

Implementação de um sistema de monitoramento energético em um sistema de climatização industrial

André Luis Lermen de Souza - a42408

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Industrial - Eletrotécnica. Trabalho desenvolvido durante Programa de Dupla Diplomação entre Instituto Politécnico de Bragança (IPB) e Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Trabalho orientado por:

Prof. Dr. Paulo Leitão

Prof. Dr. Fabio Luiz Bertotti

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri.

Bragança

2021

Implementação de um sistema de monitoramento energético em um sistema de climatização industrial

André Luis Lermen de Souza - a42408

Dissertação apresentada à Escola Superior de Tecnologia e de Gestão de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Industrial - Eletrotécnica.

Trabalho orientado por:
Prof. Dr. Paulo Leitão
Prof. Dr. Fabio Luiz Bertotti

Esta dissertação não inclui as críticas e sugestões feitas pelo Júri.

Bragança

2021

Dedicatória

Dedico este trabalho aos meus pais e meu irmão, por terem dado total suporte nesta etapa. Aos meus amigos feitos em Bragança, sem vocês seria tudo mais difícil. A Otávio Correa Rossi, amigo que vive diariamente em minhas memórias.

Agradecimentos

A realização deste projeto não seria possível sem o apoio incondicional da minha família, a qual sou inteiramente grato por me dar condições de me preparar a este momento.

Agradeço a oportunidade de partilhar experiências e conhecimento com meu Orientador Paulo Leitão e também com meu tutor Luis Piardi, o qual nunca mediu esforços para me auxiliar.

A Catraport, pela oportunidade de realizar este projeto em suas instalações.

Aos meus amigos um grande abraço, vocês tornam todos os momentos mais felizes e leves.

A Otávio Correa Rossi, por zelar por mim e pelos meus caminhos.

A Guilherme Gallina, por me mostrar que desistir nunca é uma opção.

A todos que se fizeram presentes de forma leal e sincera.

A Deus.

Resumo

A importância de estudar as tecnologias nas quais estamos envolvidos, seja no dia-a-dia ou mesmo em ambientes de manufatura, não é discutível. Analisar todos os comportamentos, sendo os mais simples possíveis, faz toda a diferença se pretendemos extrair a máxima eficiência que o sistema pode nos oferecer.

Este trabalho aborda um exemplo de sistema baseado nas tecnologias IoT, onde foram instalados equipamentos para monitoramento elétrico no sistema de climatização da empresa Catraport, que desenvolve peças para montagem de escapamentos de automóveis, localizada na cidade de Bragança, Portugal.

Esse monitoramento, por sua vez, é feito totalmente online e em tempo real, dispensando a necessidade de um funcionário estar coletando dados de máquinas durante o expediente, por exemplo. Além da retirada da intervenção humana, a digitalização dos dados coletados traz conforto para o usuário se preparar da maneira que quiser, em busca de informações específicas ou gerais, além de fazer comparações e descobertas. Após a coleta e visualização dos dados, o sistema passa por monitoramento utilizando as Regras de Nelson, as quais tem o objetivo de encontrar padrões estatísticos nos dados elétricos coletados, a fim de prever comportamentos nos equipamentos, com o intuito de melhorar sua utilização, seja para aumentar seja vida útil e até mesmo redução do consumo.

Dados de temperatura interna da fábrica foram coletados por meio de sensores. Esses dados foram comparados com os dados de temperatura externa e consumo dos aerotermos, com a intenção de encontrar padrões de funcionamento nas máquinas do sistema de climatização a partir da temperatura.

A realização deste trabalho tem o objetivo de poder destacar os equipamentos do

sistema de climatização da empresa Catraport, a fim de melhorar o funcionamento do sistema e também uma possível redução nos custos de energia destes equipamentos. Esta será validada por meio da inserção das regras de Nelson na base de dados dos dados elétricos coletados, além da análise gráfica.

A implementação do sistema de monitoramento energético ocorreu da forma esperada. Através dos dados coletados foi possível realizar o entendimento do funcionamento dos equipamentos de climatização, além da análise estatística feita pelas Regras de Nelson e dados de temperatura coletados no interior da fábrica. Alguns padrões de funcionamento trouxeram uma análise mais detalhada e sugestões de funcionamento foram propostas.

Palavras-chave: Monitoramento de energia, eficiência energética, Grafana, InfluxDB, Internet das coisas, IoTaWatt, Regras de Nelson.

Abstract

The importance of studying the technologies in which we are involved, whether on a daily basis or even in manufacturing environments, is not debatable. Analyzing all the behaviors, being the simplest possible, makes all the difference if we intend to extract the maximum efficiency that the system can offer us.

This work addresses an example of a system based on IoT technologies, where equipment for electrical monitoring was installed in the air conditioning system of the company Catraport, which develops parts for assembling car exhausts, located in the city of Bragança, Portugal.

This monitoring, in turn, is done completely online and in real time, eliminating the need for an employee to be collecting data from machines during working hours, for example. In addition to removing human intervention, the digitization of collected data provides comfort for the user to prepare in the way they want, in search of specific or general information, in addition to making comparisons and discoveries. After collecting and viewing the data, the system undergoes monitoring using the Nelson Rules, which aim to find statistical patterns in the collected electrical data, in order to predict equipment behavior, in order to improve its use, either to increase its useful life and even reduce consumption.

Factory internal temperature data was collected through sensors. These data were compared with the external temperature and consumption data from the air heaters, with the intention of finding operating patterns in the HVAC system machines based on the temperature.

The purpose of this work is to be able to highlight the HVAC system equipment of

the company Catraport, in order to improve the system's functioning and also a possible reduction in the energy costs of these equipments. This will be validated through the insertion of Nelson's rules in the database of electrical data collected, in addition to graphical analysis.

The implementation of the energy monitoring system took place as expected. Through the collected data, it was possible to understand the functioning of the HVAC equipment, in addition to the statistical analysis carried out by Nelson's Rules and temperature data collected inside the factory. Some working patterns brought a more detailed analysis and working suggestions were proposed.

Keywords: Energy monitoring, energy efficiency, Grafana, InfluxDB, Internet of Things, IoTaWatt, Nelson Rules.

Conteúdo

Agradecimentos	vii
Resumo	ix
Abstract	xi
1 Introdução	1
1.1 Objetivos	2
1.2 Contribuição do trabalho	2
1.3 Estrutura do documento	3
2 Estado da arte	5
2.1 Indústria 4.0	5
2.2 Internet das Coisas	6
2.3 Monitoramento energético	9
2.4 Eficiência energética em sistemas de climatização	11
3 Descrição do caso de estudo	15
3.1 Equipamentos monitorados	15
3.2 IoTaWatt	19
3.3 InfluxDB	22
3.4 Raspberry Pi	23
3.5 Grafana	24

3.6	Regras de Nelson	25
3.7	Sensor de temperatura	28
4	Arquitetura do sistema	31
4.1	Arquitetura geral	31
4.2	Instalação do IoTaWatt	33
4.3	Conexão entre os equipamentos	35
4.4	Consulta e visualização de dados	37
4.5	Coleta de dados de temperatura	39
4.6	Validação utilizando as Regras de Nelson	40
5	Avaliação do funcionamento do sistema	43
5.1	Funcionamento do sistema de monitoramento	43
5.1.1	Análise gráfica	44
5.1.2	Problemas encontrados	51
5.2	Validação das regras de Nelson	52
5.3	Coleta e comparação de dados de temperatura	57
6	Conclusões	65

Lista de Figuras

2.1	Princípios da Indústria 4.0 [6]	7
2.2	Internet das Coisas [7].	9
3.1	Imagem do equipamento Cortina de ar da marca Frico, modelo AGS5500, que se encontra instalado na empresa Catraport. [29]	16
3.2	Imagem do equipamento aeroventilador da marca Frico, modelo IP20/55, que se encontra instalado na empresa Catraport. [29]	17
3.3	Imagem do equipamento aerotermo da marca Frico, modelo SWS22, que se encontra instalado na empresa Catraport [29].	19
3.4	Exemplo de um equipamento IoTaWatt, semelhante ao utilizado no projeto.[30]	20
3.5	Interface de configuração do equipamento IoTaWatt.[30]	21
3.6	Exemplo de um microcomputador Raspberry Pi.[31]	23
3.7	Exemplo de construção de dashboards para visualização no software Grafana. [32]	25
3.8	Regra número 1 das Regras de Nelson. [33]	26
3.9	Regra número 2 das Regras de Nelson. [33]	27
3.10	Regra número 5 das Regras de Nelson.[33]	27
3.11	Regra número 6 das Regras de Nelson.[33]	28
3.12	Exemplo de um sensor BME280 semelhante ao utilizado no projeto. [34]	29
4.1	Fluxograma do funcionamento do sistema de monitoramento instalado na empresa Catraport. Fonte: Autoria própria.	32

4.2	Diagrama unifilar do circuito de climatização da empresa Catraport. Fonte: Autoria própria.	34
4.3	Instalação do equipamento IoTaWatt no quadro geral do circuito de climatização. Em amarelo estão sinalizados os transformadores de corrente. Em vermelho temos a sinalização do equipamento IoTaWatt. Fonte: Autoria própria.	36
4.4	Interface da base de dados InfluxDB, a qual está inserida no equipamento Raspberry Pi. Fonte: Autoria própria.	37
4.5	Interface para visualização dos dados elétricos coletados pelo IoTaWatt feita pelo software Grafana. Fonte: Autoria própria	38
4.6	Exemplificação da interface de visualização criada no software Grafana para que o usuário consulte os dados de temperatura coletados. Fonte: Autoria própria	39
4.7	Local de instalação de um dos sensores de coleta de temperatura na fábrica da Catraport, sinalizado em vermelho. Fonte: Autoria própria	40
5.1	Gráfico da coleta de dados potência ativa do circuito de climatização. Fonte: Autoria Própria.	45
5.2	Gráfico da coleta de dados potência aparente do circuito de climatização. Fonte: Autoria Própria.	45
5.3	Gráfico da coleta de dados potência reativa do circuito de climatização. Fonte: Autoria Própria.	46
5.4	Gráfico da coleta dos dados fator de potência do circuito de climatização. Fonte: Autoria Própria.	47
5.5	Gráfico da coleta de dados de corrente do circuito de climatização. Fonte: Autoria Própria.	47
5.6	Interface criada para descrição e visualização do histórico de disparo dos alertas criados. Fonte: Autoria própria.	53

5.7	Disparos dos alertas para a Regra de Nelson número 1 nos dados de potência ativa coletados. Fonte: Autoria própria.	54
5.8	Disparos dos alertas para a Regra de Nelson número 2 nos dados de potência ativa coletados. Fonte: Autoria própria.	54
5.9	Disparos dos alertas para a Regra de Nelson número 5 nos dados de potência ativa coletados. Fonte: Autoria própria.	55
5.10	Disparos dos alertas para a Regra de Nelson número 6 nos dados de potência ativa coletados. Fonte: Autoria própria.	56
5.11	Coleta de dados de temperatura dentro da fábrica de empresa Catraport, compreendendo todo o período em que o sensor ficou instalado. Fonte: Autoria própria.	58
5.12	Coleta de dados de temperatura que compreende o período de 14/05/2021 até 23/06/2021. Fonte: Autoria própria.	59
5.13	Coleta de dados de potência ativa do circuito dos aerotermos, a qual compreende o período de 14/05/2021 até 23/06/2021. Fonte: Autoria própria. . .	59
5.14	Histórico de temperaturas na cidade de Bragança, Portugal, no mês de junho de 2021 [35]	60
5.15	Histórico de temperaturas na cidade de Bragança, Portugal, no mês de maio de 2021 [35]	61

Siglas

ABD Análise de big data. 5, 13

GEE Gases de efeito estufa. 11

HVAC Heating, Ventilation and Air Conditioning. 12

IoT Internet da Coisas. 5–8, 10, 11, 13, 24, 66

IP Internet Protocol. 35

IPB Instituto Politécnico de Bragança. i

MA Manufatura aditiva. 5

RA Realidade aumentada. 5

RV Realidade virtual. 5

SFC Sistemas físicos cibernéticos. 5

UTFPR Universidade Tecnológica Federal do Paraná. i

Capítulo 1

Introdução

Com o constante avanço tecnológico presente nas indústrias, onde sempre se busca melhores resultados e formas de melhorar a produção, analisar os equipamentos com o intuito de entender seu funcionamento vem se tornando cada vez mais necessário. Este tipo de estudo é um dos princípios da Indústria 4.0, onde se trata da inserção de sensores e compartilhamento de dados entre equipamentos, de maneira remota e em tempo real.

O monitoramento energético é um dos componentes da Indústria 4.0. Tem como objetivo realizar a coleta de dados energéticos do equipamento e realizar a conexão com outro equipamento onde possa enviar os dados coletados. Este equipamento receberá esses dados em tempo real e assim estes podem ser visualizados e tratados da maneira que o usuário desejar.

Neste contexto, foi realizada a instalação de um sistema de monitoramento energético no circuito de climatização da empresta Catraport, situada na cidade de Bragança (Portugal), que produz componentes para a indústria automotiva por meio de máquinas de estampar. A empresa visualizou a necessidade de monitorar seus equipamentos elétricos na tentativa de encontrar padrões de funcionamentos que façam com que seja possível reduzir manutenções e consumo energético, acarretando em uma diminuição de custos de funcionamento, sendo este o escopo do projeto.

1.1 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é a instalação de um sistema de monitoramento energético no circuito de climatização da empresa Catraport, fazendo com que este consiga coletar os dados corretamente, criar formas de visualização para o usuário e também validar estes dados utilizando padrões estatísticos. O funcionamento correto deste sistema busca trazer a possibilidade de entendimento das máquinas, para que seja possível prever possíveis comportamentos e até mesmo redução do seu consumo energético.

Sendo este o objetivo geral do trabalho, o problema será dividido nas seguintes atribuições específicas:

- Estudar o funcionamento das máquinas do sistema de climatização da empresa.
- Entendimento do funcionamento dos sensores e equipamentos do sistema de monitoramento energético.
- Instalação do sistema de monitoramento energético na fábrica.
- Monitoramento de forma remota e em tempo real do sistema.
- Estudar os comportamentos das máquinas monitoradas e atribuir padrões estatísticos a este.
- Através dos padrões estatísticos entender o funcionamento das máquinas e prever comportamentos futuros.

1.2 Contribuição do trabalho

Este trabalho contribuiu para criação o sistema de monitoramento energético no circuito de climatização da empresa Catraport. Este trás a possibilidade do usuário realizar o estudo de seus equipamentos elétricos, tanto quanto consumo como dados mais específicos, como potência reativa.

Realizar o entendimento dos equipamentos elétricos é de suma importância, pois diferente de equipamentos mecânicos, os equipamentos elétricos não possuem suas características de funcionamento a olho nu. Com deste sistema implantado foi possível realizar o estudo destes equipamentos da climatização, através do entendimento e comparações dos dados elétricos, trazendo informações importantes ao usuário, sendo elas: potência ativa, potência reativa, potência aparente, fator de potência e corrente.

1.3 Estrutura do documento

Após a breve contextualização presente neste capítulo, o Capítulo 2 compreende o estado da arte, onde é descrito conceitos e tecnologias relevantes na área. O Capítulo 3 apresenta a descrição detalhada do sistema de monitoramento energético, descrevendo cada um dos componentes presentes no trabalho. O Capítulo 4 busca descrever o funcionamento detalhado e o que é esperado do sistema de monitoramento energético durante os dias que esteve ativo na empresa. Capítulo 5 é voltado para a validação do funcionamento do sistema de monitoramento energético, buscando validar se realmente atingiu o objetivo. O capítulo 6 é voltado para a conclusão e exposição de trabalhos futuros.

Capítulo 2

Estado da arte

Este capítulo apresenta o referencial teórico necessário para contextualizar o uso de equipamentos de monitoramento energético e sensores com fins de coleta e análise de dados, e baseado no caso específico, servir para um maior entendimento do funcionamento dos equipamentos monitorados.

2.1 Indústria 4.0

A Quarta revolução Industrial é a primeira revolução que não está relacionada a produção de novas tecnologias em ambiente industrial, sendo esta a transformação digital dos processos fabris. É um conceito que nivela a individualização e a virtualização em diferentes tecnologias[1].

Indústria 4.0 é um conceito que visa integrar as partes físicas do processo de fabricação (ou seja, máquinas complexas, vários dispositivos e sensores) [2] e partes cibernéticas (ou seja, software avançado), via redes e conduzido por categorias de tecnologia da Indústria 4.0 usado para previsão, controle, manutenção e integração de processos de manufatura, onde essas categorias de tecnologia são: sistemas físicos cibernéticos (SFC), Internet das Coisas (IoT), análise de big data (ABD), armazenamento em nuvem, realidade aumentada e virtual (RA/ RV), robótica, segurança cibernética, tecnologias de web semântica e manufatura aditiva (MA) [3].

Segundo [4], os principais objetivos da Indústria 4.0 são:

- Permitir integração entre organizações
- Eficiência
- Integrar o mundo real e o digital
- Garantir segurança operacional, privacidade de dados e segurança de TI
- Flexibilidade
- Treinamento

Os benefícios da Indústria 4.0 são tornar a fabricação mais rápida, eficiente e adaptável ao cliente. No entanto, também o alerta é para controlar a segurança de todos os sistemas e dados disponíveis, garantindo que nada vazze ou seja invadido.

Além desses princípios e objetivos, alguns conceitos fundamentais em uma ampla gama referem-se à Indústria 4.0. São fábricas inteligentes, auto-organização, adaptação às necessidades humanas e responsabilidade social corporativa [5].

A Figura 2.1 apresenta os princípios da Indústria 4.0, os quais possuem conexão mútua entre si, demonstrando a integração esperada trazida pela Indústria 4.0.

2.2 Internet das Coisas

A Internet das Coisas (IoT) estabelece conectividade em rede para objetos cotidianos no mundo físico. Todas as entidades físicas na Terra (por exemplo, bens, edifícios, eletrodomésticos, máquinas, veículos, plantas, animais e seres humanos) são as "Coisas" em IoT. O IoT também oferece recursos de feedback em tempo real para os utilitários que funcionam para melhor servir os clientes por meio de funcionalidades aprimoradas de monitoramento e controle [7].

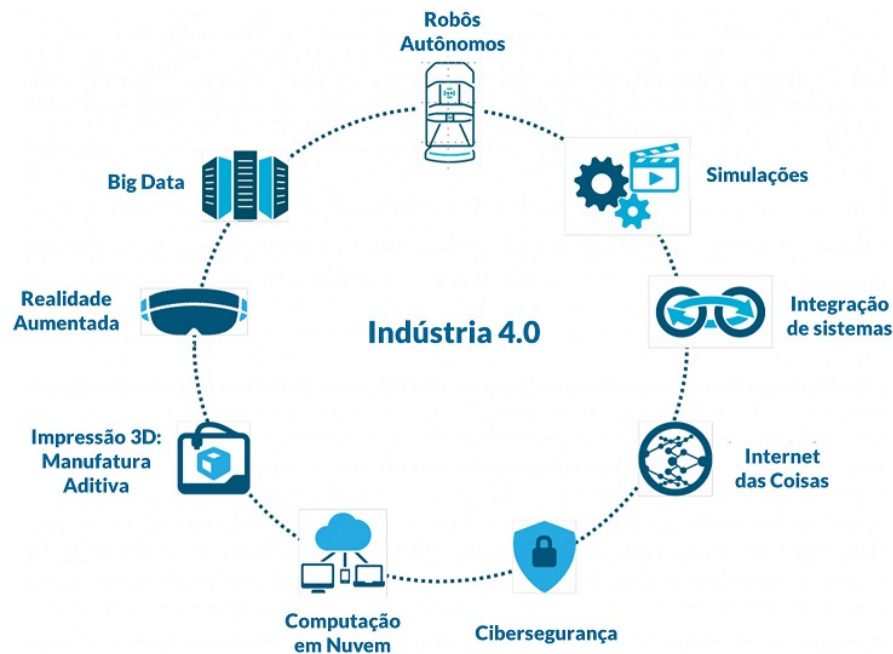


Figura 2.1: Princípios da Indústria 4.0 [6]

Claramente, a Internet é uma das criações mais importantes e poderosas de toda a história da humanidade e agora com o conceito de IoT, a internet se torna mais favorável para ter uma vida inteligente em vários aspectos [8].

O crescimento econômico de serviços baseados em IoT também é considerável para empresas. Aplicações de saúde e manufatura são projetadas para formar o maior impacto econômico. Aplicativos de saúde e serviços baseados em IoT relacionados, como saúde móvel (m-Health) e tele-atendimento que permitem o bem-estar médico, prevenção, diagnóstico, tratamento e serviços de monitoramento a serem prestados de forma eficiente por meio de mídia eletrônica devem criar cerca de US \$ 1,1 a US \$ 2,5 trilhões em crescimento anual da economia global até 2025. Estima-se que a IoT esteja na faixa de US\$ 2,7 trilhões a US\$ 6,2 trilhões até 2025 [9].

A interconexão dos equipamentos IoT, tem fomentado muito o crescimento de aplicações com seu uso, seja em automação industrial, automação residencial (Smart buildings), redes elétricas (Smart Grid) e outros. Estes equipamentos trabalham coletando dados, sejam eles os mais diversos possíveis, para que possam ser analisados pelo usuário ou até

mesmo por outro equipamento, criando assim uma possibilidade de tomada de decisão e atuação no sistema ao qual estão inseridos [10].

Segundo [8], a IoT possui uma estrutura dividida em 6 elementos, sendo eles:

- Identificação: Fase crucial para identificar o serviço e sua demanda;
- Sensorização: Reunião de dados relacionados entre si na rede e enviá-los para uma database ou nuvem;
- Comunicação: Conexão entre objetos heterogêneos para juntos fornecerem serviços inteligentes e específicos;
- Computação: Sendo este elemento o cérebro do IoT, onde se encontra toda capacidade computacional e de processamento, onde um exemplo pode ser um microcontrolador;
- Serviços: coletam e resumem medições sensoriais brutas que precisam ser processados e relatados ao aplicativo IoT;
- Semântica: Refere-se a capacidade de extrair conhecimento de forma inteligente por diferentes máquinas para fornecer os serviços necessários.

Além da interconexão entre dispositivos, o acesso aos dados em tempo real torna o uso do IoT mais satisfatório, minimizando bruscamente o tempo necessário para encontrar padrões e realização de estudos no sistema, os quais trazem consigo a chance de minimizar possíveis problemas ou falhas, além de trazer melhorias significativas.

A Figura 2.2 demonstra a relação mútua que a Internet das Coisas deseja estabelecer com o mundo físico, realizando a conexão com a internet.



Figura 2.2: Internet das Coisas [7].

2.3 Monitoramento energético

Segundo [11], a demanda mundial por eletricidade obviamente continuará a crescer. A maior parte da eletricidade gerada hoje usa combustíveis fósseis não renováveis. O problema de energia é duplo: primeiro, a fonte limitada de combustíveis fósseis e, segundo, a geração de poluição durante a produção de eletricidade a partir de combustíveis fósseis. A energia renovável é o melhor remédio para este problema, mas é ainda subdesenvolvido e atualmente muito caro. Até fontes alternativas e confiáveis de energia de fontes renováveis são desenvolvidos, uma necessidade imediata de redução de consumo de energia e, posteriormente, poluição associada a ele é imperativo. A eletricidade é uma mercadoria necessária para operar a maioria eletrodomésticos. Ao contrário de outras commodities, a eletricidade não pode ser vista; portanto, o consumidor não tem ideia sobre a quantidade de energia consumida até que ele receba uma mensalidade da conta de eletricidade.

Monitoramento de energia no uso final, a nível de equipamento, permite que o consumidor tenha uma visão profunda sobre seu uso de energia e, portanto, permitir que o operador faça decisões informadas para reduzir os custos operacionais enquanto melhorando os perfis ecológicos do sistema [11].

É possível aumentar a eficiência energética de uma instalação com o monitoramento eficaz do consumo de energia, identificando os picos de energia e suas causas, o uso indevido de energia, equipamentos menos eficientes e defeitos encontrados. É um ferramenta

de informação poderosa ou serviço de energia para um usuário / empresa que deseja analisar e identificar oportunidades de racionalização do consumo de energia [12].

O componente essencial de qualquer sistema de monitoramento de energia é o dispositivo de medição. Para monitorar o consumo de energia usando esses dispositivos de detecção, dois parâmetros críticos devem ser conhecidos; tensão e corrente. Para medir esses parâmetros, diferentes métodos têm sido usados enquanto aplicados a diversos tipos de aparelhos [13].

Em [12], é possível separar o monitoramento energético em dois tipos, sendo eles:

- Monitoramento não-intrusivo: O monitoramento não-intrusivo de cargas requer o desenvolvimento de algoritmos avançados que permitem ao usuário final conhecer o consumo global e desagregado de energia. Isto minimiza a necessidade de instalação de equipamentos de medição, como sensores de corrente e tensão (TC e TT), passando a ser a principal vantagem sobre o monitoramento intrusivo convencional.
- Monitoramento intrusivo: O monitoramento intrusivo abrange os métodos convencionais existentes no mercado. Esta metodologia impulsiona o desenvolvimento tecnológico para o design de novas soluções e equipamentos para garantir o seu pleno funcionamento. Consiste na instalação de medidores, sensores de medição, e equipamentos de controle.

Em seu trabalho [14], desenvolveu um sistema de gestão baseado na Internet das Coisas para melhorar os níveis de gestão de energia e fazer um melhor trabalho na economia de energia. Segundo [14], o sistema de gestão de energia com base na Internet das coisas pode resolver os problemas de coleta, transmitindo e salvando os dados massivos na execução de energia processos usando uma variedade de técnicas, como instrumentos digitais, redes de comunicação, software, base de dados e etc..

Utilizando uma abordagem semelhante, porém com utilização do Raspberry Pi, em seu projeto [15] pesquisou, construiu, testou e implementou um sistema de monitoramento de energia de baixo custo e um sistema de controle usando dispositivos IoT. O objetivo final é observar eficiência energética por meio do monitoramento e controle de aparelhos de

condicionamento de ar e iluminação padrão. Esses dispositivos IoT inteligentes permitem o uso de dados de energia de cada unidade a serem coletados e armazenados em um banco de dados baseado em nuvem que pode ser analisado e relatado para conservação e análise de energia.

2.4 Eficiência energética em sistemas de climatização

As preocupações ambientais e o esgotamento dos combustíveis fósseis estão forçando o desenvolvimento de políticas de redução de gases de efeito estufa (GEE). Energias renováveis, como solar e eólica, estão entre as opções mais frequentemente adotadas [16]. Porém, os combustíveis fósseis correspondem a 80% do total uso de energia em todo o mundo e metade de toda a eletricidade gerada vem de plantas movidas a combustíveis fósseis. Outra política inclui a eficiência energética industrial [16], que é uma grande preocupação, especialmente nos países em desenvolvimento, e é definido como a proporção de saída de serviço de um processo à entrada de energia nesse processo. O objetivo das indústrias pode ser maximizar os resultados úteis ou minimizar as entradas de energia. A eficiência energética pode ser usada, principalmente no nível macro, para analisar a atividade industrial e sua atuação. Os indicadores de eficiência energética podem ser divididos em: termodinâmicos, termofísicos, termoeconômicos e econômico [17].

Iniciativas de eficiência energética permitem que grandes indústrias reduzam seu consumo e melhorar sua produção operacional, melhorando assim seus benefícios. No entanto, os processos industriais são em sua maioria rígidos devido às restrições de produção, o que desencoraja algumas indústrias de adotar essas iniciativas [18].

Um olhar mais atento sobre o consumo mundial de energia por equipamentos de climatização mostra valores perceptíveis: os sistemas de climatização constituem mais de 50% da energia consumida em edifícios nos EUA. Na China, o consumo de energia em edifícios tem aumentado cerca de 10% ao ano nos últimos 20 anos e compreende cerca de 20,7% do uso total de energia nacional no ano de 2014. Na Europa, cerca de 40% do consumo de energia é representado em edifícios comerciais e residenciais [19] [20] [21].

Mais da metade do consumo de energia de edifícios derivados de sistemas de aquecimento, ventilação e condicionamento de ar (HVAC, em Inglês) [22], onde 30% - 40% desse consumo é causado pelos chillers [23]. Por este motivo, o ar condicionado é um fator importante para eficiência energética e economia nas políticas de energia de países [24]. Os sistemas HVAC são compostos por diferentes subsistemas que resfriam ou aquecem edifícios dependendo da região e da época do ano, de forma a oferecer condições adequadas de temperatura e conforto ao ocupantes do edifício.

Vários estudos indicaram que os sistemas de climatização dos edifícios não funcionam como projetado. Um estudo de 60 edifícios comerciais apontou os seguintes problemas encontrados neste sistemas [25]:

- Mais de 50% sofreram de problemas de controle
- 40% tiveram problemas com os equipamentos
- 33% sofreram com problemas de funcionamento dos sensores

A complexidade de lidar com os elementos de ar condicionado requer sistemas de gestão de energia para edifícios, que coletam dados de diferentes sensores e atuam em dispositivos de controle, sistemas lógicos, atuadores, entre outros. Esses sistemas permitem definir e ajustar as temperaturas do ponto de ajuste do HVAC para as temporadas de inverno e verão, no entanto, não são capazes de usar dados históricos ou externos (como, para por exemplo, dados meteorológicos) para regular de forma otimizada as temperaturas que estes devem oferecer a qualquer momento aos sistemas [26].

Desenvolver os sistemas de climatização com eficiência energética é essencial, tanto para proteger os consumidores do elevado custo de energia elétrica, quanto para proteger o meio ambiente dos impactos adversos das emissões de gases de efeito estufa causados pelo uso de aparelhos elétricos com baixo consumo de energia. Com rápidas mudanças na ciência e tecnologia hoje, existem vários métodos que podem ser usados para obter sistemas de climatização com eficiência energética. A fim de desenvolver sistemas eficientes, no

entanto, uma compreensão clara de condições do conforto de construções é necessária [27].

Em seu trabalho [28], construiu um sistema de controle automático através da corrente de ares-condicionados, ventiladores e dispositivos de aquecimento sem ter que comprar um novo sistema de climatização. Além disso, sugeriu um sistema de ar condicionado inteligente baseado em IoT e ABD que permitiu a comunicação entre smartphones e sensores que forneceram ao usuário serviços personalizados.

Capítulo 3

Descrição do caso de estudo

Devido ao alto consumo de alguns equipamentos no circuito de climatização da empresa Catraport, os quais ainda possuem controle totalmente manual, foi realizado a implantação de um sistema de monitoramento energético. Este sistema de monitoramento energético possui como principal característica a utilização de tecnologias que atendem as principais características do conceito de Internet das Coisas.

Através da implantação deste sistema de monitoramento, pretende-se encontrar padrões de funcionamento e também prever comportamentos destes equipamentos, trazendo assim vantagens para utilização dos mesmos, como redução do consumo de energia e também aumento de vida útil.

3.1 Equipamentos monitorados

O circuito de climatização da empresa Catraport conta com 21 equipamentos no total, sendo eles: 6 cortinas de ar, 6 aerotermos e 9 aeroventiladores. Cada tipo de equipamento possui uma funcionalidade e propósito de uso diferente dos demais. O uso desses equipamentos servem exclusivamente para manter a temperatura ambiente dentro da fábrica da empresa agradável para seus colaboradores.

As cortinas, Figura 3.1, são equipamentos que trabalham instalados em cima das saídas da fábrica da empresa, as quais tem a função de criar uma cortina de ar quando as

saídas são abertas para movimentação dos colaboradores. Isso faz com que seja reduzida a troca de temperatura entre o interior da fábrica e o ambiente fora dela. Em dias onde a temperatura ambiente fora da fábrica está agradável as cortinas trabalham pouco, porém em épocas de inverno ou verão rigorosos elas são mais acionadas.

Esses equipamentos operam de forma totalmente automática, os quais possuem um termostato instalado que faz a coleta da temperatura dentro da fábrica e criam uma cortina que minimiza a troca de calor. Seu consumo de energia elétrica é baixo e não linear, devido ao fato de somente funcionar em eventos específicos.

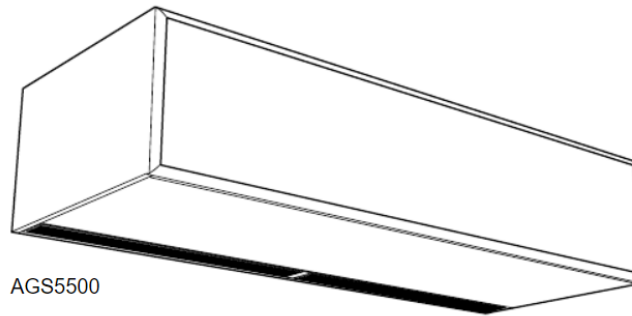


Figura 3.1: Imagem do equipamento Cortina de ar da marca Frico, modelo AGS5500, que se encontra instalado na empresa Catraport. [29]

Os aeroventiladores, Figura 3.2, são equipamentos que funcionam de maneira mais convencional que os demais. Assim como um ventilador residencial, eles tem a função de realizar a circulação do ar com o intuito de deixar o ambiente mais agradável. Porém, esses aeroventiladores também possuem um termostato em sua estrutura que faz a coleta da diferença da temperatura entre a parte inferior e superior da fábrica e quando existe uma distância grande entre esses valores os aeroventiladores são acionados.

Assim como as cortinas, esses equipamentos operam de forma automática, assim só são acionados em eventos especiais. Seu consumo de energia é baixo e também não é linear, mas são facilmente notados na análise dos dados coletados, pois passam a maior parte do tempo desligados.

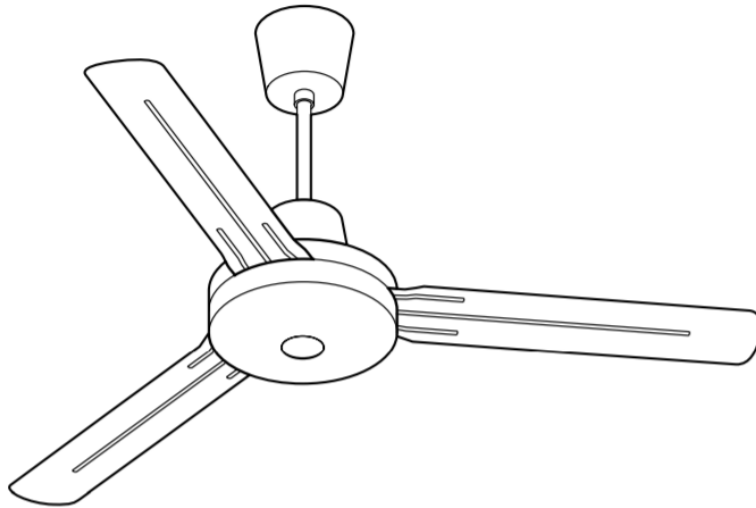


Figura 3.2: Imagem do equipamento aeroventilador da marca Frico, modelo IP20/55, que se encontra instalado na empresa Catraport. [29]

Os equipamentos que possuem o funcionamento mais complexo e atuam de forma contínua na climatização da fábrica da Catraport são os aerotermos, Figura 3.3. Esses equipamentos podem ser comparados com os convencionais ares-condicionados, pois tem funcionamento muito parecido, atuando através da passagem do ar pela serpentina do evaporador que por contato sofre queda ou aumento de temperatura, dependendo do ciclo utilizado, baixando a umidade relativa do ar. Os aerotermos são os equipamentos mais potentes e responsáveis pela temperatura dentro do ambiente fabril, os quais atuam praticamente a todo momento com o intuito de manter o ambiente favorável aos colaboradores.

A principal diferença dos aerotermos para todos os outros equipamentos do circuito de climatização é seu funcionamento totalmente manual, onde o colaborador pode aumentar ou reduzir a temperatura de operação conforme sua necessidade. Essa capacidade de alteração manual é importante para este projeto devido ao fato de ser possível encontrar padrões de funcionamento no equipamento e realizar alterações, já que o mesmo não possui um controle de fábrica.

Além de possuir a capacidade de alteração manual de temperatura, os aerotermos são os equipamentos responsáveis pelo maior consumo de energia elétrica do circuito de climatização. Isso se dá pelo fato de serem equipamentos de alta potência e necessidade de uso elevado, devido a cidade onde a fábrica se situa ser uma cidade com um clima muito característico, com poucos dias no ano de temperaturas amenas, sendo a maioria deles no extremos, muito frio ou muito calor.

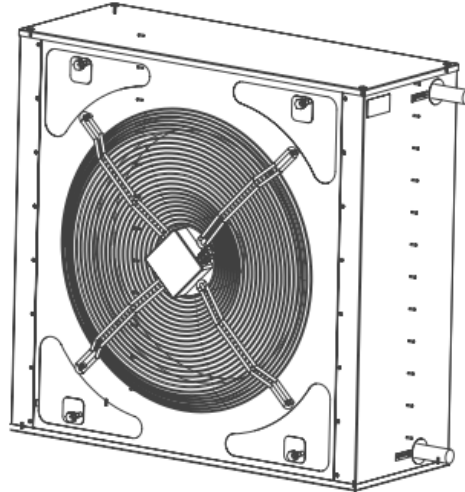


Figura 3.3: Imagem do equipamento aerotermo da marca Frico, modelo SWS22, que se encontra instalado na empresa Catraport [29].

Para a empresa, estudar o funcionamento destes equipamentos é o mais importante deste projeto. Os aerotermos são totalmente vinculados a máquina que mais consome energia na fábrica, o chiller. O chiller é responsável pelo aquecimento ou resfriamento de água que é utilizado nas máquinas na linha de produção, além de ser responsável por enviar essa água aquecida ou resfriada aos aerotermos. Reduzir o consumo de energia desta máquina traria grandes impactos positivos a economia da empresa.

3.2 IoTaWatt

O equipamento usado para o monitoramento e coleta de dados do sistema de climatização da empresa Catraport foi o IoTaWatt. Este equipamento trata-se de um monitorador de energia que possui como características principais a capacidade de coletar e armazenar de dados de qualquer sistema energético. Além dessa capacidade, este aparelho possui um endereço Web local onde é possível realizar a visualização dos dados em tempo real e

também criar gráficos em dispositivos como computadores, tablet's e smartphones.

O IoTaWatt possui 14 entradas, as quais são compostas cada um delas por um transformador de corrente, sendo esses os sensores utilizados para captação de dados do sistema no qual o equipamento está inserido. As dimensões desses transformadores de corrente dependem de onde serão utilizados, necessitando assim saber os parâmetros elétricos, como corrente de carga, de onde será feita a instalação para um dimensionamento correto dos sensores.

O monitorador também é composto por um transformador de potência onde o mesmo converte a tensão de alimentação, que depende da região onde está instalado, em um valor padrão, fazendo com que o IoTaWatt tenha capacidade de realizar a leitura correta da tensão e frequência da rede que alimenta o sistema.

A escolha desse equipamento para realização da coleta e armazenamento de dados se deu principalmente pelo fato dele possuir conexão Wi-Fi, o que possibilita a configuração e visualização de dados em tempo real, desde que esteja conectado em mesma rede. Outro fator importante foi a conexão prévia que este equipamento possui com o InfluxDB, base de dados utilizada para retenção dos dados coletados.

A Figura 3.4 mostra como é o aparelho utilizado para realizar o monitoramento energético, o IoTaWatt.



Figura 3.4: Exemplo de um equipamento IoTaWatt, semelhante ao utilizado no projeto.[30]

A interface que é utilizada para configuração do equipamento IoTaWatt, através de um browser na internet, pode ser observada na Figura 3.5. Nota-se a possibilidade de selecionar o tamanho de cada transformador de corrente a ser utilizado e nomeá-lo da forma que o usuário desejar.

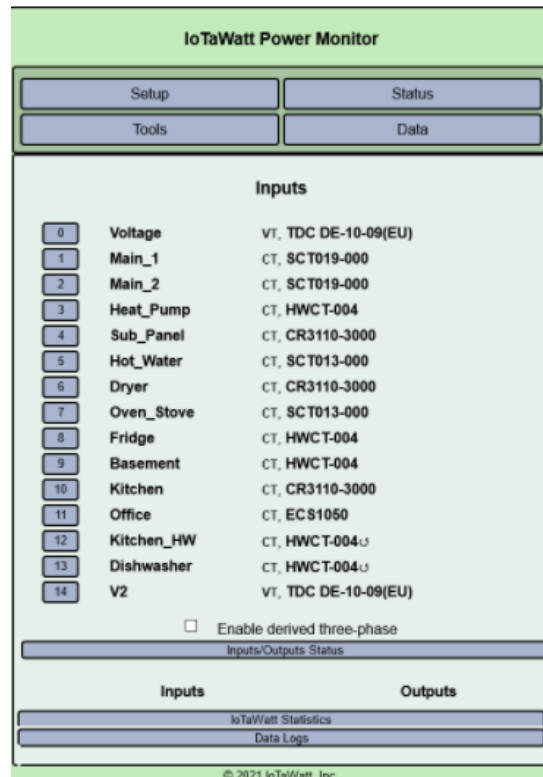


Figura 3.5: Interface de configuração do equipamento IoTaWatt.[30]

A variedade de dados elétricos que o IoTaWatt coleta de um sistema o fez interessante para a sua inserção neste projeto, podendo assim realizar um estudo mais amplo do que se fosse feito só analisando o consumo em Watts, por exemplo. As grandezas coletadas do circuito são:

- Potência Aparente (Volt-Ampere);
- Potência Reativa (VAr);
- Potência Ativa (Watts)

- Fator de Potência;
- Corrente (A);
- Frequência da Alimentação (Hz);
- Tensão da alimentação (Volts);

3.3 InfluxDB

Para realização do armazenamento dos dados coletados pelo IoTaWatt, foi necessário a escolha de uma base de dados. Como o aparelho IoTaWatt já possuía plataforma em seu software que realiza a conexão direta com uma base de dados no InfluxDB, foi optado por sua utilização, não necessitando de uma configuração adicional de outro tipo de base de dados.

Uma base de dados é um conjunto de dados interrelacionados, organizados de forma a permitir a recuperação da informação. Armazenadas por meios ópticos ou magnéticos como discos e acessadas local ou remotamente. Permite gerir enormes volumes de dados de modo a facilitar a organização, a manutenção e a pesquisa de dados, bem como outros tipos de operações processados por meios informáticos.

O InfluxDB é uma base de dados que foi construída para coletar, armazenar, processar e visualizar métricas e eventos. A sua utilização é gratuita e pode ser realizada em sistemas operacionais Linux e também em Windows. Como neste projeto o nosso sistema operacional é do tipo Linux, a sua instalação no equipamento foi facilitada e sua utilização também.

A facilidade para coleta desses dados para análise e visualização foi um ponto positivo da utilização do InfluxDB. Com seus comandos já próprios para coleta de dados foi possível desenvolver códigos Python que realizassem a análise dos mesmos. Outra vantagem da utilização deste tipo de base de dados foi a conexão com o software Grafana, que é responsável pela visualização destes.

A base de dados deste projeto foi instalada e modificada em um computador de placa única Raspberry Pi, o qual será apresentado na próxima seção.

3.4 Raspberry Pi

Para instalação, configuração e visualização de uma base de dados com o intuito de trabalhar com os dados coletados pelo IoTaWatt, se faz necessário o uso de uma máquina capaz de processar o InfluxDB, além de necessariamente se encontrar na mesma rede Wi-Fi do IoTaWatt. Neste caso, poderia ser utilizado um computador convencional que iria atender todas as necessidades. Pensando em otimização de espaço e utilização de um sistema mais reduzido possível, foi optado pela utilização de um microcomputador Raspberry Pi.

A Raspberry Pi Foundation é uma instituição de caridade com sede no Reino Unido que trabalha para colocar o poder da computação e da produção digital nas mãos de pessoas em todo o mundo. Tal fundação é responsável pela criação de um computador de placa única e tamanho extremamente reduzido, os quais podem se conectar a mouse, teclado e monitor facilmente. O seu tamanho e sua capacidade de processamento, atendendo a necessidade de utilização foram os principais pontos para a escolha de sua utilização [31].

A Figura 3.6 exemplifica o modelo de Raspberry Pi semelhante ao utilizado neste projeto.

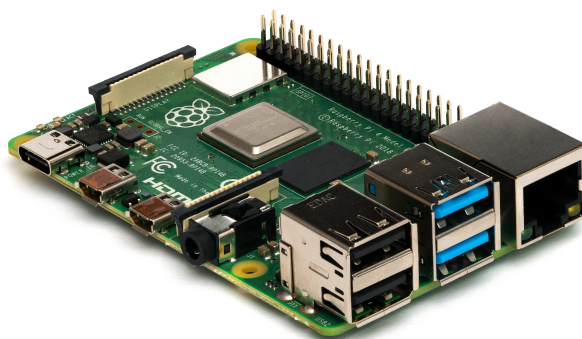


Figura 3.6: Exemplo de um microcomputador Raspberry Pi.[31]

A utilização de uma máquina não só se fez necessária para utilização da base de dados,

mas também de todas as ferramentas que foram utilizadas pelo projeto. Como um dos objetivos deste trabalho é atender os princípios do IoT, a utilização do Raspberry Pi de forma presencial não seria um desses princípios, pois assim seria necessário o deslocamento praticamente que diário a sua instalação. A solução deste problema foi a utilização de uma conexão remota, a qual poderia se dar através de várias formas, mas nesse projeto foi optado pela utilização do software VNC Viewer.

O software VNC Viewer é uma forma de conexão remota, o qual o Raspberry Pi já possui integrado em seu sistema, o que facilita a utilização. Através dele é possível a conexão entre o equipamento que está instalado no local desejado e o seu equipamento, o qual está em sua casa por exemplo, dando total acesso e controle ao usuário, permitindo assim que ele instale programas, configure e utilize a máquina desejada.

3.5 Grafana

Após a coleta de dados, visualizá-los somente na interface do InfluxDB não traz vantagens em termos de análise. Devido essa necessidade de visualização do comportamento dos dados coletados do sistema de climatização da Catraport, se fez necessário a utilização de um software que pudesse construir formas que trouxessem facilidade para o usuário, assim optou-se pelo uso do software Grafana.

O Grafana é um aplicativo web de código aberto e de visualização interativa multi-plataforma. Ele fornece tabelas, gráficos e até mesmo alertas dos dados que estão conectados a ele. Sua utilização é muito comum em casos de banco de dados de séries temporais, pois o mesmo é de fácil utilização, além de possuir extensão gratuita [32].

Nesse projeto a escolha para sua utilização se deu pelo fato de existir conexão praticamente em tempo real com a base de dados, onde foi possível a construção de gráficos e tabelas com precisão. Além da ferramenta de visualização, o Grafana também pode criar alertas ao usuário quando os dados atingirem determinados valores ou condições, isso foi utilizado para validação das Regras de Nelson, as quais serão apresentadas na sequência.

A interface que o usuário tem a possibilidade de criação utilizando o software Grafana

é exemplificada através da Figura 3.7.



Figura 3.7: Exemplo de construção de dashboards para visualização no software Grafana. [32]

3.6 Regras de Nelson

Na tentativa de validação dos dados monitorados através do IoTaWatt, a utilização das Regras de Nelson foi implantada neste projeto. As Regras de Nelson são uma atualização das Western Electric Rules (WECO Rules), que tratam de uma análise da média e desvio padrão dos dados com o intuito de analisar a estabilidade do sistema. Anteriormente as WECO Rules só contavam com quatro regras, porém em 1984 Lloyd S. Nelson as atualizou para um conjunto de oito regras, levando assim seu nome para este novo projeto [33].

O principal objetivo das Regras de Nelson é encontrar padrões de funcionamento no sistema e através da análise da média e desvio padrão, poder prever futuros comportamentos ou até mesmo classificar os comportamentos atuais como esperados ou não. Neste projeto, essas regras foram implantadas em nossa base de dados no InfluxDB através de um código Python, onde este faz a coleta dos dados na base de dados e os analisa na tentativa de validar uma das regras [33].

Devido a grande quantidade de dados em nosso sistema, a necessidade de um alto processamento se faz presente caso fosse necessário a implementação das oito regras para

análise de nossos dados. Como nosso sistema conta com um processamento não muito avançado feito pelo Raspberry Pi, foi necessário a escolha de somente algumas das oito regras para realizar o monitoramento dos dados. Neste caso, optamos pela utilização da regra número um, dois, cinco e seis.

A regra número 1, Figura 3.8, é a regra mais simples do conjunto do ponto de vista analítico. Depois do cálculo móvel da média e do desvio padrão dos dados, que é feito pelo código inserido nos banco de dados, o mesmo analisa se nenhuma amostra ultrapassa o valor de três desvios padrões acima ou abaixo do valor da média móvel. Esta regra tem como objetivo encontrar algum distúrbio muito grosseiro do sistema, indicando que algo realmente inesperado aconteceu naquele instante.

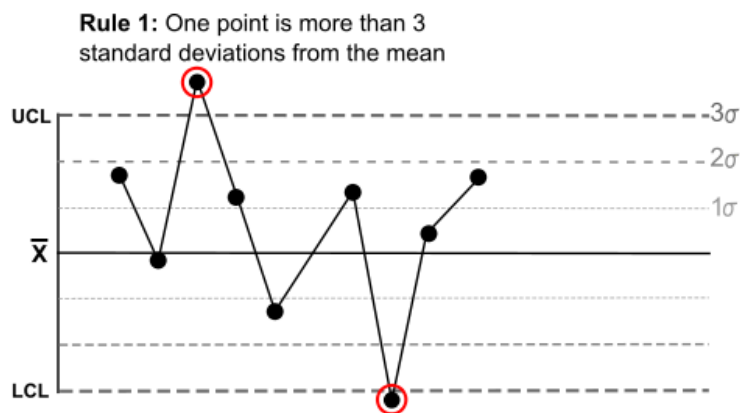


Figura 3.8: Regra número 1 das Regras de Nelson. [33]

A regra número 2, Figura 3.9, já possui uma análise mais contínua do sistema do que a regra número 1 propriamente. Os dados coletados da base de dados são agrupados em grupos de 9 e analisados se todos estes valores estão do mesmo lado da média móvel, sejam eles acima da média ou abaixo. Após este agrupamento, se caso a regra seja atendida, pode-se concluir que o sistema tende a apresentar um comportamento contínuo, tendendo a se manter daquela forma.

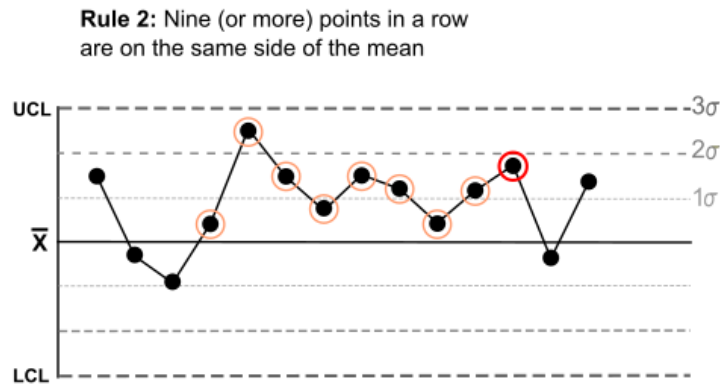


Figura 3.9: Regra número 2 das Regras de Nelson. [33]

Seguindo a implementação das regras, a número 5 e 6 apresentam uma análise parecida porém contam com objetivos diferentes. A regra de número 5, Figura 3.10, tenta encontrar dois valores maiores que 2 desvios padrões a partir da média móvel, seja acima ou abaixo. Através da validação desta regra conclui-se que o sistema pode ter uma média chance de vir a ter comportamentos fora do controle, como apontados pela regra número 1, por exemplo.

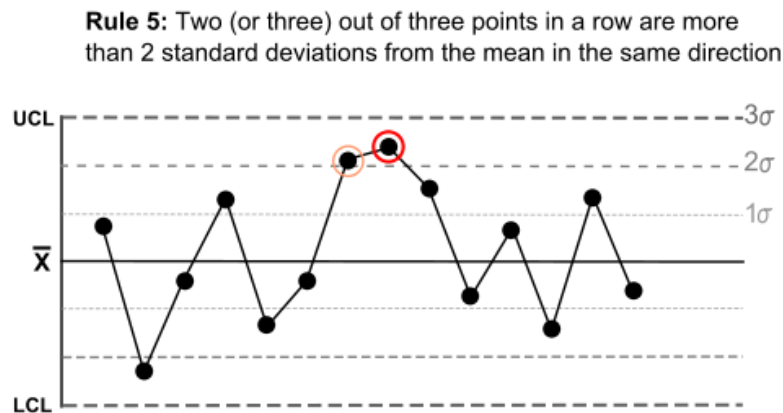


Figura 3.10: Regra número 5 das Regras de Nelson.[33]

Já a regra de número 6, Figura 3.11, analisa um grupo de quatro dados na tentativa

de comprovar se eles se encontram um ou mais desvios padrões acima ou abaixo da média. O tipo de análise se assemelha a regra número 5, porém o objetivo desta regra é apontar grandes chances de comportamento do sistema ficar ligeiramente fora do controle.

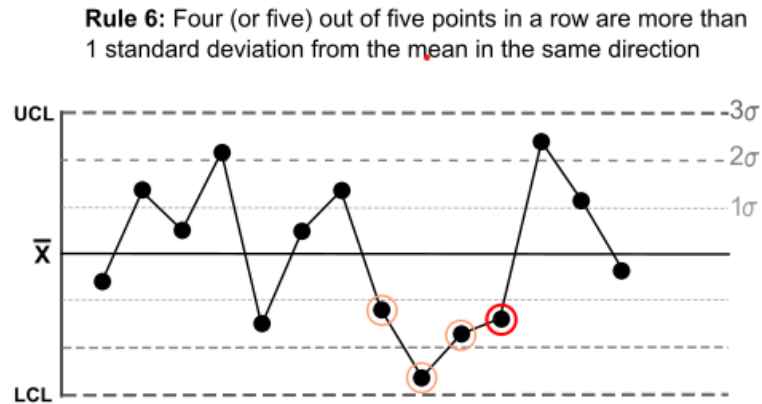


Figura 3.11: Regra número 6 das Regras de Nelson.[33]

A escolha destas quatro regras se dão pelo fato de sua complementação entre si. A regra 5 e 6 são tentativas de prever a validação da regra 1, a qual aponta um comportamento totalmente inesperado do sistema. A regra número dois é importante no sentido de prever um comportamento contínuo do sistema, onde pode se prever que o sistema não sofrerá futuras alterações. Como estamos realizando o monitoramento de um sistema energético, se considerou interessante o uso destas regras pelo fato da prevenção de comportamentos muito bruscos, os quais se tratando de equipamentos elétricos, normalmente levam a danos nos equipamentos.

3.7 Sensor de temperatura

Além da validação dos dados coletados feita pelas Regras de Nelson, a Catraport sugeriu através de um dos seus colaboradores a instalação de sensores de temperatura espalhados pela fábrica. A sugestão foi feita pelo fato de estarmos analisando um sistema de climatização, onde o mesmo ainda possui equipamentos que funcionam totalmente através de

intervenções humanas, como os aerotermos.

O sensor de temperatura que foi escolhido para captação dos dados neste caso foi o BME280. O BME280 é um sensor de umidade, temperatura ambiente e pressão atmosférica, onde o seu tamanho e o baixo gasto de energia são os pontos principais de design. Além dos pontos de design, sua precisão também é um dos motivos para sua utilização, atendendo a necessidade para esse caso específico [34].

A conexão do sensor com a base de dados se fez necessária para que fosse possível a criação de gráficos da temperatura coletada na fábrica. O sensor não possui nenhuma ferramenta própria para realizar essa conexão, então foi desenvolvido um código aberto Arduino e carregado em um ESP8266, que nada mais é do que um microcontrolador, o qual faz a conexão do sensor com a base de dados via Wi-Fi. Os dados de temperatura coletados pelo sensor são gravados em uma base de dados do InfluxDB e então transformados em gráficos pelo Grafana.

Na fábrica foram instalados dois sensores BME 280, os quais estão posicionados em locais diferentes para realizar a captação dos dados de temperatura. O objetivo de sua instalação se dá no interesse em encontrar padrões de funcionamento nos equipamentos de climatização que são manuais através dos dados de temperatura coletados.

O sensor de temperatura utilizado neste projeto é semelhante ao encontrado na Figura 3.12

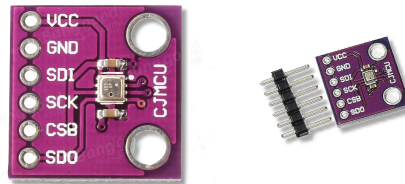


Figura 3.12: Exemplo de um sensor BME280 semelhante ao utilizado no projeto. [34]

Capítulo 4

Arquitetura do sistema

O sistema de monitoramento energético deste projeto encontra-se instalado na empresa Catraport, situada na cidade de Bragança em Portugal. Importante ressaltar que todos os equipamentos foram instalados por colaboradores especializados.

É muito importante para um sistema que haja uma arquitetura organizada de seu funcionamento, isso faz com que problemas sejam reduzidos e caso aconteçam são facilmente encontrados pelo usuário. Neste capítulo será tratado a arquitetura do sistema, primeiramente de uma forma geral, passando para os passos mais específicos.

4.1 Arquitetura geral

Para entendimento do funcionamento do sistema de monitoramento do circuito de climatização na empresa Catraport, foi desenvolvido um fluxograma que demonstra os passos e como se realizam a conexão entre os equipamentos, Figura 4.1.

A arquitetura do sistema inicia-se nos equipamentos de climatização. São eles que dão motivo e dados para este projeto funcionar. O equipamento IoTaWatt é o responsável pela coleta de dados neste sistema através de seus sensores, que são transformadores de corrente, os quais enviam os dados elétricos coletados para o próprio equipamento, que armazena estes dados em sua memória interna própria.

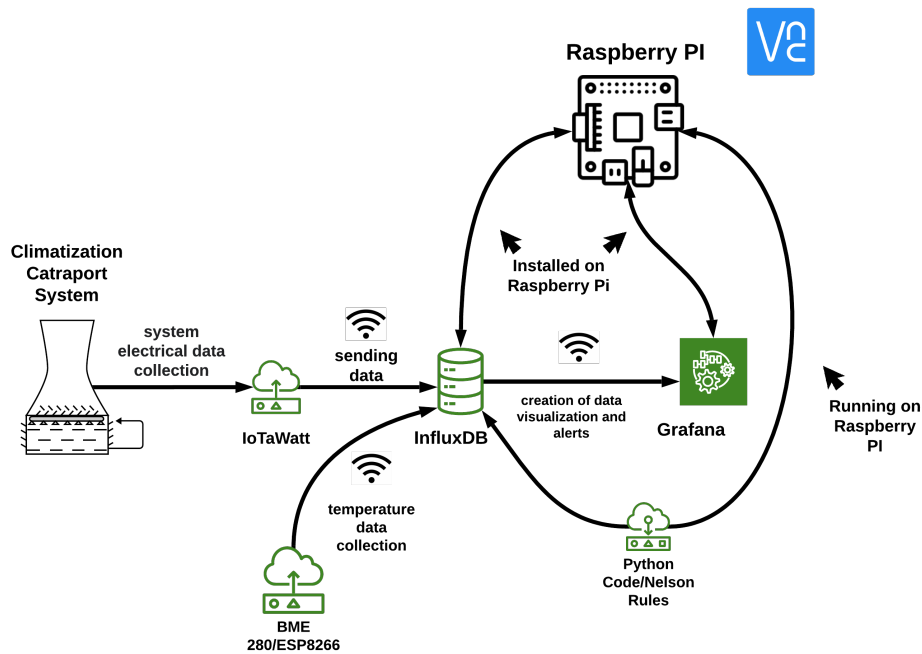


Figura 4.1: Fluxograma do funcionamento do sistema de monitoramento instalado na empresa Catraport. Fonte: Autoria própria.

O IoTaWatt possui uma estrutura de visualização destes dados, a qual é de certa forma limitada, pois apenas se realiza a visualização dos dados elétricos coletados em função do tempo, não sendo possível criar formas diversas de tratamento dos dados. Na tentativa de melhorar esta visualização foi feita a conexão do IoTaWatt com a base de dados InfluxDB, a qual é facilitada devido a existência da configuração desta conexão estar presente no software do equipamento, a qual é feita de forma Wi-Fi, ou seja, o IoTaWatt deve estar conectado na mesma rede que a base de dados.

A base de dados necessita estar instalada em um computador para que possa armazenar os dados e trabalhar neles. Neste caso o InfluxDB está instalado no microcomputador Raspberry Pi. A escolha do Raspberry Pi para este caso se dá pelo fato de ser um equipamento minimalista e eficiente para estes casos.

Em nosso sistema o Raspberry Pi funciona como uma espécie de estação central. Este equipamento estava instalado na sala de comando da manutenção da empresa, situada aproximadamente 5 metros em linha reta do IoTaWatt e 20 metros em linha reta dos

sensores de temperatura. Nele também está instalado o Grafana, software que é utilizado para criação das formas visuais dos dados, como gráficos e tabelas. Também é no Grafana que realizamos a visualização da validação das Regras de Nelson.

Devido aos aerotermos do sistema de climatização serem operados de forma manual, foram instalados dois sensores de temperatura dentro da fábrica. A instalação desses sensores possui a intenção de coletar dados de temperatura interna, em Celsius, e comparar esses dados com os dados de temperatura externa. Essa comparação é feita para encontrar padrões de funcionamento desses equipamentos baseados em dados de temperatura, já que os aerotermos não possuem sensores próprios.

Esses sensores de temperatura são do tipo BME280, os quais estão conectados a um microcontrolador do tipo ESP8266 por meio de uma protoboard. A conexão do microcontrolador e da base de dados também se dá por Wi-Fi. Os sensores estão posicionados próximos aos aerotermos, principais equipamentos do sistema de climatização. A frequência de envio de dados coletados de temperatura interna da fábrica para a base de dados é de 5 minutos. Este valor é utilizado levando em consideração o fato de a temperatura não variar bruscamente em pequenos intervalos de tempo.

Para validação dos dados monitorados pelo IoTaWatt, foi desenvolvido um código na linguagem Python, o qual tem como objetivo testar quatro das oito Regras de Nelson nos dados coletados. Este código está correndo no Terminal do Raspberry Pi, em tempo real, onde ele analisa os dados coletados pelo IoTaWatt que estão presentes na base de dados do InfluxDB. Após essa análise, é mostrado no Grafana caso haja algum ponto que atenda alguma das regras.

4.2 Instalação do IoTaWatt

O IoTaWatt é um equipamento de monitoramento energético que utiliza transformadores de corrente para coleta dos dados, estes necessitam estarem conectados aos cabos de alimentação de cada circuito. Portanto, estes transformadores foram grampeados aos cabos de alimentação de todos os circuitos da climatização da empresa.

A Figura 4.2 representa o diagrama unifilar presente no circuito de climatização da empresa Catraport. Através dessa figura é possível observar a divisão dos circuitos conforme os equipamentos.

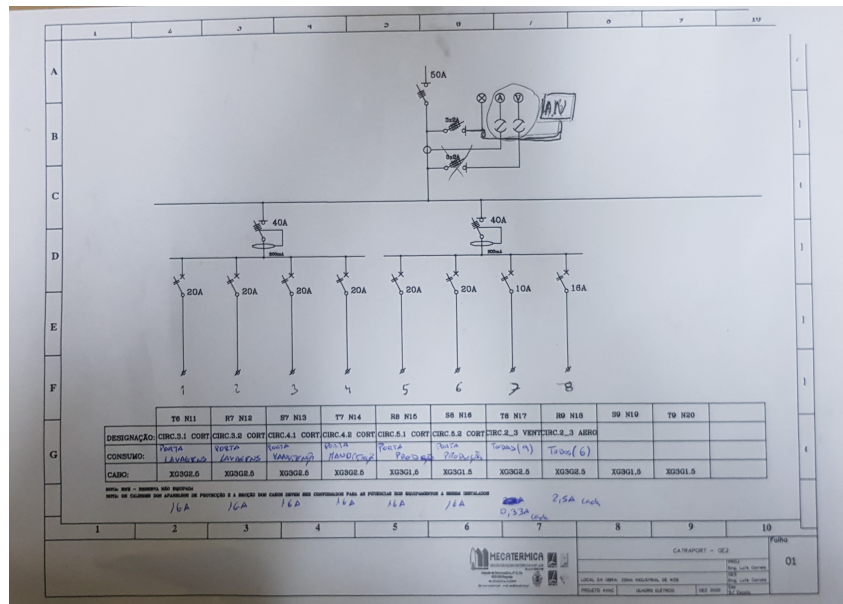


Figura 4.2: Diagrama unifilar do circuito de climatização da empresa Catraport. Fonte: Autoria própria.

Como os transformadores de corrente possuem uma corrente limiar que determina o máximo que é possível ser magnetizado e assim coletar os dados, foi necessário dimensioná-los para que atendessem esse valor. Visualizando o diagrama unifilar do quadro geral de climatização é possível determinar quais devem ser os tipos de transformadores, através da corrente dos disjuntores nele sinalizados.

Foram instalados 11 transformadores de corrente, Figura 4.3, no quadro geral de climatização, um para cada divisão de circuito, os quais são divididos em:

- Circuito Quadro Geral de Climatização: compreende todos os equipamentos de climatização, protegidos por um disjuntor de 50A. Neste circuito foi utilizado um transformador de corrente de 100A, a escolha foi feita por disponibilidade do material.
- Circuito Geral de 1 a 4: compreende todos os equipamentos que estão dentro dos

circuitos de 1 a 4, protegidos por um disjuntor de 40A. Neste circuito foi utilizado um transformador de corrente de 50A.

- Circuito Geral de 5 a 8: compreende todos os equipamentos que estão dentro dos circuitos de 5 a 8, protegidos por um disjuntor de 40A. Neste circuito foi utilizado um transformador de corrente de 50A.
- Circuito 1 a 4 : trata-se do monitoramento de quatro cortinas de ar, onde foi instalado um transformador de corrente de 50A para cada circuito;
- Circuito 5 a 8: trata-se no monitoramento de 2 circuitos de cortina de ar, 1 de aerotermos e 1 de aeroventiladores, neste circuito foi instalado transformadores de corrente de 50A para cada circuito.

A instalação do aparelho IoTaWatt no quadro elétrico geral dos equipamentos de climatização pode ser observada na Figura 4.3. É possível perceber os sensores, os quais são transformadores de corrente, grampeados aos fios do quadro, além do aparelho no canto inferior da figura.

4.3 Conexão entre os equipamentos

Este projeto tem como objetivo a utilização dos princípios da Internet das Coisas em seu funcionamento. Um desses princípios é a conexão em tempo real e remota entre os equipamentos que se deseja coletar informações com os equipamentos que fazem a coleta. Para atender essa necessidade é realizado a conexão Wi-Fi entre os dispositivos, sendo essa conexão feita por um rede presente na empresa Catraport, a qual todos estão conectados.

Alguns requisitos para realização do funcionamento devem ser cumpridos, como todos os equipamentos estarem utilizando o mesmo endereço Internet Protocol (IP). O endereço de Internet Protocol (IP) é abreviação de *Internet Protocol*, o qual é o protocolo utilizado pelos equipamentos para se comunicar. Essa comunicação torna possível o envio de dados, como do IoTaWatt para a base de dados que está instalada no Raspberry Pi, por exemplo.

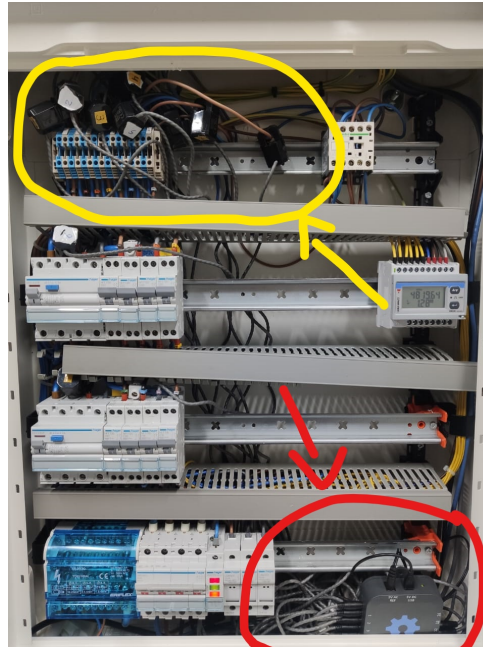


Figura 4.3: Instalação do equipamento IoTaWatt no quadro geral do circuito de climatização. Em amarelo estão sinalizados os transformadores de corrente. Em vermelho temos a sinalização do equipamento IoTaWatt. Fonte: Autoria própria.

Além da necessidade de realizar a conexão entre os equipamentos de forma Wi-Fi, é necessário manter uma conexão remota com o Raspberry Pi para ter total controle do sistema à distância, pois não seria viável toda vez que precisasse trabalhar ou realizar alguma alteração ter que se deslocar até o local de instalação dos equipamentos. Para isso é realizado uma conexão remota utilizando o VNC Server.

O VNC Server é um software de acesso remoto para uso comercial e pessoal. O usuário precisa instalar o software tanto na máquina que deseja ter acesso quanto na máquina que irá controlar, assim a partir do momento que as duas máquinas possuírem o software é possível realizar o controle remoto de uma delas.

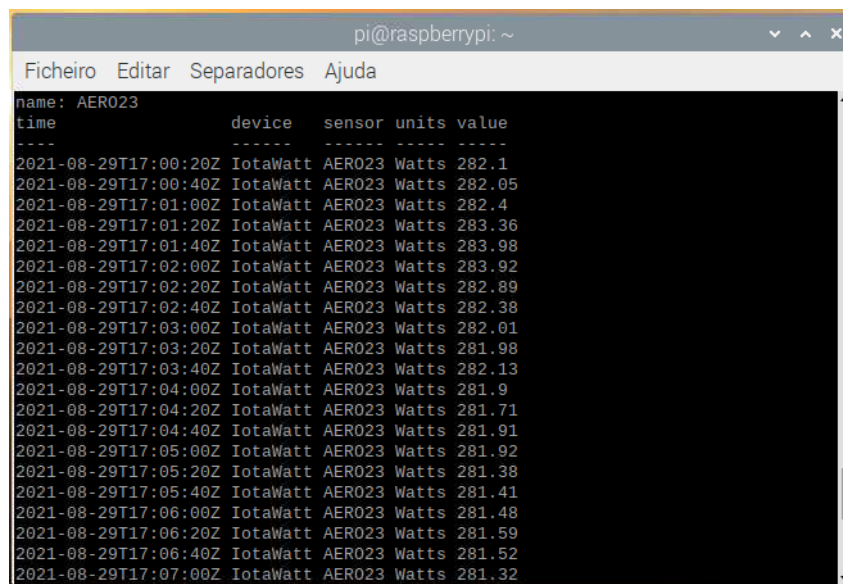
A principal vantagem deste tipo de conexão remota é não ter a necessidade de estar presente no local para controlar os equipamentos. Neste projeto foi muito importante para realizar a conexão com o Raspberry Pi e conseqüentemente com os outros softwares presentes no sistema. O controle de forma remota porém necessita de uma conexão Wi-Fi de qualidade para que possa funcionar corretamente. Este fator foi um impasse em alguns

momentos do projeto, onde a conexão não permitiu um bom desenvolvimento do sistema.

4.4 Consulta e visualização de dados

Embora a consulta de dados diretamente na base de dados não seja um dos pontos principais deste projeto, o InfluxDB possui uma interface bastante subjetiva para seu uso, além de grande quantidade de material em seu site oficial para uso dos comandos da base de dados.

A interface para consulta de dados da base de dados utilizando o terminal do Raspberry Pi pode ser observada na Figura 4.4.



```
pi@raspberrypi: ~
Ficheiro Editar Separadores Ajuda
name: AER023
time           device  sensor  units  value
-----
2021-08-29T17:00:20Z IotaWatt AER023  Watts  282.1
2021-08-29T17:00:40Z IotaWatt AER023  Watts  282.05
2021-08-29T17:01:00Z IotaWatt AER023  Watts  282.4
2021-08-29T17:01:20Z IotaWatt AER023  Watts  283.36
2021-08-29T17:01:40Z IotaWatt AER023  Watts  283.98
2021-08-29T17:02:00Z IotaWatt AER023  Watts  283.92
2021-08-29T17:02:20Z IotaWatt AER023  Watts  282.89
2021-08-29T17:02:40Z IotaWatt AER023  Watts  282.38
2021-08-29T17:03:00Z IotaWatt AER023  Watts  282.01
2021-08-29T17:03:20Z IotaWatt AER023  Watts  281.98
2021-08-29T17:03:40Z IotaWatt AER023  Watts  282.13
2021-08-29T17:04:00Z IotaWatt AER023  Watts  281.9
2021-08-29T17:04:20Z IotaWatt AER023  Watts  281.71
2021-08-29T17:04:40Z IotaWatt AER023  Watts  281.91
2021-08-29T17:05:00Z IotaWatt AER023  Watts  281.92
2021-08-29T17:05:20Z IotaWatt AER023  Watts  281.38
2021-08-29T17:05:40Z IotaWatt AER023  Watts  281.41
2021-08-29T17:06:00Z IotaWatt AER023  Watts  281.48
2021-08-29T17:06:20Z IotaWatt AER023  Watts  281.59
2021-08-29T17:06:40Z IotaWatt AER023  Watts  281.52
2021-08-29T17:07:00Z IotaWatt AER023  Watts  281.32
```

Figura 4.4: Interface da base de dados InfluxDB, a qual está inserida no equipamento Raspberry Pi. Fonte: Autoria própria.

O principal objetivo da consulta e visualização dos dados coletados neste projeto se direciona ao Grafana. Este sendo capaz de criar formas de facilitar a visualização dos dados coletados do circuito de climatização, sendo elas através de gráficos e tabelas, por exemplo.

O Grafana possui uma série de fórmulas matemáticas que trazem ao usuário grandes possibilidades de criação de conteúdo como ele desejar. Neste trabalho o enfoque foi a

criação de gráficos e dashboards que mostrassem médias dos dados elétricos coletados ao longo do tempo. Isso se dá pelo fato da quantidade de dados coletados pelo IoTaWatt, o qual faz essa coleta com temporização de 10 segundos em cada circuito e envia para a base de dados a cada minuto, ou seja, por minuto a base de dados recebe 6 dados diferentes de cada medida para cada circuito da climatização da Catraport.

Um exemplo de interface que pode ser produzida pelo usuário no software Grafana, para visualização dos dados elétricos coletados, é apresentado na Figura 4.5.



Figura 4.5: Interface para visualização dos dados elétricos coletados pelo IoTaWatt feita pelo software Grafana. Fonte: Autoria própria

A conexão Grafana e InfluxDB é feita de maneira Wi-Fi, assim como InfluxDB e IoTaWatt. Caso ocorra uma perda de conexão, o IoTaWatt possui memória interna capaz de guardar os dados para que quando a conexão seja reestabelecida, estes dados sejam enviados para a base de dados. Para que a conexão entre Grafana e InfluxDB funcione, é necessário que seja configurado o Grafana para receber dados do mesmo endereço IP em que a base de dados está instalada. Após realizada a conexão, é possível trabalhar os dados de forma como o usuário desejar, havendo atualizações no Grafana de no mínimo 5 segundos, ou seja, é possível visualizar dados da base de dados no Grafana que foram coletados 5 segundos atrás.

No Grafana também foram criados gráficos para que possa ser feita a visualização dos dados coletados de temperatura pelo sensor BME280. Neste caso foram criados gráficos em função do tempo, onde o sensor capta e envia para a base de dados e estes podem ser visualizados no Grafana.

4.5 Coleta de dados de temperatura

Como os aerotermos do circuito de climatização ainda são máquinas que operam de forma manual, foram instalados sensores de temperatura dentro da fábrica para fazer essa coleta de dados, na tentativa de encontrar padrões de funcionamento através da comparação com o consumo de energia elétrica dos aerotermos.

Uma exemplificação de gráfico que pode ser criado através do Grafana para visualização dos dados de temperatura coletados, em função do tempo, pode ser observado na Figura 4.6.

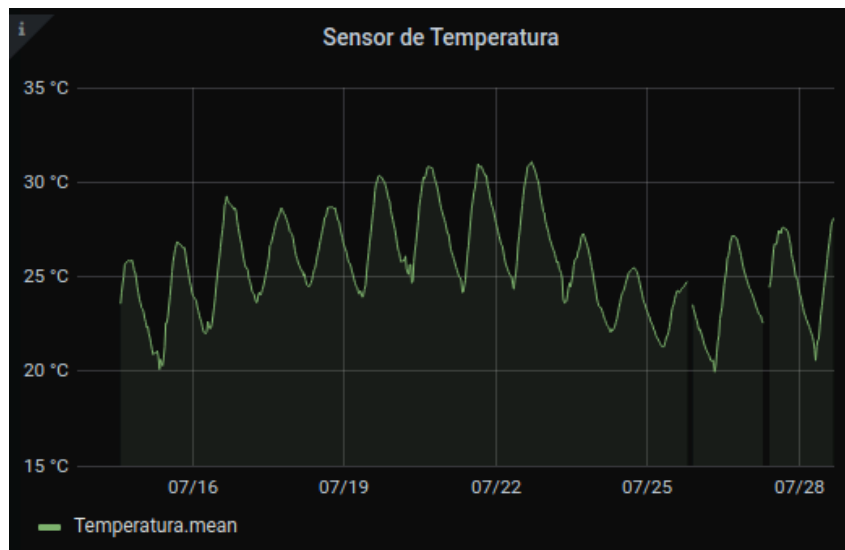


Figura 4.6: Exemplificação da interface de visualização criada no software Grafana para que o usuário consulte os dados de temperatura coletados. Fonte: Autoria própria .

Para realização desta coleta de dados foram utilizados os sensores do tipo BME280. Estes sensores possuem a capacidade de coletar dados de temperatura ambiente e tem um baixo custo de compra. A configuração para funcionamento destes sensores é feita através de um microcontrolador do tipo ESP8266. A instalação do BME280 é feita em uma protoboard, juntamente com o microcontrolador, responsável pela alimentação em 3,3V do sensor.

A instalação de um dos sensores BME280 pode ser observada na Figura 4.7.



Figura 4.7: Local de instalação de um dos sensores de coleta de temperatura na fábrica da Catraport, sinalizado em vermelho. Fonte: Autoria própria .

Dentro do microcontrolador utilizado está inserido um código do tipo Arduino, que tem como objetivo realizar a captação de dados de temperatura do interior da fábrica em um intervalo de 5 minutos. Além da captação, o microcontrolador envia esses dados diretamente para uma base de dados do InfluxDB. Para este envio funcionar corretamente, é necessário que o microcontrolador esteja conectado a mesma rede Wi-Fi que a base de dados, conseguindo assim enviar estes dados para o InfluxDB.

O posicionamento de instalação destes sensores foi feito próximos aos aerotermos para terem uma melhor precisão no momento da coleta dos dados de temperatura.

4.6 Validação utilizando as Regras de Nelson

Somente coletar os dados do sistema sem existir um tipo de estudo por trás disso não traria uma validação concreta ao projeto. Em busca desta validação foram implantadas quatro

das oito Regras de Nelson. A implantação é feita através de um código na linguagem Python, o qual atua analisando os dados presentes na base de dados em um intervalo de 90 segundos. Este intervalo de tempo é escolhido devido a temporização de coleta de dados do IoTaWatt, o qual envia dados para a base de dados de minuto em minuto.

O código em Python tem como objetivo analisar os dados enviados pelo IoTaWatt que já estão presentes da base de dados testando as Regras de Nelson. Isso é feito através de uma leitura desses dados, após essa rotina é feito a validação das regras. Caso seja atendido alguma regra, o ponto que atendeu a regra indicada é escrito novamente na própria base de dados mas em um espaço diferente dos demais dados.

A reescrita dos dados que atendem as Regras de Nelson na base de dados possuem uma grande importância para o projeto. Através da escrita desses dados na base de dados é possível consultar estes pontos que validaram alguma das regras e além disso criar alertas no software Grafana. A criação dos alertas trazem ao usuário a chance de ser informado quando um equipamento está tomando um tipo de comportamento, isso de forma totalmente visual, fazendo com que seja possível tomar alguma atitude antecipadamente ou realizar uma preparação para algum tipo de ocasião.

Os alertas no Grafana foram uma ferramenta desenvolvida especialmente para este caso, pois o software não possui nenhum método já implantado para esta situação específica. Como saída para contornar este problema e conseguir fazer com que o usuário tenha a forma visual de ser alertado quando uma regra é validada, foram desenvolvidos gráficos para cada tipo de regra e cada circuito. Nesses gráficos foram criados regras para que quando um valor seja inserido no gráfico um alerta é disparado. Para atuar desta forma os gráficos estão vinculados à base de dados, mais especificamente aos espaços onde o código Python escreve os dados que atenderam as regras de Nelson.

Capítulo 5

Avaliação do funcionamento do sistema

Neste capítulo será abordado a avaliação do sistema de monitoramento energético na empresa Catraport. Serão apresentados os testes e comparações feitas com os dados coletados, dando ênfase no circuito que contempla os equipamentos aerotermos, pois o mesmo é o maior atuante no consumo de energia elétrica da climatização da empresa.

Será avaliado se o sistema de monitoramento realmente atingiu o objetivo do projeto através de comparações com os dados de temperatura coletados pelos sensores, além dos testes feitos pelas Regras de Nelson na base de dados elétricos coletados pelo IoTaWatt. Os problemas encontrados durante o projeto serão debatidos e possíveis soluções serão argumentadas.

5.1 Funcionamento do sistema de monitoramento

Após a instalação do sistema de monitoramento, foram feitas coletas de dados desde o dia 25 de março de 2021. Desde este dia o IoTaWatt contou com êxito em seu funcionamento e cumpriu corretamente seu papel coletando dados do sistema de climatização.

Foram criados gráficos no Grafana da média dos valores coletados em função do tempo

para monitoramento do circuito de climatização, separados pelos parâmetros que o equipamento é capaz de monitorar. Estes gráficos foram retirados no dia 26 de julho, 123 dias após a instalação.

É importante ressaltar que a média dos valores compreende os valores que estão presentes no intervalo de tempo escolhido pelo usuário, no momento de criação do gráfico no Grafana. Por exemplo, o usuário pode escolher que seja feita a média dos valores coletados em 10 minutos e só assim seja aplicado um ponto ao gráfico.

5.1.1 Análise gráfica

Nos gráficos abaixo está sendo feita a média de valores coletados em um intervalo de 3 horas, pois como o intervalo de tempo de amostragem é muito grande não seria possível realizar uma análise visual dos gráficos com um tempo de coleta menor.

Através da Figura 5.1, onde consta o consumo médio em Watts dos equipamentos do circuito de climatização, observa-se que realmente o funcionamento dos equipamentos ocorre de maneira esperada, como foi explicado no Capítulo 3. Isso é notável por exemplo ao observar o consumo das cortinas, circuitos CORT31 até CORT52, que como já mencionado, funcionam somente quando há abertura das saídas da fábrica e troca de temperatura com o ambiente externo. Como são equipamentos que atuam pouco e com baixo consumo, nota-se que ao longo do tempo seu consumo em Watts é baixíssimo, com apenas alguns picos, que demonstram a abertura das portas que dão acesso ao ambiente externo.

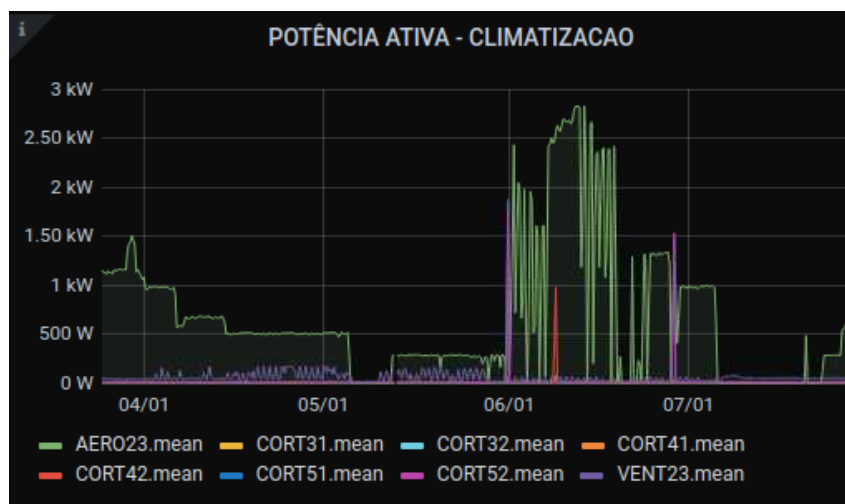


Figura 5.1: Gráfico da coleta de dados potência ativa do circuito de climatização. Fonte: Autoria Própria.

Analisando a Figura 5.2, nota-se que os dados de potência aparente coletados pelo equipamento IoTaWatt estão coerentes. Se comparado com os dados de potência ativa, Figura 5.1, observa-se que os valores de potência aparente se diferem, alguns ligeiramente mais altos, atendendo a condição física proposta pela definição de potência aparente, conforme Equação 5.1.1.

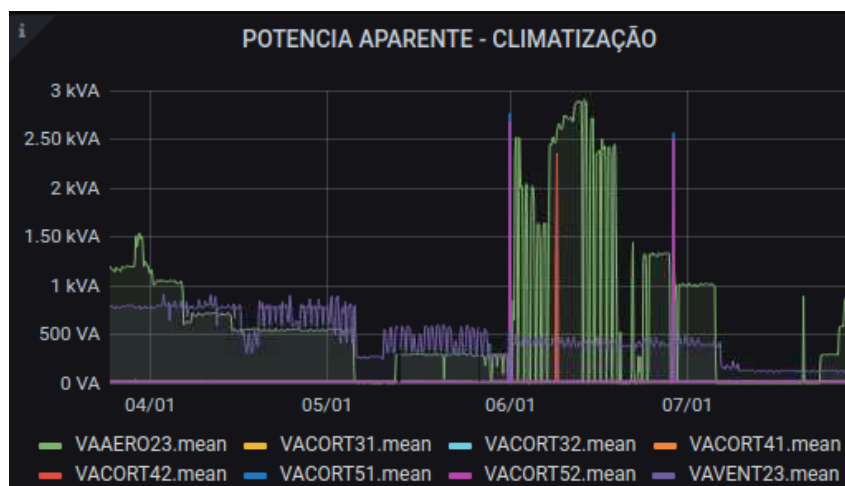


Figura 5.2: Gráfico da coleta de dados potência aparente do circuito de climatização. Fonte: Autoria Própria.

A Figura 5.3 apresenta os dados de potência reativa coletados pelo IoTaWatt. A

potência reativa em sua definição física é a parte da potência que representa as perdas da máquina, na forma de calor, por exemplo. Este valor é menos subjetivo que os outros valores de potência, porém os valores coletados são coerentes. Conclui-se isso comparando os dados de potência reativa, os dados de fator de potência, Figura 5.4, e os dados de potência ativa, Figura 5.1. Essa comparação se torna válida ao usar o princípio físico, presente na Equação 5.1.1, calculando o fator de potência através da razão entre Potência Ativa e Potência Aparente.

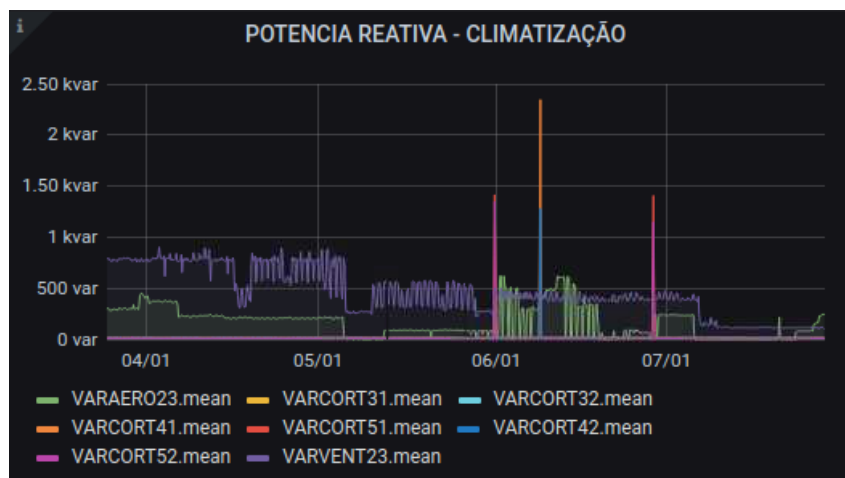


Figura 5.3: Gráfico da coleta de dados potência reativa do circuito de climatização. Fonte: Autoria Própria.

O fator de potência é um dos dados coletados pelo IoTaWatt no circuito dos aerotermos. Na Figura 5.4 nota-se a grande variação desta grandeza ao longo do tempo, principalmente dos aeroventiladores e cortinas. Essa variação acontece devido a esses equipamentos não possuírem atuação contínua. No caso dos aerotermos essa variação é menor, pois esses equipamentos possuem funcionamento contínuo. Quanto aos valores coletados, percebe-se que são coerentes, principalmente constatando que quanto menor a potência reativa coletada, maior o fator de potência, ou seja, maior a eficiência da máquina.

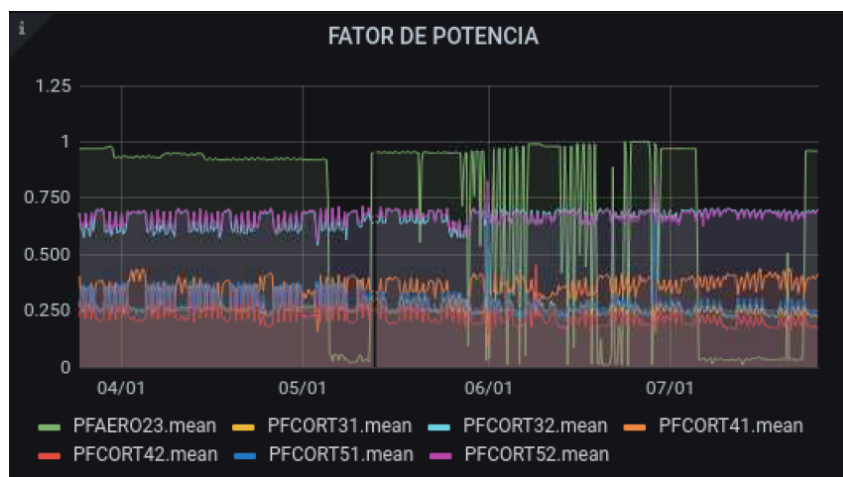


Figura 5.4: Gráfico da coleta dos dados fator de potência do circuito de climatização. Fonte: Autoria Própria.

Os dados de corrente coletados do circuito dos aerotermos são vistos na Figura 5.5. Conclui-se que os dados coletados são coerentes pois se multiplicados pela tensão de alimentação, 230V, seguem o princípio físico apresentado na Equação 5.1.1.

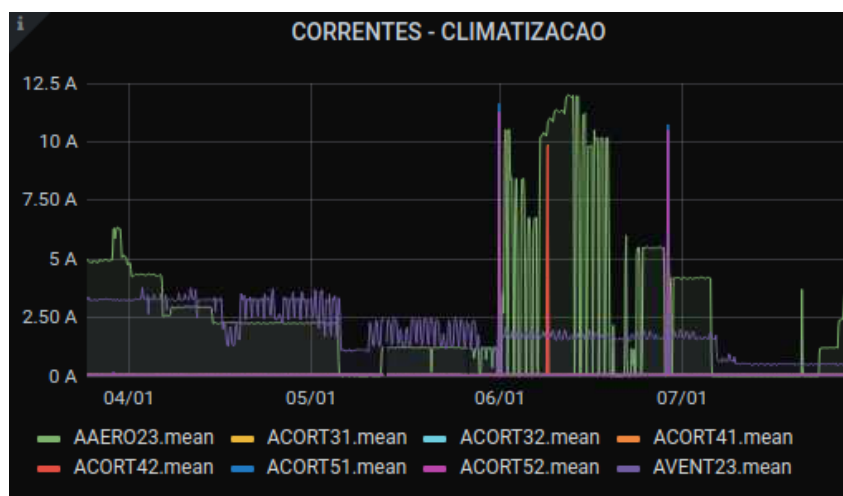


Figura 5.5: Gráfico da coleta de dados de corrente do circuito de climatização. Fonte: Autoria Própria.

Constata-se o funcionamento esperado através dos aeroventiladores, circuito VENT23, onde nota-se que o consumo possui picos de consumo em Watts, em pequenos intervalos de tempo. Isso é comprovado pelo fato de eles só atuarem quando os termostatos já

instalados no equipamento notam uma diferença de temperatura entre a parte inferior e superior da fábrica, acionando os aeroventiladores até que essa diferença se acabe, como é explicado no Capítulo 3.

Observa-se que em vários momentos os aerotermos, circuito AERO23, possuem comportamentos irregulares, com valores dos dados elétricos coletados que variam brusca-mente em pequenos intervalos de tempo, muito fora dos padrões que os outros equipa-mentos do circuito de climatização possuem. Nota-se que no início da coleta de dados, que se deu no mês de Março, os aerotermos apresentaram comportamentos com pouca variação em pequenos intervalos de tempo. Já no mês de Junho, elevou-se o consumo em pequenos intervalos de tempo. Essa grande variação está vinculada a estação climática presente nos dois casos, onde no começo da coleta de dados elétricos estava começando a primavera e no mês de Junho estava iniciando o verão.

Essa variação explicada pela estação climática é uma das comprovações que a coleta de dados funcionou corretamente, já que o sistema de climatização está totalmente vinculado à temperatura externa do local.

Nota-se em todos os gráficos um mesmo comportamento do circuito AERO23, onde nos primeiros dias do mês de Maio todos os dados elétricos coletados destes equipamen-tos se encontram nulos. Neste período, os aerotermos se encontraram desligados para manutenção. O mesmo ocorreu no início do mês de Julho,

Outra forma de constatar que o sistema de monitoramento realmente teve seu funcio-namento de forma correta é comparando as Figuras 5.2 e 5.5. Percebe-se que os gráficos são semelhantes, alterando somente a grandeza de medida que neles se encontram, no de corrente é medido em Ampéres e no de Consumo a grandeza medida é Watts. Na Equação 5.1.1 é comprovado matematicamente esta afirmação.

$$P = V \times I \tag{5.1}$$

- P: Potência ativa (Watts)
- V: Tensão de alimentação (Volts)

- I: Corrente (Ampere)

Através da Equação 5.1.1 constatamos que ao multiplicar todos os valores de corrente monitorados por esse valor de tensão, obtemos os valores de potência em Watts de cada equipamento. Através deste cálculo matemático constatou-se que os valores de corrente e potência em Watts são realmente condizentes.

Continuando a análise gráfica dos dados coletados no sistema de monitoramento, também conseguimos validar que a coleta de dados de Potência Ativa e Fator de Potência ocorreu de forma correta. Para entender este fato, é preciso entender que o fator de potência é um valor adimensional que é resultante da relação entre a potência ativa e a potência aparente.

$$FP = PAtiva/PAparente \quad (5.2)$$

- FP: Fator de potência
- PAtiva: Potência ativa (Watts)
- PAparente: Potência aparente (VoltAmpere)

O fator de potência também é um indicador de eficiência do uso da energia. Um alto fator de potência indica uma eficiência alta e inversamente, um fator de potência baixo indica baixa eficiência energética. Nota-se que nos aerotermos, quando estes estão ligados, o fator de potência destes equipamentos é próximo de 1. Este valor indica que os equipamentos tem uma boa eficiência elétrica, não trazendo a necessidade de um estudo mais profundo para realizar correção de fator de potência desses equipamentos.

Observa-se um comportamento padrão nos dados coletados de fator de potência para os circuitos de aero ventiladores e cortinas. Esse comportamento assemelha-se muito ao comportamento dos outros dados elétricos coletados, confirmando uma coleta segura. Além deste fato, o valor do fator de potência desses equipamentos é considerado baixo, isso pode se explicar pelo seu baixo funcionamento, ligados somente em situações específicas.

Como os dados são coletados pela média através do tempo, a visualização mostra esses valores dando a impressão que os equipamentos tem baixa eficiência elétrica, porém isso é explicado pelo seu uso casual.

É possível entender que os valores coletados de potência aparente e fator de potência são corretos se compararmos eles ao gráfico de Potência Ativa. Através da Figura 5.2, notamos que se realizarmos a multiplicação dos valores coletados em VoltAmpere pelo fator de potência coletado, Figura 5.4, iremos encontrar valores muito próximos de potência ativa. Ou seja, a semelhança entre o gráfico de potência ativa e aparente é muito grande, tendo apenas um multiplicador em sua diferenciação, onde tal multiplicador é o fator de potência.

Para confirmar de alguma forma matemática se a coleta de dados de potência reativa também foi feita com êxito é mais complexo que os outros tipo de potência elétrica existentes. Isso acontece pois a potência reativa não possui um multiplicador ou divisor para que realizar a operação, somente é possível encontrar valores realizando operações com ângulos, tendo assim que efetuar cálculos mais complexos que não são tão perceptíveis visualmente. Porém, sabendo que a Potência Reativa é a perda de potência que o equipamento não consegue converter em trabalho, é possível assimilar os valores de potência ativa com os valores de potência reativa, através do Fator de Potência.

Em momentos que o fator de potência dos aerotermos, por exemplo, se encontram o mais próximos de 1 possível, notamos que os valores de potência reativa desses equipamentos acabam sendo os mais baixos possíveis, porém nunca chegando a zero. Além dessa análise visual, notamos que os valores de potência reativa coletados se encaixam com valores esperados, pois nos equipamentos que atuaram com maior consumo de potência reativa durante o tempo, obtiveram menores valores de fator de potência.

É importante ressaltar que os equipamentos também se mantiveram ligados em períodos noturnos. Ao observar os gráficos nota-se que não existe dados nulos diariamente, isso explica a ação desses equipamentos 24 horas por dia.

5.1.2 Problemas encontrados

Apesar da coleta de dados elétricos do sistema de climatização da Catraport ter acontecido da forma esperada, alguns problemas foram encontrados durante o processo. O maior problema enfrentado durante o projeto foi a dificuldade de conexão de internet Wi-Fi de qualidade, pois em vários momentos não foi possível realizar a conexão com o software VNC Server, ficando assim inacessível o sistema.

A dificuldade de conexão Wi-Fi possui varios fatores atuantes. Como estamos realizando um projeto em um ambiente fabril, repleto de máquinas que atuam grande parte do dia, além de paredes muito grossas para evitar que todos os ruídos se espalhem pela área de escritório, a conexão de forma Wi-Fi de qualidade se torna muito difícil em certos momentos, principalmente pela presença desses obstáculos.

No início do projeto foi realizado uma tentativa de corrigir este problema instalando um repetidor de sinal próximo ao IoTaWatt, na tentativa de que a conexão com o Raspberry Pi se tornasse melhor. Após a instalação deste repetidor a conexão de fato melhorou, porém ainda existia momentos de queda de sinal.

Uma possível solução para melhoramento definitivo da conexão Wi-Fi seria a instalação de mais repetidores de sinal Wi-Fi, fazendo assim com que a conexão seja entregue de boa forma em todos os equipamentos que dependem dela. Porém, a necessidade de tomadas seria aumentada, tendo em visto que estamos falando de um ambiente fabril, que diferente do residencial, não possui um grande numero de tomadas inutilizadas. Além do melhoramento da conexão Wi-Fi, poderia ser apostado a utilização de outro tipo de sistema de monitoramento, que diferente do IoTaWatt, funcione através de cabos de rede.

A perda de dados coletados pelo IoTaWatt só não é possível pelo fato do equipamento possuir uma quantidade de memória interna, fazendo assim com que se armazene dados no dispositivo e quando existir alguma conexão, ele envie estes dados para o Raspberry Pi.

5.2 Validação das regras de Nelson

A implantação das Regras de Nelson na base de dados no sistema de monitoramento foi feita em todos os circuitos, porém foi elencado apenas o circuito dos equipamentos aerotermos para ser tratado neste trabalho, isso se dá pelo fato da maior relevância que esses equipamentos possuem no sistema, como maior consumo de energia elétrica, por exemplo.

Devido a relação física proporcional entre as grandezas dos dados elétricos coletados, será exposto somente o resultado obtido pelas Regras de Nelson nos dados de potência ativa do sistema de climatização.

Um dos objetivos da implantação das Regras de Nelson na base de dados do sistema de climatização da Catraport é realizar o monitoramento desses dados, aplicando a eles condições estatísticas para encontrar padrões ou até mesmo prever comportamentos futuros do maquinário, realizando isso de forma remota e com resposta consideravelmente rápida, para que o usuário do sistema possa visualizar os dados, observar os alertas e esperar um determinado comportamento daquele equipamento nos próximos minutos.

Com o intuito de criação de um sistema visual, provido de alertas para o usuário, desenvolveu-se um código em Python que na base de dados elétricos coletados presente no Raspberry Pi. Quando uma medida acaba ativando uma das Regras de Nelson, o código emite o valor que ativou esta regra gerando um alerta de forma gráfica no software Grafana. Assim, o usuário será informado quando e qual regra foi disparada.

Os alertas possuem um papel muito importante para o usuário do sistema de monitoramento, pois é através deles que virá a informação específica de qual regra foi disparada, além de relatar o tipo de medida que cumpriu uma das regras e o valor que gerou este aviso. Uma legenda sobre o significado de cada regra e o que se espera de comportamento no sistema foi inserido junto aos alertas, servindo para facilitar o entendimento do usuário e caso venha uma pessoa diferente para visualizar o sistema, não tenha dificuldades de compreensão. Foi criado uma interface explicativa para o usuário, onde as regras são descritas quanto ao seu significado, além de possuírem um histórico de aviso, como pode

ser visto na Figura 5.6.

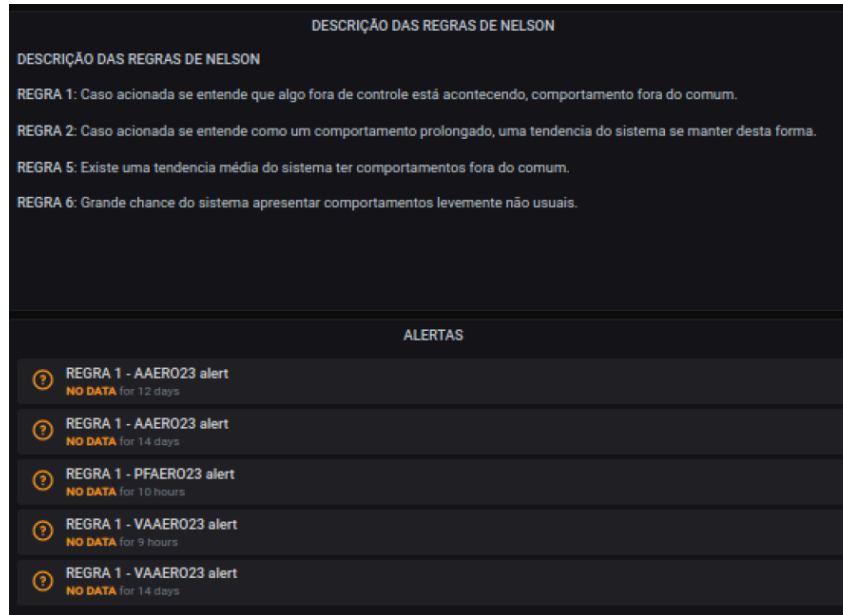


Figura 5.6: Interface criada para descrição e visualização do histórico de disparo dos alertas criados. Fonte: Autoria própria.

A resposta do sistema de validação das Regras de Nelson tem uma temporização de 90 segundos. Essa temporização foi escolhida pelo fato de que o IoTaWatt envia dados para a base de dados com intervalos de 10 segundos, sendo assim sincronizado a validação dos dados com o envio, tendo um tempo de 90 segundos para realizar a rotina do código e iniciar a próxima rotina com os novos dados coletados. Isso caracteriza uma boa sincronização, já que existem regras que precisam analisar os últimos 9 dados presentes na base de dados.

Através da Figura 5.7 observa-se que os dados de potência ativa coletados dos aerotermos não disparou nenhum alerta de validação da Regra de Nelson número 1, compreendendo o período de 09 de setembro de 2021 a 15 de setembro de 2021. O fato do equipamento não atender em nenhum momento a regra de número 1 trás consigo a informação de que neste período de tempo não foi apresentado nenhum comportamento brusco na máquina, o qual poderia afetar consideravelmente seu funcionamento.

Percebe-se que essa regra possui atuação em momentos que os aparelhos são desligados,

que implica em valores nulos, ou em dias de temperaturas elevadas ou amenas, fazendo com que os aerotermos sejam muito exigidos ou trabalhem no mínimo, mas mesmo assim acabam sendo disparadas pouquíssimas vezes.



Figura 5.7: Disparos dos alertas para a Regra de Nelson número 1 nos dados de potência ativa coletados. Fonte: Autoria própria.

Na Figura 5.8 nota-se a grande quantidade de disparos da Regra número 2 de Nelson. A explicação para essa regra possuir disparos praticamente contínuos é a pequena variação do consumo dos aerotermos em curto espaço de tempo. Como a análise é feita de 90 em 90 segundos, o consumo em Watts destes equipamentos não sofre alterações relevantes. A alta ocorrência desta regra representa um comportamento esperado dos aerotermos, trazendo uma certa segurança ao usuário, pois se esta regra dispara com frequência quer dizer que o equipamento não está sofrendo alterações bruscas.

Além desse comportamento contínuo, a variação que a regra 2 leva em consideração para ser disparada, é a menor de todas as regras, já que estamos falando de apenas concentrar 9 pontos do mesmo lado da média, seja para mais ou para menos, em sequência. Analisando os disparos da regra 5, na Figura 5.9 observa-se que também não é um evento



Figura 5.8: Disparos dos alertas para a Regra de Nelson número 2 nos dados de potência ativa coletados. Fonte: Autoria própria.

frequente, neste caso nulo. Isso também pode ser explicado pelo fato de seu limite de disparo ser dois desvios padrões abaixo ou acima da média, os quais são considerados demasiadamente altos, atendendo algumas situações extremas, assim como a regra de número 1. Percebe-se que dificilmente a regra 5 não teria disparado antes do disparo da regra de número 1, devido aos limites de disparo serem os mais próximos. Essa comprovação demonstra a real intenção de funcionamento da regra 5, que é encontrar chances médias de que o sistema vá se encontrar fora do controle.



Figura 5.9: Disparos dos alertas para a Regra de Nelson número 5 nos dados de potência ativa coletados. Fonte: Autoria própria.

Visualizando os disparos da regra de número 1 e comparando com as regra de número 5, observa-se que as duas regras não tiveram disparos. Isso consta no fato do usuário poder prever que seu equipamento está com chances de apresentar comportamentos fora do controle e antecipar isso através do disparo da Regra número 5 de Nelson, constatando um bom funcionamento do código.

Ao analisar os disparos da regra de número 6, onde ela tem como objetivo principal apontar grandes chances do sistema sair ligeiramente fora do controle, nota-se que ela também teve disparos nulos no período de tempo. Como a regra de número 6 agrupa 4 dados por vez que estão um desvio padrão acima ou abaixo da média, esse limite baixo para disparo pode levar aos 9 dados que a regra 2 agrupa para fazer seu disparo. Neste sistema de climatização em específico observa-se que no espaço de tempo em que foi retirado os dados, a regra 6 não foi ativada.

Neste caso conclui-se que o disparo da regra 6 não afeta tanto o funcionamento do sistema, pois ele aponta valores comuns que os aerotermos encontram no dia-dia de uso, já que é notável que durante a noite eles possuem seu consumo reduzido e durante o dia



Figura 5.10: Disparos dos alertas para a Regra de Nelson número 6 nos dados de potência ativa coletados. Fonte: Autoria própria.

isso muda, onde seu consumo aumenta consideravelmente. Assim, esses valores apontam comportamentos normais.

Observa-se que o sistema realmente emitiu alertas quando as regras foram disparadas, isso caracteriza um bom funcionamento do código Python que está correndo dentro da base de dados. Além disso, percebe-se que o painel de alertas do Grafana também funcionou corretamente ao emitir os alertas assim que aparecia um ponto nos gráficos, como foi programado. Os alertas do Grafana também possuem a opção de serem enviados diretamente ao usuário, em forma de e-mail, por exemplo.

A criação do sistema de monitoramento através das Regras de Nelson é pensado para ser utilizado no dia-dia, ou seja, analisando os dados em tempo real e informando quando exista alguma validação de regra. Analisar os dados depois de um certo período de tempo não é de fato a melhor forma de realizar a análise quantitativa do sistema, porém é possível retirar algumas conclusões do funcionamento dos aerotermos visualizando o sistema criado.

A validação das regras através da inserção do código Python na base de dados apresentou alguns problemas. Devido a baixa capacidade de processamento do computador de placa única utilizado para realização do projeto, quando é realizada a iniciação do código nos terminais do microcomputador o sistema já sofre com essa falta, tendo dificuldades de operação remota e até mesmo fechando programas. Como são muitos dados a serem

analisados pelo código, além de um tempo de 90 segundos somente para processar esses dados, uma máquina com maior capacidade poderia ser utilizada, facilitando assim a utilização do usuário e mantendo o sistema em bom uso.

5.3 Coleta e comparação de dados de temperatura

A coleta de dados de temperatura surgiu na busca de encontrar padrões de funcionamento nos equipamentos aerotermos, por exemplo, relacionando a variação de seu consumo através de comparações com a variação de temperatura interna da fábrica.

A instalação do sistema de coleta de dados de temperatura, em Celsius, foi feita no dia 05 de maio de 2021, onde foram instalados os dois sensores no interior da fábrica. Neste período, a coleta de dados em termos quantitativos foi muito bem atendida, com valores cabíveis de temperatura, em graus Celsius. Em termos qualitativos a coleta de dados não correspondeu como o esperado, o qual era realizar a coleta de forma contínua e com valores coerentes, porém teve muitas falhas no momento do envio dos dados.

Assim como o *IoTaWatt*, o maior problema enfrentado pelo sistema de coleta de dados de temperatura também foi a dificuldade de conexão Wi-Fi. Em situação mais complicada que o aparelho de coleta de dados energéticos, os sensores de temperatura estavam dentro da fábrica, próximo a máquinas e distante do repetidor de sinal, dificultando ainda mais a conexão com *Raspberry Pi*, que é onde se encontrava instalada a base de dados.

Apesar da dificuldade em alguns momentos para envio de dados, ainda foi possível realizar uma coleta considerável e importante para o projeto, com um período de 5 minutos por dado coletado, dando em média 288 dados de temperatura enviados a base de dados por dia.

A Figura 5.11 apresenta os dados de temperatura, em Celsius, em função do tempo, no período de 05 de maio de 2021 até 23/07 de 2021. Observa-se falhas no envio de dados durante períodos consideráveis de tempo, nota-se a dificuldade que o sensor possui de manter a conexão Wi-Fi e enviar dados. Essa dificuldade é explicada pelo fato do sensor se encontrar no interior da fábrica, próximo a vários equipamentos que causam

interferência no sinal.

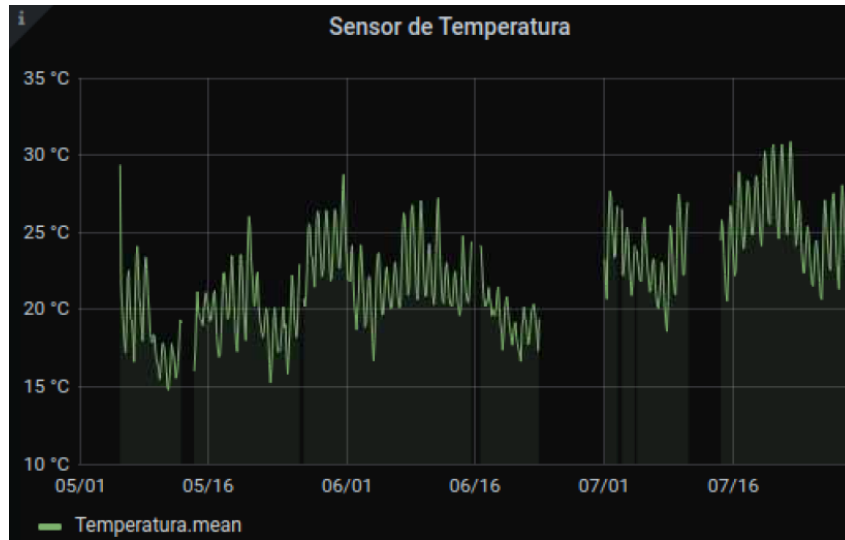


Figura 5.11: Coleta de dados de temperatura dentro da fábrica de empresa Catraport, compreendendo todo o período em que o sensor ficou instalado. Fonte: Autoria própria.

Para realização da comparação dos dados de temperatura coletados com o consumo de energia dos aerotermos, foi escolhido o intervalo de tempo entre os dias 14 de maio e 23 de junho, onde a coleta ocorreu de forma aceitável, ainda com algumas falhas, porém na maior parte do tempo foi correta. Além disso, o período compreende uma época do ano onde saímos da estação da primavera e entramos no verão, havendo assim alterações significativas de temperatura.

Nas Figuras 5.12 e 5.13, percebe-se a coleta de dados de temperatura e potência ativa no circuito dos aerotermos na fábrica da Catraport no período de 14 de maio até 23 de junho de 2021. Para analisar a relação do consumo de potência ativa dos aerotermos e a variação de temperatura interna da fábrica da Catraport foi escolhido um tempo de amostragem para os dados de 1 hora, isso pelo fato de que o consumo de energia pago pelo usuário às concessionárias é dado por este intervalo de tempo, já que um dos objetivos desta análise é uma possível redução deste consumo. Além disso, a coleta de dados de temperatura com intervalos de 1 hora não acaba influenciando tanto para a realização da análise, já que temperatura não é uma grandeza que possui grandes variações em pequenos intervalos de tempo.

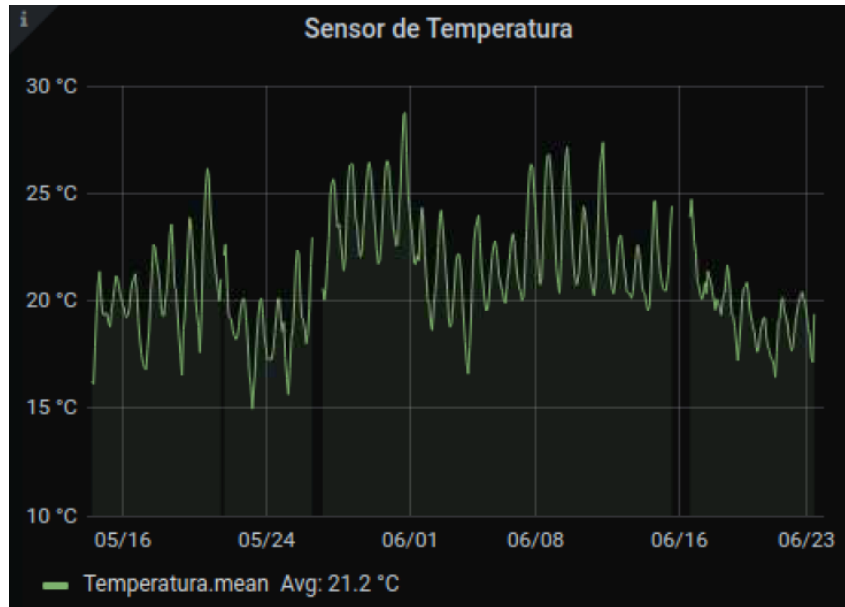


Figura 5.12: Coleta de dados de temperatura que compreende o período de 14/05/2021 até 23/06/2021. Fonte: Autoria própria.

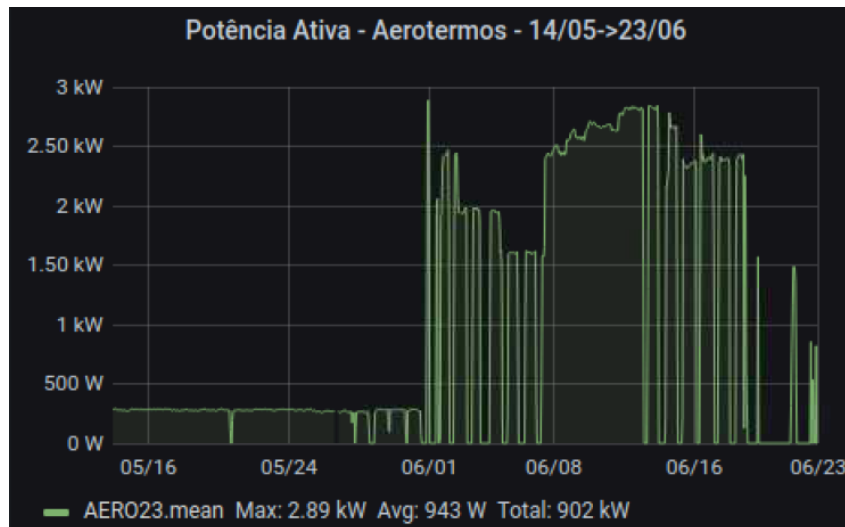


Figura 5.13: Coleta de dados de potência ativa do circuito dos aerotermos, a qual compreende o período de 14/05/2021 até 23/06/2021. Fonte: Autoria própria.

Para realização da comparação dos dados, buscamos entender mais a situação do clima municipal, afinal a temperatura dentro da fábrica é totalmente influenciada pela temperatura externa naquele mesmo dia. Para isso, foi acessado o histórico de temperaturas da cidade nos meses de Maio e Junho de 2021, presentes nas Figuras 5.14 e 5.15. Em laranja visualiza-se os dados de temperatura média do dia em questão, sendo a linha laranja que fica mais acima, a temperatura máxima do dia. Conseqüentemente, a linha que está mais abaixo é as temperaturas mínimas e em laranja mais fraco é a temperatura média.

Primeiramente, comparando as Figuras 5.2, 5.15 e 5.14, conclui-se que o consumo dos aerotermos está totalmente vinculado à temperatura externa da fabrica. Isso é possível notar devido ao fato de que a temperatura média no município de Bragança, a partir do dia 14 de maio, não ultrapassa o valor de 15°C até o dia 26 do mesmo mês. Neste mesmo período, o consumo por hora dos aerotermos se manteve próximo a 300W/h, basicamente um terço do valor médio medido no período de coleta. A partir do dia 26 de maio, notamos que o temperatura externa começou a aumentar, porém o consumo dos equipamentos se manteve o mesmo. Observando o gráfico de temperatura coletada dentro da fábrica, é possível notar que após o aumento de temperatura externa e não alteração no consumo dos aerotermos, a temperatura interna acabou aumentando, atingindo valores próximos a 25°C, o qual antes apenas havia sido atingido em uma determinada oportunidade.

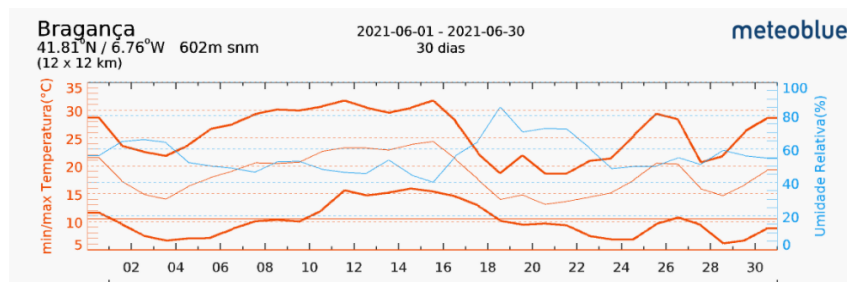


Figura 5.14: Histórico de temperaturas na cidade de Bragança, Portugal, no mês de junho de 2021 [35]

É possível observar na Figura 5.15 que a partir do dia 27 de maio houve um aumento considerável na temperatura média do município de Bragança, ultrapassando a casa dos 20°C. Essa condição se manteve até os primeiros dias de junho, o qual mês marca a

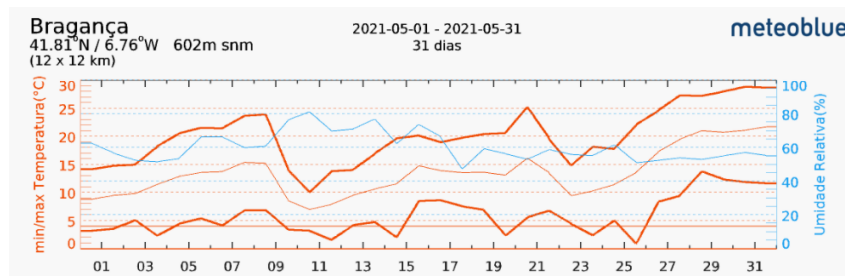


Figura 5.15: Histórico de temperaturas na cidade de Bragança, Portugal, no mês de maio de 2021 [35]

transição da estação da primavera para o verão. Importante destacar que o mês de junho apresentou temperaturas máximas bem mais elevadas que o mês de maio. Esse aumento da temperatura externa ocasionou numa necessidade de maior utilização dos aerotermos, com o intuito de manter o ambiente mais agradável aos colaboradores. Este aumento é facilmente notado se analisarmos o gráfico de consumo dos aerotermos, onde a partir do início do mês de junho, o valor de consumo médio por hora encontrou valores próximos a 2.5kW/h, porém não foram feitos de forma linear e sim através de picos. Esses picos podem ser explicados pelo fato dos equipamentos serem controlados de forma manual, neste caso podendo ser o desligamento feito pelo colaborador e logo em seguida passou a ligar novamente o aerotermino.

Através desse maior consumo dos aerotermos a partir do início do mês de junho, também é possível observar que a temperatura interna da fábrica nestes dias diminuiu, confirmando assim a maior utilização dos equipamentos, maiores responsáveis pela manutenção de temperatura, que de fato atuam de forma esperada.

Do dia 4 de junho até o dia 15, nota-se um comportamento bem característico dos aerotermos. Neste intervalo de tempo as temperaturas de Bragança foram altas e a média sempre esteve acima dos 20°C, demandando assim maior participação dos aerotermos para manter a temperatura interna da fábrica. Nestes dias, o consumo foi em parte linear, onde notamos uma necessidade dos aerotermos estarem ligados por um grande intervalo de tempo, sem pausas. Observa-se a validade desta operação na temperatura coletada dentro da fábrica, pois apesar dos aerotermos estarem funcionando continuamente, a

temperatura se manteve dentro dos padrões, pelo fato de a temperatura externa estar elevada.

Entre os dias 16 e 23 de junho, houve uma queda brusca de temperatura externa e os aerotermos tiveram uma baixa considerável no consumo. Nota-se também que as temperaturas internas coletadas tiveram uma baixa considerável nestes dias, os quais encerram assim o período de coleta de dados.

Nos dias de maior temperatura externa notamos que os aerotermos são ligados praticamente em sua maior capacidade de refrigeração e desligados com bastante frequência, ou seja, não possuem funcionamento contínuo. Uma forma de estabelecer um consumo contínuo, onde não se necessita destes picos de funcionamento, os quais além de aumentarem o consumo dos equipamentos consideravelmente, exigem bastante das máquinas e diminuem sua vida útil, é manter os equipamentos ligados por mais tempo porém com menor consumo, ou seja, menor capacidade térmica.

Esse tipo de funcionamento já é visto nos ar condicionados domésticos com tecnologia inverter, onde o equipamento ao notar que estabelece a temperatura requerida pelo usuário, diminuí seu consumo, porém não desliga completamente, apenas mantém a temperatura do ambiente. Caso em algum momento ele perceba que essa temperatura está bastante alterada, volta a ligar em capacidade máxima. Em termos de consumo a longo prazo, a média de consumo do equipamento acaba sendo menor que se fosse feito o desligamento do equipamento e após um intervalo de tempo ligado ele na sua potência máxima, também gerando impacto econômico no seu consumo.

Pensando no caso em questão, o ideal para os colaboradores da fábrica que operam os aerotermos seria a instalação de um termômetro digital junto do seu controle. Se notarmos através da coleta de dados, a média de temperatura durante o intervalo de tempo é de $21,2^{\circ}\text{C}$, que neste caso se o colaborador através do controle dos aerotermos manter esta temperatura durante os turnos de operação, faria com que continuasse ideal para realização do trabalho. Isso poderia ser feito mantendo sempre os equipamentos ligados, mesmo com baixa potência, fazendo com que o ambiente se mantenha em temperaturas mais baixas nas primeiras horas do dia e quando a temperatura externa aumentasse,

apesar da necessidade de aumentar a potência, não será necessária a mesma quantidade pois o ambiente já possui uma temperatura interna controlada e esperando este aumento.

A diminuição deste consumo impacta consideravelmente na conta de energia da empresa Catraport. Diminuir o consumo dos aerotermos significa necessitar menos do equipamento chiller, responsável pela refrigeração ou aquecimento da água enviada a estes equipamentos, o qual hoje é o equipamento que possui o maior consumo na fábrica.

Capítulo 6

Conclusões

Este trabalho realizou o desenvolvimento e implementação de um sistema de monitoramento energético no sistema de climatização da empresa Catraport, em Bragança, Portugal. Destacou-se a abordagem e materiais utilizados para criação deste sistema, além de métodos de avaliação dos dados elétricos coletados.

A implementação deste projeto inicialmente considerou a viabilidade de instalação do sistema de monitoramento no quadro geral da climatização da empresa, dimensionando os sensores, os quais são transformadores de corrente, que seriam utilizados na ocasião. Em seguida, realizou-se a instalação dos equipamentos na fábrica da Catraport, a qual foi bem sucedida.

Apesar das dificuldades de conexão Wi-Fi presentes no interior da fábrica, o IoTaWatt correspondeu como o esperado na coleta de dados elétricos do sistema de climatização. Isso se explica pelo fato do roteador de sinal Wi-Fi estar instalado a uma distância aceitável do quadro geral do sistema de climatização, onde o equipamento IoTaWatt está instalado. Neste caso, mesmo havendo dificuldade de envio de dados, o IoTaWatt utilizava sua memória interna para salvar os dados e quando a conexão se tornava estável estes dados coletados eram enviados por Wi-Fi até a base de dados presente no Raspberry Pi.

O mesmo não aconteceu com os sensores de temperatura BME280, os quais foram instalados no interior da fábrica, próximo aos aerotermos. Mesmo programados para tentativa de reestabelecimento de conexão quando esta não se fazia presente, os sensores

tiveram algumas falhas consideráveis no envio de dados coletados, o que prejudicou a análise, podendo somente ser efetuada em um intervalo de tempo onde essa coleta de dados ocorreu de forma coerente e sem falhas.

No período em que a coleta de dados de temperatura feita pelos sensores teve êxito, foi possível realizar uma análise comparativa com o consumo dos aerotermos e a temperatura externa da fábrica. Essa análise foi satisfatória, apontando uma possível solução de funcionamento dos aerotermos para que haja melhor utilização de sua energia e reduzindo assim o consumo da fábrica Catraport.

A criação da interface no software Grafana, para visualização e acompanhamento do usuário quanto aos disparos das Regras de Nelson, funcionou com o esperado. A cada 90 segundos o código realizava uma nova análise dos dados, assim se uma regra fosse atendida o alerta seria enviado e o usuário poderia esperar um determinado comportamento da máquina, ou saber que ela está se comportando de forma correta e contínua.

O objetivo de prever comportamentos com o intuito de proteger a máquina de possíveis eventos que possam prejudicar seu funcionamento, como um possível sobrecarregamento de um só equipamento, ou até mesmo uma falha mecânica, foi atendido. As regras que previam comportamentos fora do padrão não foram disparadas, o que é interessante para o usuário, saber que seus equipamentos estão funcionando de forma correta.

No geral, o sistema de monitoramento energético presente da empresa Catraport atendeu os objetivos propostos. Como o sistema de climatização não possui grande complexidade de funcionamento, apesar das dificuldades encontradas durante a realização da implementação, foi possível realizar a coleta de dados elétricos e retirar conclusões importantes para finalização do projeto, como a sugestão de funcionamento proposta no Capítulo 5. Também destacado que os conceitos de IoT, sendo eles gravação de dados em nuvem, conexão remota, análise de dados em tempo real, foram atendidos durante este projeto.

Como trabalho futuro pode-se implementar outras formas de análise de dados, mais avançadas, na base de dados. O intuito de realizar-se um controle do funcionamento do equipamento através de seu funcionamento, em tempo real, na forma de *machine-learning*.

Para que isso ocorra de uma maneira correta e precisa, será necessário uma melhora de conexão Wi-Fi no ambiente fabril, possibilitando uma melhor conexão Wi-Fi entre os equipamentos. Outra sugestão seria a utilização de um microcomputador com maior capacidade de armazenamento e processamento, deixando o usuário confortável para sua utilização, evitando problemas com grandes quantidades de dados coletados.

No quesito de coleta de dados de temperatura interna da fábrica, uma tecnologia LoRa, que vem da expressão "*Long Range*", poderia ser utilizada. Esse tipo de conexão sem fio é utilizado para baixo envio de dados, sem utilização de fios e com baixa frequência [36]. Para este cenário adverso poderia ser uma solução para uma coleta mais segura dos dados.

Bibliografia

- [1] L. Bassi, «Industry 4.0: Hope, hype or revolution?» Em *2017 IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI)*, 2017, pp. 1–6. DOI: [10.1109/RTSI.2017.8065927](https://doi.org/10.1109/RTSI.2017.8065927).
- [2] S. S. Kamble, A. Gunasekaran e S. A. Gawankar, «Sustainable Industry 4.0 framework: A systematic literature review identifying the current trends and future perspectives,» vol. 117, 2018, pp. 408–425. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.05.009>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582018301629>.
- [3] B. Nikolic, J. Ignjatic, N. Suzic, B. Stevanov e A. Rikalovic, «PREDICTIVE MANUFACTURING SYSTEMS IN INDUSTRY 4.0: TRENDS, BENEFITS AND CHALLENGES.,» vol. 28, 2017.
- [4] E. Y. Nakagawa, P. O. Antonino, F. Schnicke, R. Capilla, T. Kuhn e P. Liggesmeyer, «Industry 4.0 Reference Architectures: State of the Art and Future Trends,» 2021, p. 107 241. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107241>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835221001455>.
- [5] H. Lasi, P. Fettke, H.-G. Kemper, T. Feld e M. Hoffmann, «Industry 4.0,» 4, vol. 6, Springer, 2014, pp. 239–242.
- [6] *Conceitos da Indústria 4.0*, Acesso em: 26/08/2021. URL: <https://www.lermensys.com.br/blog/conceitos-da-industria-40>.

- [7] G. Bedi, G. K. Venayagamoorthy e R. Singh, «Navigating the challenges of Internet of Things (IoT) for power and energy systems,» em *2016 Clemson University Power Systems Conference (PSC)*, 2016, pp. 1–5. DOI: 10.1109/PSC.2016.7462853.
- [8] A. Al-Fuqaha, M. Guizani, M. Mohammadi, M. Aledhari e M. Ayyash, «Internet of Things: A Survey on Enabling Technologies, Protocols, and Applications,» 4, vol. 17, 2015, pp. 2347–2376. DOI: 10.1109/COMST.2015.2444095.
- [9] J. Manyika, M. Chui, J. Bughin, R. Dobbs, P. Bisson e A. Marrs, «Disruptive technologies: Advances that will transform life, business, and the global economy,» vol. 180, McKinsey Global Institute San Francisco, CA, 2013.
- [10] S. Jain, V. K. N., A. Paventhan, V. Kumar Chinnaiyan, V. Arnachalam e P. M., «Survey on smart grid technologies- smart metering, IoT and EMS,» em *2014 IEEE Students' Conference on Electrical, Electronics and Computer Science*, 2014, pp. 1–6. DOI: 10.1109/SCEECS.2014.6804465.
- [11] A. S. Kulkarni, K. C. Welch e C. K. Harnett, «A review of electricity monitoring and feedback systems,» em *2011 Proceedings of IEEE Southeastcon*, 2011, pp. 321–326. DOI: 10.1109/SECON.2011.5752958.
- [12] P. Bandararra, M. T. Valdez e A. Pereira, «Solutions for monitoring and analysing for energy consumption — Energy management systems,» em *2016 51st International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2016, pp. 1–5. DOI: 10.1109/UPEC.2016.8114051.
- [13] F. Al-Turjman, C. Altrjman, S. Din e A. Paul, «Energy monitoring in IoT-based ad hoc networks: An overview,» vol. 76, 2019, pp. 133–142. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2019.03.013>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045790618316082>.
- [14] H. Luan e J. Leng, «Design of energy monitoring system based on IOT,» em *2016 Chinese Control and Decision Conference (CCDC)*, IEEE, 2016, pp. 6785–6788.

- [15] W. T. Hartman, A. Hansen, E. Vasquez, S. El-Tawab e K. Altaï, «Energy monitoring and control using Internet of Things (IoT) system,» em *2018 Systems and Information Engineering Design Symposium (SIEDS)*, IEEE, 2018, pp. 13–18.
- [16] J. Stroker, «What’s the real cost of higher efficiency? [electrical energy efficiency],» 3, vol. 9, 2003, pp. 32–37. DOI: 10.1109/MIA.2003.1195680.
- [17] M.-J. Li e W.-Q. Tao, «Review of methodologies and polices for evaluation of energy efficiency in high energy-consuming industry,» vol. 187, Elsevier, 2017, pp. 203–215.
- [18] R. Sperberg, R. Kniss e T. Ruegg, «Energy efficiency in California cement plants: energy savings potential realized by accessing utility energy-efficiency program resources,» 4, vol. 24, IEEE, 2018, pp. 12–16.
- [19] Y. Yao e J. Chen, «Global optimization of a central air-conditioning system using decomposition–coordination method,» 5, vol. 42, 2010, pp. 570–583. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2009.10.027>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877880900276X>.
- [20] C. A. Balaras, G. Grossman, H.-M. Henning, C. A. Infante Ferreira, E. Podesser, L. Wang e E. Wiemken, «Solar air conditioning in Europe—an overview,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 11, n.º 2, pp. 299–314, 2007, ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2005.02.003>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032105000456>.
- [21] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz e C. Pout, «A review on buildings energy consumption information,» *Energy and Buildings*, vol. 40, n.º 3, pp. 394–398, 2008, ISSN: 0378-7788. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.03.007>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778807001016>.
- [22] G. M. Mauro, M. Hamdy, G. P. Vanoli, N. Bianco e J. L. Hensen, «A new methodology for investigating the cost-optimality of energy retrofitting a building category,» vol. 107, Elsevier, 2015, pp. 456–478.

- [23] S. Qiu, W. Zhang, J. Li, J. Chen, Z. Li e Z. Li, «A chiller operation strategy based on multiple-objective optimization,» vol. 152, Elsevier, 2018, pp. 318–323.
- [24] L. Pérez-Lombard, J. Ortiz e C. Pout, «A review on buildings energy consumption information,» 3, vol. 40, Elsevier, 2008, pp. 394–398.
- [25] Y. K. Kim e H. Altan, «Analysis of energy reduction through HVAC commissioning: A case study of a LEED certified new building,» em *2018 5th International Conference on Renewable Energy: Generation and Applications (ICREGA)*, 2018, pp. 216–219. DOI: 10.1109/ICREGA.2018.8337604.
- [26] P. Rocha, A. Siddiqui e M. Stadler, «Improving energy efficiency via smart building energy management systems: A comparison with policy measures,» vol. 88, Elsevier, 2015, pp. 203–213.
- [27] V. Vakiloroyaya, B. Samali, A. Fakhar e K. Pishghadam, «A review of different strategies for HVAC energy saving,» vol. 77, 2014, pp. 738–754. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.10.023>. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413006584>.
- [28] T. Lee, S. Jeon, D. Kang, L. W. Park e S. Park, «Design and implementation of intelligent HVAC system based on IoT and Bigdata platform,» em *2017 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE)*, 2017, pp. 398–399. DOI: 10.1109/ICCE.2017.7889369.
- [29] Frico, *Manual Aerotermo modelo SWS22*, <https://shop.frico.net/>, Maio de 2021.
- [30] IoTaWatt, *IoTaWatt*, <https://iotawatt.com/>, Fevereiro de 2021.
- [31] R. Pi, *Raspberry Pi*, <https://www.raspberrypi.org/>, Fevereiro de 2021.
- [32] Grafana, *Grafana*, <https://www.grafana.com>, Fevereiro de 2021.
- [33] L. S. S. Definition, *Nelson Rules*, <https://www.leansixsigmadefinition.com/glossary/nelson-rules/>, Fevereiro de 2021.

- [34] Bosch, *Humidity Sensor BME280*, <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/>, Fevereiro de 2021.
- [35] Meteoblue, *Historico de temperaturas em Bragança, Portugal*, https://www.meteoblue.com/pt/tempo/semana/bragan%C3%A7a_portugal_2742027, Maio de 2021.
- [36] logpyx, *LoRa*, <https://logpyx.com/lora-solucao-para-conectividade-das-coisas/>, mar. de 2021.