| 24/02/2019 | 1             | 00:45 | 19,35        | Normal  | Normal                   | 0            |
| 12/03/2019 | 3             | 21:45 | 57,51        | Anormal | Anormal                  | 0            |
| 13/03/2019 | 4             | 00:45 | 74,22        | Anormal | Anormal                  | 0            |
| 13/03/2019 | 4             | 01:00 | 73,89        | Anormal | Anormal                  | 0            |
| 27/03/2019 | 4             | 12:15 | 3797,14      | Anormal | Anormal                  | 0            |
| 27/03/2019 | 4             | 12:30 | 3776,00      | Anormal | Anormal                  | 0            |
| 27/03/2019 | 4             | 12:45 | 4970,54      | Normal  | Normal                   | 0            |
| 04/04/2019 | 5             | 11:45 | 5473,66      | Anormal | Anormal                  | 0            |
| 04/04/2019 | 5             | 12:00 | 5388,08      | Anormal | Anormal                  | 0            |
| 13/04/2019 | 7             | 23:45 | 16,02        | Normal  | Normal                   | 0            |
|            |               |       |              |         | <b>SOMA DIVERGÊNCIAS</b> | <b>0</b>     |

Figura 20 - Fluxograma gerado a partir da árvore de decisão.



Fonte: Próprio Autor

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta o processo realizado para a validação do método proposto, bem como os resultados obtidos, as considerações finais e sugestões para o aprimoramento do método.

### 5.1. Validação do método

O algoritmo foi aplicado em um conjunto diferente de dados com 4.704 registros, mesma dimensão do conjunto de dados utilizado para o aprendizado da árvore de decisão. Estes dados foram coletados no período de 02 de junho a 20 de julho de 2019. A Figura 21 mostra alguns dados com comportamento “Normal”, “Anormal” e também alguns dos 29 dados divergentes.

Figura 21 - Aplicação do algoritmo em um novo conjunto de dados

| Data       | Dia da Semana | Hora  | Potencia (W) | Status  | Status Calculado         | Divergencias |
|------------|---------------|-------|--------------|---------|--------------------------|--------------|
| 02/06/2019 | 1             | 00:00 | 16,82        | Normal  | Normal                   | 0            |
| 02/06/2019 | 1             | 00:15 | 17,37        | Normal  | Normal                   | 0            |
| 10/06/2019 | 2             | 20:00 | 131,83       | Anormal | Anormal                  | 0            |
| 10/06/2019 | 2             | 20:15 | 132,10       | Anormal | Anormal                  | 0            |
| 19/06/2019 | 4             | 19:15 | 17,90        | Normal  | Normal                   | 0            |
| 26/06/2019 | 4             | 00:00 | 61,12        | Anormal | Anormal                  | 0            |
| 26/06/2019 | 4             | 00:15 | 18,61        | Normal  | Normal                   | 0            |
| 26/06/2019 | 4             | 17:15 | 5277,33      | Normal  | Anormal                  | 1            |
| 26/06/2019 | 4             | 17:30 | 1399,10      | Normal  | Normal                   | 0            |
| 27/06/2019 | 5             | 07:30 | 4962,99      | Normal  | Normal                   | 0            |
| 27/06/2019 | 5             | 07:45 | 5295,42      | Normal  | Anormal                  | 1            |
| 30/06/2019 | 1             | 12:00 | 808,61       | Anormal | Anormal                  | 0            |
| 30/06/2019 | 1             | 13:00 | 811,43       | Anormal | Anormal                  | 0            |
| 30/06/2019 | 1             | 19:30 | 593,09       | Anormal | Anormal                  | 0            |
| 20/07/2019 | 7             | 23:45 | 15,22        | Normal  | Normal                   | 0            |
|            |               |       |              |         | <b>SOMA DIVERGÊNCIAS</b> | <b>29</b>    |

Fonte: Próprio autor

Observa-se que os dados divergentes correspondem a consumos de até 22 W acima do limite estabelecido pela árvore de decisão para os horários em questão. Tratando-se de um limite de 5273 W, uma diferença de 22 W corresponde a somente 0,41% do total, assim sendo, esta alteração de classificação pode ser solucionada aplicando uma tolerância de desvio

sobre os valores utilizados na classificação da árvore de decisão, reduzindo assim a sensibilidade do sistema e evitando alertas falsos.

Para o tratamento das respostas do classificador, foi utilizada a matriz de confusão. A matriz de confusão é uma ferramenta utilizada para avaliação estatística de modelos de classificação realizada pelo processo de autoaprendizagem, onde ela mostra a frequência de classificação de cada classe do modelo através de uma tabela.

A matriz de confusão da Tabela 1 mostra as frequências de classificação para cada classe. Os quadros verdes representam as classificações corretas, já os quadros vermelhos representam as classificações realizadas incorretamente pelo sistema. Verifica-se que dentre os 4.704 dados analisados, 4.334 dados foram classificados corretamente como “Normal”, 341 dados foram classificados corretamente como “Anormal”, 15 dados foram classificados erroneamente como “Normal”, onde ocorreram consumos fora do padrão e o sistema não identificou. Também foram observados 14 dados classificados erroneamente como “Anormal”, onde neste caso o sistema emitiu indevidamente alerta de consumo fora do padrão, resultando em alarmes falsos.

Tabela 1 - Matriz de confusão

|             |         | Status calculado |         |
|-------------|---------|------------------|---------|
|             |         | Normal           | Anormal |
| Status real | Normal  | 4334             | 14      |
|             | Anormal | 15               | 341     |

Fonte: Próprio autor

Com base nestes resultados, calculou-se a acurácia do sistema, a qual representa a proporção de predições corretas, onde pode-se afirmar que o método proposto teve uma acurácia de 99,38%, pois acertou 4.675 dos 4.704 dados analisados. O sistema apresentou uma sensibilidade de 95,78%, a qual representa a proporção de dados “Anormais” classificados corretamente. Obteve-se uma especificidade de 99,67%, a qual representa a proporção de dados classificados corretamente como “Normais”. A eficiência do sistema foi de 97,73%, a qual é a média aritmética da sensibilidade e da especificidade. Isto significa que o sistema tem uma capacidade muito semelhante para identificar dados “Normais” e “Anormais”.

Com a aplicação deste estudo, alcançou-se uma redução mensal de aproximadamente 478 kWh, implicando em uma redução de 32% do consumo do sistema, correspondendo a uma economia mensal de R\$ 309,90, correspondendo a 6,13% do valor total da fatura.

## 5.2. Conclusões

Este trabalho desenvolveu um método genérico que permite a efficientização de sistemas consumidores de energia elétrica e a identificação de alterações no padrão de consumo destes consumidores. Para validação do método proposto, foi realizado um estudo de caso com aplicação do método em um sistema de iluminação de uma indústria têxtil.

Realizou-se a coleta de dados das grandezas elétricas por meio do *hardware* Eniscope, o qual armazena os dados coletados na nuvem, possibilitando seu acesso remoto. Em uma análise preliminar dos dados, evidenciou-se que a potência elétrica demandada pelo sistema não seguia um comportamento padrão. Aliado a este fator, analisou-se a instalação física do sistema de iluminação, o fluxo de produção e o comportamento dos funcionários, sendo evidenciadas oportunidades de efficientização do sistema sem investimentos em novas tecnologias ou equipamentos e, também, oportunidades no âmbito comportamental dos funcionários da organização. A fim de auxiliar o processo de identificação do padrão ideal de consumo do sistema abordado, criou-se um fluxograma baseado nas oportunidades de melhoria encontradas, o qual foi desenvolvido em linguagem adequada ao perfil dos funcionários dos setores abrangidos.

Após a definição e aplicação do padrão de consumo mais adequado para o sistema, realizou-se a classificação dos dados por meio do método de árvore de decisão, este processo possibilitou a identificação dos parâmetros de comportamento das variáveis envolvidas na análise. Os parâmetros descobertos foram utilizados para a criação de um fluxograma, o qual pode ser convertido em algoritmos em diferentes linguagens de programação. Utilizou-se uma planilha eletrônica para desenvolver um algoritmo e aplicar o fluxograma resultante do aprendizado nos dados utilizados para a classificação, o qual gerou suas previsões de forma idêntica ao real.

A validação do método proposto foi realizada através da aplicação do algoritmo em um novo conjunto de dados, onde se obteve 99,38% de acerto nas classificações, sendo que os

desvios encontrados podem ser evitados aplicando uma tolerância nos valores encontrados no aprendizado da árvore de decisão e utilizados no algoritmo.

A aplicação do método de árvore de decisão para identificação de alterações no padrão de consumo de energia elétrica, se mostrou uma importante ferramenta para ser utilizada como auxílio no gerenciamento da utilização racional de energia elétrica nos mais diversos sistemas consumidores deste insumo. Após definido um padrão de consumo racional em um sistema de iluminação, o método proposto foi capaz de realizar o aprendizado do padrão de consumo e identificar desvios do mesmo, garantindo por meio de alertas que este comportamento no padrão de consumo seja seguido, evitando que as boas ações sejam deixadas de lado com o passar do tempo.

Para trabalhos futuros, sugere-se que o método proposto seja aplicado e avaliado em diferentes sistemas consumidores, tais como sistemas motrizes, sistema de geração de ar comprimido, sistemas de climatização e refrigeração, sistemas de iluminação pública e outros consumidores de energia elétrica.

## REFERÊNCIAS

- ABDELAZIZ, E. A.; SAIDUR, R.; MEKHILEF, S. **A review on energy saving strategies in industrial sector.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 15, n. 1, 2011.
- ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5413 Iluminância de interiores.** Rio de Janeiro, RJ, 1992.
- ANDREOLA, R. **Support Vector Machines na classificação de imagens hiperespectrais.** Dissertação de mestrado - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós Graduação em Sensoriamento Remoto, Porto Alegre, RS, 2009.
- BEST ENERGY. **The most complete energy monitoring & management system in the world.** Disponível em: <https://best.energy/eniscope-ems/>. Acesso em: 27/05/2019.
- BUNSE, K. VODICKA, M. SCHONSLEBEN, P. BRULHART, M and ERNEST, F. O. **Integrating energy efficiency performance in production management – gap analysis between industrial needs and scientific literature.** Journal of Cleaner Production, Volume 19, Issues 6–7, April–May 2011.
- CARVALHO, J. A. B. **Rational and efficient use of energy in industrial electrical installations.** 41st International Universities Power Engineering Conference, 6-8 September 2006, Newcastle. Proceeding ... Northumbria University, 2006.
- CORTELETTI, D. **Ferramenta de autoavaliação do potencial de eficiência energética aplicada às indústrias do setor metalomecânico.** Dissertação de mestrado – Curso de Mestrado Profissional em Produção - Instituto Tecnológico de Aeronáutica. São José dos Campos, 2015.
- DUFLOU, J. R. et al. **Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 61, n. 2, jan. 2012.
- FENERICH, F. C., COSTA, S. E. G. DA and LIMA, E. P. DE. **Energy efficiency in industrial environments: Overview and research agenda.** IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, VOL. 15, NO. 3, MARCH 2017.
- FERREIRA, J. J. FERREIRA; T. J. **Economia e gestão da energia.** Lisboa: Texto 156p. (Textos de Gestão). 1994.
- GAN, C. K. et al. **Techno-economic analysis of LED lighting: A case study in UTeM's Faculty Building.** Procedia Engineering, v. 53, 2013.
- GARCIA, S. C. O. **Uso de árvores de decisão na descoberta de conhecimento na área da saúde.** Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Programa de Pós Graduação em Computação, Porto Alegre, RS, 2003.

HADDAD, A. N. C. V. et al. **Eficiência energética - Fundamentos e aplicações**. 1ª edição – Campinas – SP: Elektro, 2012.

JIANHUA, S. **Monitor and analysis of renewable energy based on intelligent algorithm**. School of Energy power and mechanical engineering, north china electric power university, Beijing 102206, China 2015. Sixth International Conference on Intelligent Systems Design and Engineering Applications ARTIGO Mitchell, T. Machine Learning. McGraw Hill, 1997.

KRALIKOVA, R.; ANDREJIOVA, M.; WESSELY, E. **Energy saving techniques and strategies for illumination in industry**. Procedia Engineering, v. 100, 2015.

LEME, H. F. **Teoria de derivativos aplicada ao mercado de energia elétrica brasileiro: Avaliação e gestão de risco de contratos contendo flexibilidades**. Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica. – Campinas, SP, 2008.

LORENA, A. C.; CARVALHO, A. P. L. F. **Uma introdução às Support Vector Machines**. Rita, v. 14, nº 2, 2007.

MATHIAS, F. R. D. C. **Diagnóstico energético e gestão de energia em uma planta petroquímica de primeira geração**. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas, SP, 2014.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA: MME; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA:EPE. **Balanco Energético Nacional 2018: ano base 2017**. Brasília – DF. EPE, 2018.

MORALES, C. **Indicadores de consumo de energia elétrica como ferramenta de apoio à gestão: Classificação por prioridades de atuação na Universidade de São Paulo**. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas. São Paulo, 2007.

MOZANI, R. C. **Monitoramento não invasivo e identificação do consumo de energia individual de cargas residenciais**. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. Campinas, SP, 2016.

PAULA, M. B. **Indução automática de árvores de decisão**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, SC, 2002.

PROCEL: PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Orientações gerais para conservação de energia elétrica em prédios públicos**. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – Procel, 2001.

PROCEL: PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Manual de Iluminação**. Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – Procel, 2011.

QUADROS, C. M. et al. **Guia para elaboração de trabalhos acadêmicos**. Universidade de Caxias do Sul. Sistema de Bibliotecas / SIBUCS ; [recurso eletrônico] – 6. ed., atual e ampl. – Caxias do Sul, RS, 2019.

QUINLAN, J. **C4.5: Programs for machine learning**. San Mateo: Morgan Kaufmann, Publishers Inc., San Francisco, CA, USA, 1993.

REIS FILHO, J. **Sistema inteligente baseado em árvore de decisão, para apoio ao combate as perdas comerciais na distribuição de energia elétrica**. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Elétrica. Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Uberlândia, SP, 2006.

ROCHA, J.R. DA. **Estudo e desenvolvimento de sistema automatizado integrado de gestão de energia elétrica**. Dissertação (Mestrado) – Escola politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas. São Paulo, 2009.

SAIDEL, M. A. **A gestão de energia elétrica na USP: o programa permanente para o uso eficiente de energia elétrica**. Tese (Livre Docência) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas. São Paulo, 2005.

SILVA, D. V.; SCARPEL, R. A. **Detecção de fraudes na distribuição de energia elétrica utilizando support vector machine**. *Investigação Operacional*, v 27, 2007.

SIPINA RESEARCH. **Sistema Classificador de Árvore de Decisão**. Software livre para pesquisadores. Disponível em: <http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/sipina.html>. Acesso em: 01/05/2019.

SOLA, A. V. A. H. **Fatores humanos como barreiras para eficiência energética em indústrias**. Dissertação (mestrado em engenharia de produção). Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Ponta Grossa. Ponta Grossa – Paraná, 2006.

SOUZA, F. J. DE. **Modelos Neuro-Fuzzy Hierárquicos**. Tese de Doutorado. Puc-Rio, 1999.

SOUZA, M. B. DE. **Potencial de Aproveitamento da Luz Natural Através da Utilização de Sistemas Automáticos de Controle para Economia de Energia Elétrica**. Tese Doutorado em Engenharia de Produção). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis – SC, 2003.

ZUBEN, F. J. V. **Redes Neurais Aplicadas ao Controle de Máquina de Indução**. Dissertação (mestrado) - Departamento de Engenharia de Computação e Automação Industrial (DCA). Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação (FEEC). Universidade Estadual de Campinas (Unicamp), SP, 2011.

## APÊNDICE A – INTERFACE DE DADOS DO SIPINA

Sipina Research Version 3.12 - [Learning set editor]

File Edit Data Statistics Induction method Analysis View Window Help

Attribute selection

- Class attribute
  - Status
- Predictive attributes
  - Dia da Semana
  - Hora
  - Potencia (W)

Learning method

MethodName=Improved ChAID (Tschuprow Goodness of Split)  
 MethodClassName=TArbreDecisionl  
 Hd=8  
 Merge=0.05  
 Split=0.001  
 TypeBonferroni=1  
 ValueBonferroni=1  
 Sampling=0

Examples selection

4704 examples selected  
 0 examples idle

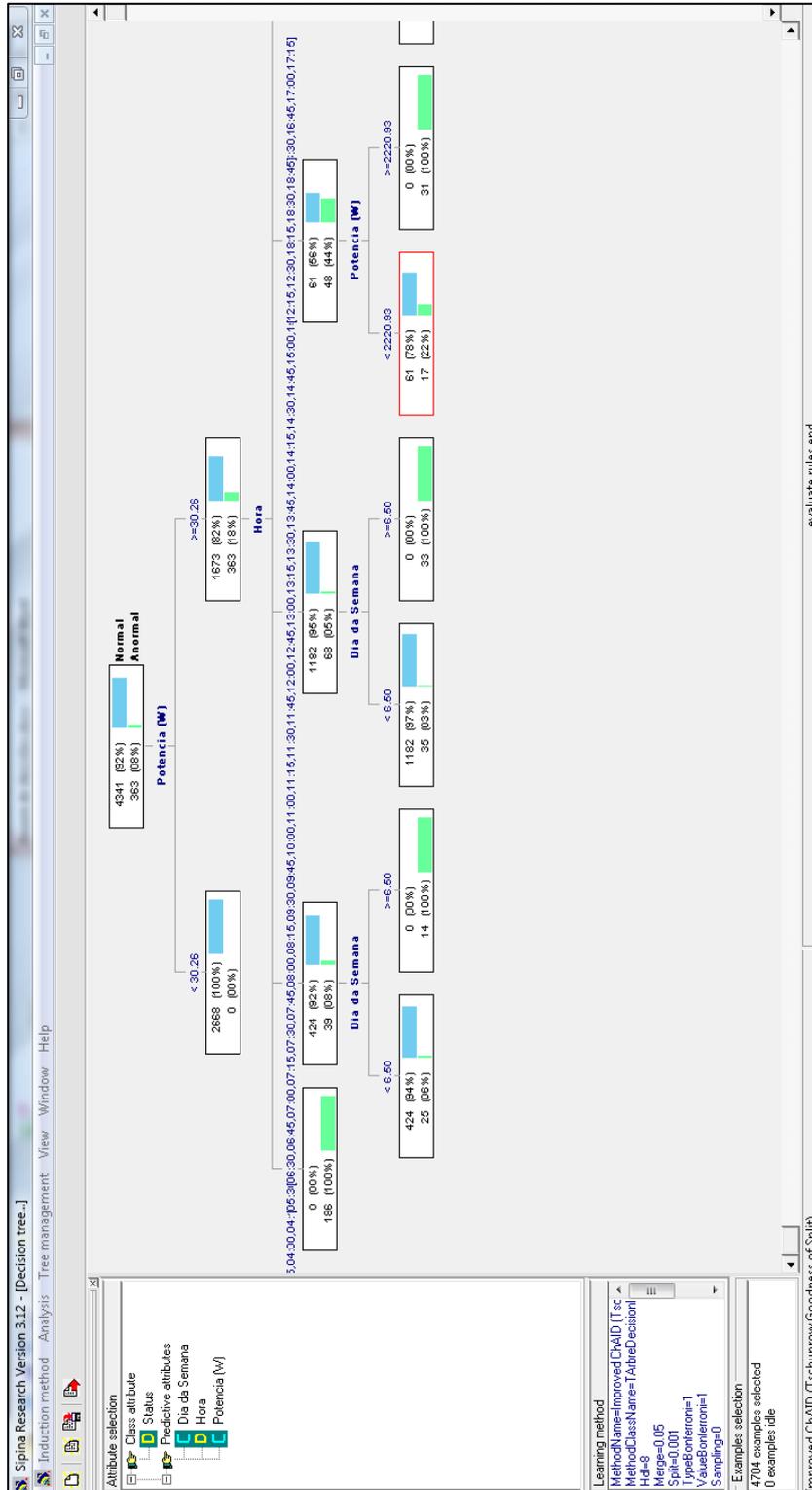
|    | Dia da Semana | Hora  | Potencia (W) | Status |
|----|---------------|-------|--------------|--------|
| 1  | 1.00          | 00:00 | 19.18        | Normal |
| 2  | 1.00          | 00:15 | 19.38        | Normal |
| 3  | 1.00          | 00:30 | 19.49        | Normal |
| 4  | 1.00          | 00:45 | 19.35        | Normal |
| 5  | 1.00          | 01:00 | 19.62        | Normal |
| 6  | 1.00          | 01:15 | 19.17        | Normal |
| 7  | 1.00          | 01:30 | 18.88        | Normal |
| 8  | 1.00          | 01:45 | 19.24        | Normal |
| 9  | 1.00          | 02:00 | 18.78        | Normal |
| 10 | 1.00          | 02:15 | 19.19        | Normal |
| 11 | 1.00          | 02:30 | 19.64        | Normal |
| 12 | 1.00          | 02:45 | 19.22        | Normal |
| 13 | 1.00          | 03:00 | 19.60        | Normal |
| 14 | 1.00          | 03:15 | 19.22        | Normal |
| 15 | 1.00          | 03:30 | 18.75        | Normal |
| 16 | 1.00          | 03:45 | 19.12        | Normal |
| 17 | 1.00          | 04:00 | 19.06        | Normal |
| 18 | 1.00          | 04:15 | 19.05        | Normal |
| 19 | 1.00          | 04:30 | 19.45        | Normal |
| 20 | 1.00          | 04:45 | 19.38        | Normal |
| 21 | 1.00          | 05:00 | 19.36        | Normal |
| 22 | 1.00          | 05:15 | 19.34        | Normal |
| 23 | 1.00          | 05:30 | 19.15        | Normal |
| 24 | 1.00          | 05:45 | 19.17        | Normal |
| 25 | 1.00          | 06:00 | 18.84        | Normal |
| 26 | 1.00          | 06:15 | 19.00        | Normal |
| 27 | 1.00          | 06:30 | 19.42        | Normal |
| 28 | 1.00          | 06:45 | 19.22        | Normal |
| 29 | 1.00          | 07:00 | 19.59        | Normal |
| 30 | 1.00          | 07:15 | 19.83        | Normal |
| 31 | 1.00          | 07:30 | 19.20        | Normal |
| 32 | 1.00          | 07:45 | 19.26        | Normal |
| 33 | 1.00          | 08:00 | 19.03        | Normal |
| 34 | 1.00          | 08:15 | 19.13        | Normal |
| 35 | 1.00          | 08:30 | 19.57        | Normal |
| 36 | 1.00          | 08:45 | 19.37        | Normal |

Analysis NEW.FDM Attributes : 4 Examples : 4704

Improved ChAID (Tschuprow Goodness of Split)

Fonte: Próprio Autor

## APÊNDICE B – ÁRVORE DE DECISÃO GERADA PELO SIPINA



Fonte: Próprio autor

### APÊNDICE C – ALGORITMO DE IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA

```
=SE(D2>5234,78;"Anormal";SE(D2<30,26;"Normal";
SE(OU(E(I$2>=C2;C2<=I$3);E(I$4<=C2;C2<=I$5)));
"Anormal";SE(OU(E(I$6<=C2;C2<=I$7);E(I$8<=C2;
C2<=I$9);E(I$10<=C2;C2<=I$11);E(I$12<=C2;C2<=
I$13)));SE(B2>=6,5;"Anormal";"Normal");SE(OU(E(
I$14<=C2;C2<=I$15);E(I$16<=C2;C2<=I$17)));SE(D2>
=2220,93;"Anormal";"Normal");SE(OU(E(I$18<=C2;
C2<=I$19);E(I$20<=C2;C2<=I$21);E(I$22<=C2;C2<=
I$23);E(I$24<=C2;C2<=I$25)));SE(B2>=6,5;
"Anormal";"Normal");SE(OU(E(I$26<=C2;C2<=I$27);
E(I$28<=C2;C2<=I$29)));SE(B2>=3,5;"Anormal";
"Normal";"Anormal"))))))))
```

Fonte: Próprio Autor