

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Larissa Souto Del Rio

**SISTEMA PARA RESPOSTA DA DEMANDA DE CARGAS  
RESIDENCIAIS BASEADO EM NUVEM**

Santa Maria, RS  
2022

**Larissa Souto Del Rio**

**SISTEMA PARA RESPOSTA DA DEMANDA DE CARGAS RESIDENCIAIS BASEADO  
EM NUVEM**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

ORIENTADORA: Prof.<sup>a</sup> Luciane Neves Canha

Santa Maria, RS  
2022

Del Rio, Larissa Souto  
Sistema para Resposta da Demanda de Cargas  
Residenciais Baseado em Nuvem / Larissa Souto Del Rio.-  
2022.  
58 f.; 30 cm

Orientadora: Luciane Neves Canha  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, RS, 2022

1. Engenharia Elétrica 2. Gerenciamento de Cargas 3.  
Controle de Cargas 4. Smart Grids 5. Resposta da Demanda  
I. Neves Canha, Luciane II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

---

©2022

Todos os direitos autorais reservados a Larissa Souto Del Rio. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: RST-287, 6313, Camobi, Santa Maria, RS.

End. Eletr.: [larissa@redes.ufsm.br](mailto:larissa@redes.ufsm.br)

**Larissa Souto Del Rio**

**SISTEMA PARA RESPOSTA DA DEMANDA DE CARGAS RESIDENCIAIS BASEADO  
EM NUVEM**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Processamento de Energia Elétrica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**.

**Aprovado em 3 de agosto de 2022:**



\_\_\_\_\_  
**Luciane Neves Canha, Dra. (UFSM)** - Videoconferência  
(Presidenta/Orientadora)



\_\_\_\_\_  
**Rafael Gressler Milbradt, Dr. (UFSM)** - Videoconferência



\_\_\_\_\_  
**Wagner da Silva Brignol, Dr. (IFSUL)** - Videoconferência

Santa Maria, RS  
2022

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho aos meus pais, pois sem o apoio incondicional deles, eu nunca teria  
chegado até aqui.*

## **AGRADECIMENTOS**

*Agradeço aos meus orientadores, Luciane e Tiago, por todo o apoio nesta jornada. Professora Luciane obrigada por abrir uma das portas mais importantes na minha vida!*

*Não podendo deixar de agradecer aos meus amigos pelos momentos de descontração. À Amanda, por sempre me apoiar e me mostrar que tudo é possível, que sou capaz de coisas que não acredito que posso realizar.*

*O meu agradecimento à UFSM, por possibilitar através de sua estrutura e reconhecimento, o desenvolvimento pessoal e profissional de centenas de milhares de estudantes.*

*Agradeço à CAPES, através do programa CAPES PrInt, pelo apoio financeiro que possibilitou desenvolver parte da minha pesquisa na Texas Tech University.*

*Enfim, agradeço a todos, que direta ou indiretamente fizeram com que este trabalho se tornasse realidade.*

*Palavras são, na minha nada humilde  
opinião, nossa inesgotável fonte de ma-  
gia. Capazes de formar grandes sofri-  
mentos e também de remediá-los.*

*(Alvo Dumbledore)*

## RESUMO

### SISTEMA PARA RESPOSTA DA DEMANDA DE CARGAS RESIDENCIAIS BASEADO EM NUVEM

AUTORA: Larissa Souto Del Rio

ORIENTADORA: Luciane Neves Canha

A concessionária de energia tem como objetivo principal manter o sistema elétrico operando normalmente, com o mínimo de faltas possíveis. Isso reflete diretamente na relação entre produção e consumo de energia. A demanda sempre tem que ser menor que o fornecimento, para que nunca haja o desabastecimento de energia. Todos os dias, mais consumidores conectam cargas distintas no sistema de energia elétrica, com características de consumo e geração muito distintas. Para que o fornecimento de energia seja mantido, alguns incentivos podem ser criados. Um exemplo de tais incentivos podem ser as ações de resposta da demanda (RD), que é um conjunto de mecanismos utilizados para gerenciar o consumo do usuário em relação à oferta de energia elétrica. De forma geral, a resposta da demanda busca a redução do consumo de energia em momentos críticos (alta demanda) através da entrega de incentivos aos consumidores, como, por exemplo, variações no preço da tarifa de energia elétrica. A partir disto, esta dissertação apresenta um sistema composto por algoritmos e uma arquitetura de comunicação segura, capazes de realizar o gerenciamento automático de cargas residenciais em consumidores que participam de algum programa de resposta da demanda. O sistema tem como objetivo principal atender as respostas da concessionária levando sempre em consideração as preferências e necessidades do consumidor no que diz respeito às *appliances* controláveis existentes na rede elétrica da residência. Todo o controle é feito de forma automatizada a partir das decisões tomadas pelos algoritmos. Os algoritmos têm como entradas as preferências do usuário, como horários de funcionamento de cada equipamento, prioridades de cada equipamento, consumo, *status* dos equipamentos, entre outros. Um cenário de testes contendo sete cargas controláveis, mostrou que os algoritmos desenvolvidos cumprem seu papel. É possível observar a redução da curva de carga em momentos que a tarifa é mais elevada e/ou quando alguma requisição de RD é recebida da concessionária de energia. Em termos de segurança dos dados, a arquitetura criada para implementação do controle, mostrou-se bastante robusta cifrando os dados das mensagens trafegadas.

**Palavras-chave:** Gerenciamento e Controle de Cargas. Otimização de Consumo. Redes Elétricas Inteligentes. Resposta da Demanda.

## ABSTRACT

### CLOUD-BASED RESIDENTIAL LOAD DEMAND RESPONSE SYSTEM

AUTHOR: Larissa Souto Del Rio

ADVISOR: Luciane Neves Canha

The utility's primary goal is to keep the electrical system operating normally, with as few faults as possible. This directly reflects the relationship between energy production and consumption. Demand always has to be less than supply, so that there is never a shortage of energy. Every day, more consumers connect different loads to the electricity system, with very different consumption and generation characteristics. For the energy supply to be sustained, some incentives can be created. These incentives can be characterized by demand response (DR), a set of mechanisms used to manage user consumption in relation to electricity supply. In general, the demand response seeks to reduce energy consumption at critical moments (high demand) through the delivery of incentives to consumers, such as, for example, variations in the price of the electricity tariff. From this, this dissertation presents a system composed of algorithms and secure communication architecture capable of automatically managing residential loads in consumers participating in some demand response programs. The system's main objective is to respond to the utility's requests, always taking into account the preferences and needs of the consumer with regard to the controllable appliances existing in the residence's electrical network. All control is done automatically from the decisions made by the algorithms. The algorithms have user preferences as inputs, such as operating hours of each device, priorities of each device, consumption, and status of the devices. A test scenario containing seven controllable loads showed that the developed algorithms fulfill their role. It is possible to observe the reduction of the load curve at times when the tariff is higher and/or when an RD request is received from the energy utility. In terms of data security, the architecture created to implement the control proved to be quite robust, encrypting the data of the messages transmitted.

**Keywords:** Loads Management and Control. Consumption Optimization. Smart Grids. Demand Response.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Infraestrutura de Telecomunicações (AMI). . . . .	18
Figura 2.2 – Resposta da demanda: Passo-a-passo. . . . .	20
Figura 2.3 – Periodização do RPP. . . . .	21
Figura 2.4 – Tarifa branca. . . . .	24
Figura 2.5 – Modelo de Comunicação MQTT. . . . .	25
Figura 2.6 – Comunicação TLS. . . . .	26
Figura 2.7 – Serviços de comunicação do OpenADR. . . . .	28
Figura 3.1 – Arquitetura implementada. . . . .	36
Figura 3.2 – Algoritmo cenário de tarifa branca. . . . .	41
Figura 3.3 – Algoritmo cenário de resposta da demanda. . . . .	42
Figura 4.1 – Curva de carga padrão. . . . .	44
Figura 4.2 – Curva de carga - controle tarifa branca. . . . .	45
Figura 4.3 – Evento de RD no OpenADR. . . . .	46
Figura 4.4 – Curva de carga - controle RD. . . . .	46
Figura 4.5 – Distribuição dos certificados digitais. . . . .	47
Figura 4.6 – Comunicação MQTT sem segurança. . . . .	48
Figura 4.7 – Comunicação MQTT com segurança. . . . .	48
Figura 4.8 – Comunicação OpenADR com segurança. . . . .	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Pacotes de Controle MQTT. ....	25
Tabela 2.2 – Características presentes nos trabalhos apresentados. ....	33
Tabela 4.1 – Cenário de testes. ....	43

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>AMI</i>	Advanced Metering Infrastructure
<i>SEP</i>	Sistema Elétrica de Potência
<i>RD</i>	Resposta da Demanda
<i>HVAC</i>	Heating, Ventilation, and Air Conditioning
<i>PLIM</i>	Programação Linear Inteira Mista
<i>HEMS</i>	Home Energy Management System
<i>SG</i>	Smart Grids
<i>HAN</i>	Home Area Network
<i>NAN</i>	Neighborhood Area Network
<i>WAN</i>	Wide Area Network
<i>MI</i>	Medidor Inteligente
<i>COD</i>	Centro de Operações de Distribuição
<i>TOU</i>	Time of Use
<i>RPP</i>	Regulated Price Plan
<i>CPP</i>	Critical Peak Pricing
<i>PTR</i>	Peak Time Rebate
<i>RTP</i>	Real Time Pricing
<i>DLC</i>	Direct Load Control
<i>KWh</i>	Quilowatt-hora
<i>XML</i>	eXtensible Mark-up Language
<i>XMPP</i>	Extensible Messaging and Presence Protocol
<i>HTTP</i>	Hypertext Transfer Protocol
<i>VTN</i>	Virtual Top Node
<i>VEN</i>	Virtual End Node
<i>MQTT</i>	Message Queue Telemetry Transport
<i>TLS</i>	Transport Layer Security
<i>MAC</i>	Message Authentication Code

<i>PKI</i>	Public-Key Infrastructure
<i>CA</i>	Certificate Authority
<i>W</i>	Watts
<i>SCADA</i>	Supervisory Control and Data Acquisition

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>13</b>
1.1	OBJETIVOS	14
1.1.1	<b>Objetivo Geral</b>	<b>14</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b>	<b>14</b>
1.1.3	<b>Motivação e Justificativa</b>	<b>15</b>
1.1.4	<b>Organização dos Capítulos</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO DA LITERATURA</b>	<b>16</b>
2.1	REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1.1	<b>Smart Grids</b>	<b>16</b>
2.1.1.1	<i>AMI</i>	17
2.1.2	<i>Home Area Network (HAN)</i>	18
2.1.3	<i>Neighborhood Area Network (NAN)</i>	18
2.1.4	<i>Wide Area Network (WAN)</i>	19
2.1.5	<b>Resposta da Demanda</b>	<b>19</b>
2.1.5.1	<i>Time of Use</i>	20
2.1.5.2	<i>Critical Peak Pricing - CPP</i>	21
2.1.5.3	<i>Peak Time Rebate - PTR</i>	21
2.1.5.4	<i>Real Time Pricing - RTP</i>	22
2.1.6	<b>Resposta da Demanda Baseada em Incentivos</b>	<b>22</b>
2.1.6.1	<i>Controle Direto da Carga (Direct Load Control)</i>	22
2.1.6.2	<i>Interruptibilidade (Interruptible)</i>	22
2.1.6.3	<i>Programas de Emergência (Emergency Demand Response Programs)</i>	23
2.1.7	<b>Tarifação Dinâmica</b>	<b>23</b>
2.1.8	<b>Protocolos de Comunicação</b>	<b>23</b>
2.1.8.1	<i>Protocolo MQTT</i>	24
2.1.8.2	<i>Protocolo OpenADR</i>	27
2.2	TRABALHOS RELACIONADOS	29
2.2.1	<b>Aquisição de Dados e Desagregação de Cargas</b>	<b>30</b>
2.2.2	<b>Preferências do Usuário e o Agendamento de Cargas</b>	<b>31</b>
2.2.3	<b>Fontes Não Convencionais de Energia</b>	<b>32</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>36</b>
3.1	FORMALIZAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO PARA RD	38
3.1.1	<b>Cenário 1 - Participante de programas de RD</b>	<b>38</b>
3.1.2	<b>Cenário 2 - Participante da modalidade Tarifa Branca</b>	<b>38</b>
3.2	ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO	39
<b>4</b>	<b>CENÁRIOS DE TESTES E RESULTADOS</b>	<b>43</b>
4.1	CENÁRIO 1 - TARIFA BRANCA	43
4.2	CENÁRIO 2 - PROGRAMAS DE RESPOSTA DA DEMANDA	45
4.3	TESTES DE SEGURANÇA	46
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>50</b>
5.1	TRABALHOS FUTUROS	51
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>52</b>
	<b>APÊNDICE A – IMPLEMENTAÇÃO DO OPENADR</b>	<b>55</b>
	<b>APÊNDICE B – CONFIGURAÇÃO DO BROKER MQTT</b>	<b>56</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As Redes Elétricas Inteligentes (*Smart Grids*) consistem na modernização do sistema elétrico tradicional, através da inserção de elementos de comunicação inteligentes capazes de conectar-se à rede de dados, à Internet (CGEE, 2012). Um dos principais dispositivos utilizados nas *Smart Grids* é o medidor inteligente (*smart meter*), responsável pela maioria das tarefas da rede inteligente uma vez que este participa de várias aplicações, seja atuando como produtor de dados ou como elemento de configuração. Entre suas funções encontram-se o processamento de dados e o envio de determinados comandos para outros dispositivos (ZHOU et al., 2017).

A *Advanced Metering Infrastructure* (AMI), também conhecido como Infraestrutura de Telecomunicações, é um sistema que tem como principal função possibilitar a obtenção remota de alguns dados integrados ao Sistema Elétrica de Potência (SEP). A implantação deste sistema é o que viabiliza um ambiente inteligente em uma rede elétrica. Entre os dados obtidos pela AMI, pode-se citar a obtenção remota de medições de consumo de energia, bem como o uso dessas informações para reconfiguração do sistema elétrico, gerenciamento de energia e até mesmo tarifação dinâmica (YAN et al., 2013).

Um dos maiores desafios da implantação desse novo sistema é a coleta, armazenamento e tratamento do grande conjunto de dados gerados a partir do uso de novas tecnologias que serão inseridas. Dentre essas tecnologias destaca-se a resposta da demanda (*Demand Response*). A resposta da demanda é um conjunto de mecanismos utilizados para gerenciar o consumo do usuário em relação à oferta de energia elétrica. De forma geral, a resposta da demanda busca a redução do consumo de energia em momentos críticos (alta demanda) através da entrega de incentivos aos consumidores, como, por exemplo, variações no preço da tarifa de energia elétrica (EPE, 2019).

A partir do exposto, esse trabalho tem como proposta geral o desenvolvimento de um sistema baseado em nuvem capaz de controlar cargas residenciais, de acordo com a melhor relação custo-benefício para o consumidor. Esta relação tem como componentes de decisão as preferências do consumidor definidas por ele mesmo através dos parâmetros de entrada dos algoritmos, e as requisições de programas de resposta da demanda enviadas pela concessionária.

O sistema será baseado no envio de dados para o ambiente em nuvem, responsável por enviar e receber informações (requisições) tanto do consumidor quanto da concessionária de energia elétrica. Este ambiente também será responsável por hospedar um modelo matemático (algoritmos), que tem como função relacionar as preferências do consumidor com as requisições da concessionária. Os dados de consumo de energia elétrica dos *smart appliances* do consumidor, de suas preferências relacionadas aos horários prioritários e não prioritários de funcionamento dos equipamentos serão enviados ao ambiente

em nuvem através do *smart meter* do consumidor. O ambiente em nuvem será capaz de interagir diretamente com o *smart meter* do consumidor, enviando comandos para que determinadas *smart appliances* sejam desligadas e/ou ligadas por determinado período de tempo. Todas essas decisões serão baseadas na modelagem matemática de otimização, proporcionando um melhor gerenciamento das cargas residenciais, além de um consumo de energia elétrica mais eficiente, garantindo as condições de oferta e demanda entre concessionária de energia e consumidor.

## 1.1 OBJETIVOS

Nessa seção são apresentados o objetivo geral do trabalho e os passos a serem seguidos para sua implementação, objetivos específicos.

### 1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um sistema baseado em nuvem capaz de realizar o gerenciamento de cargas em consumidores residenciais, através de um modelo matemático e técnicas de inteligência computacional capazes de encontrar o melhor cenário de utilização das cargas existentes de acordo com o comportamento usual do consumidor e suas preferências, garantindo a melhor relação entre as requisições dos programas de resposta da demanda e o conforto do usuário, além da utilização consciente dos recursos energéticos disponíveis.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar bibliografia existente acerca do sistema proposto;
- Determinar as vantagens e importância do sistema proposto em relação ao existente;
- Determinar os tipos de preferências que podem ser definidas pelo consumidor;
- Determinar a infraestrutura e mecanismos de segurança do ambiente em nuvem;
- Estudar protocolos para a realização da comunicação entre *smart appliances* e o ambiente em nuvem, e entre a concessionária e o ambiente em nuvem;
- Estudar modelos matemáticos para encontrar a melhor relação entre as requisições de DR e as preferências do consumidor;
- Desenvolver o modelo matemático que garantirá o sucesso do sistema proposto;

- Realizar simulações e testes com o sistema desenvolvido.

### **1.1.3 Motivação e Justificativa**

Com o gerenciamento do consumo de energia elétrica proporcionada através da implementação do sistema proposto, custos serão reduzidos e aumentará a garantia de que a oferta de energia sempre será maior que a demanda. Com isso, o sistema proposto neste trabalho, visa automatizar o gerenciamento do consumo de energia, levando em consideração além das preferências do consumidor, a situação da oferta de energia naquele momento por parte da concessionária. A utilização do sistema de gerenciamento das cargas residenciais aumenta a eficiência do consumo de energia elétrica, evitando o desperdício e também o consumo desenfreado, além de garantir que tanto consumidores quanto concessionária de energia sejam favorecidos no processo.

### **1.1.4 Organização dos Capítulos**

Esta dissertação encontra-se organizada da seguinte forma:

O capítulo dois apresenta o embasamento teórico para entendimento das técnicas e métodos aplicados no desenvolvimento deste trabalho. Também é apresentado a revisão de trabalhos existentes que possuem temáticas semelhantes, com abordagens de métodos de gerenciamento de resposta da demanda.

O capítulo três apresenta a metodologia do trabalho: a arquitetura do sistema, os protocolos de comunicação e prerrogativas de segurança adotadas, o método de otimização utilizado e os algoritmos desenvolvidos.

No capítulo quatro são apresentados os resultados do trabalho e a análise destes resultados. E, por fim, o capítulo cinco apresenta a conclusão do trabalho e suas implementações futuras.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Este capítulo apresenta trabalhos que trazem abordagens de métodos de gerenciamento de resposta da demanda e o embasamento teórico necessários para o entendimento deste trabalho.

### 2.1 REFERENCIAL TEÓRICO

#### 2.1.1 Smart Grids

O Sistema Elétrico de Potência (SEP) tem como principal função fornecer energia elétrica a todos usuários, desde residências até o setor industrial. Essa energia deve ser entregue de forma adequada e no instante em que for solicitada. Esse sistema é formado por uma complexa infraestrutura e deve atender padrões de confiabilidade e qualidade, modicidade tarifária e sustentabilidade social e ambiental. O SEP é composto pela geração, rede de transmissão, rede de distribuição e pelos usuários de energia elétrica. No Brasil, a geração predominante é centralizada em grandes usinas conectadas à rede de transmissão, especialmente hidrelétricas. As redes de distribuição alimentam os diversos tipos de consumidores: industriais, comerciais e residenciais (CGEE, 2012).

As usinas de geração encontram-se, normalmente, a uma grande distância dos centros urbanos. Assim, a energia elétrica percorre grandes distâncias por meio do Sistema de Transmissão de Alta Tensão. Após isso, ao chegarem a uma distância mais próxima ao centro de distribuição, são utilizadas linhas de média e baixa tensão. Toda essa infraestrutura composta por diversos sistemas necessita de dispositivos para monitoramento e controle da rede como um todo. Entre esses dispositivos pode-se citar as chaves telecomandadas, medidores fasoriais, e demais sensores e atuadores. Esses dispositivos têm a capacidade de enviar informações para a central de controle e serem controlados remotamente. Essa central faz uso de sistemas supervisórios, como o sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*), que é capaz de supervisionar, controlar, otimizar e gerenciar os sistemas de geração e transmissão de energia elétrica (CGEE, 2012). Com a utilização do sistema SCADA é possível detectar falhas na rede, além de analisar o consumo, demanda e cargas dos consumidores.

Apesar da existência deste tipo de monitoramento, ele não tem a capacidade de monitorar as variáveis da rede, como tensão e corrente, em tempo real. Além disso, não existem mecanismos capazes de aplicar tarifas dinâmicas que variem conforme a capacidade do sistema elétrico em relação à demanda daquele momento (CGEE, 2012). Para

resolver esses aspectos negativos do monitoramento existente, tecnologias estão surgindo, como é o caso das Redes Elétricas Inteligentes, do inglês *Smart Grids* (SG).

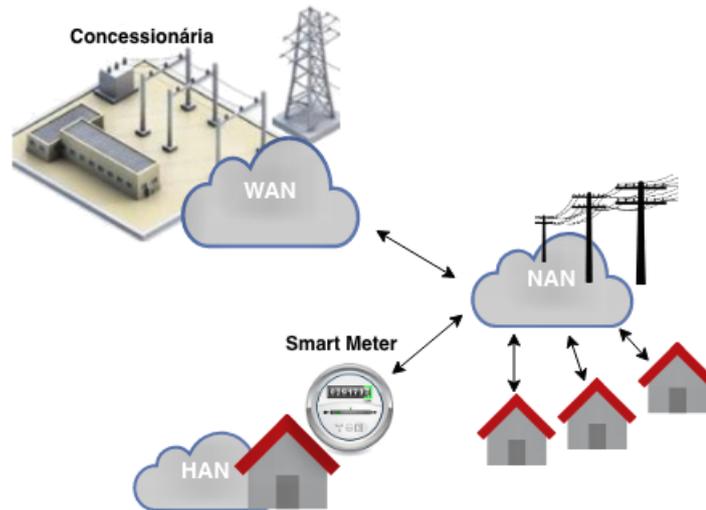
As *Smart Grids* representam a modernização do sistema elétrico existente, onde a adição de dispositivos inteligentes provê uma maior eficiência, automatização de tarefas e segurança. Uma rede inteligente é um conjunto de dispositivos, aplicações e suas comunicações, que possibilita a criação de um fornecimento amplamente distribuído e automatizado. A principal função desses dispositivos é o envio de informações para a central de controle da concessionária de energia elétrica (EKANAYAKE et al., 2012). Essas informações são essenciais para a correta operação e monitoramento da rede elétrica, e do sistema como um todo. As SG apresentam uma série de vantagens em relação ao sistema convencional de energia elétrica, como por exemplo: interação entre dispositivos ativos no sistema elétrico de potência em tempo real, maior resiliência em casos de falhas no sistema, inserção de novas fontes de geração de energia (geração distribuída), tarifação dinâmica, automatização e melhor gerenciamento dos processos de geração, distribuição e transmissão da energia elétrica (ZHOU et al., 2017).

Um dos principais dispositivos utilizados nas *Smart Grids* é o medidor inteligente (*smart meter*), responsável pela maioria das tarefas da rede inteligente uma vez que este participa de várias aplicações, seja atuando como produtor de dados ou como elemento de configuração. Entre suas funções encontram-se o processamento de dados e o envio de determinados comandos para outros dispositivos. É constituído por sensores que realizam a medição de energia em tempo real. Além disso, faz o envio de notificações para a concessionária quando há falta de energia elétrica, realiza o monitoramento do consumo e da qualidade e é capaz tanto de enviar como de receber informações. Esse equipamento traz ao consumidor uma maior gerência dos seus gastos, pois através do uso do medidor inteligente é possível ter informações em tempo real sobre o consumo de energia elétrica, permitindo um mercado dinâmico de energia (EKANAYAKE et al., 2012).

#### 2.1.1.1 AMI

A AMI é um grande conjunto de tecnologias que constituem uma complexa infraestrutura, que pode ser inteiramente configurada e integrada tanto a processos e aplicações já existentes, quanto a futuras implementações (VIZZOTTO et al., 2019). A medição inteligente nas SG possibilita uma comunicação em duas vias, onde a concessionária de energia se comunica diretamente com o medidor inteligente do consumidor. Essa comunicação bidirecional é possível devido a implementação da AMI, onde as informações de consumo são coletadas em tempo real. Além disso, a AMI possibilita o envio de informações sobre a situação de todo o sistema, trazendo uma maior resiliência em caso de falhas. A utilização da AMI é a modernização do sistema elétrico, através do monitoramento de

Figura 2.1 – Infraestrutura de Telecomunicações (AMI).



Fonte: Autora.

transformadores e alimentadores, interrupção dinâmica do fornecimento, isolamento de falhas e a integração de veículos elétricos na rede (TUBALLA; ABUNDO, 2016).

A AMI possibilita a integração total do SEP. A partir dessa implementação é que torna-se possível a automatização da distribuição, onde o medidor inteligente é a conexão principal entre a concessionária de energia e o consumidor. Essa infraestrutura é dividida de acordo com suas áreas de abrangência (EKANAYAKE et al., 2012), conforme pode ser observado na Figura 2.1.

### 2.1.2 Home Area Network (HAN)

A *Home Area Network*, também chamada de Rede Residencial, é a rede de comunicação responsável por prover comunicação entre os equipamentos da rede do consumidor, que encontram-se em sua residência, e o medidor inteligente (EKANAYAKE et al., 2012).

### 2.1.3 Neighborhood Area Network (NAN)

A *Neighborhood Area Network* também conhecida como NAN é a rede de comunicação estabelecida entre o medidor inteligente e os concentradores de dados. Sua abrangência inclui várias residências ou um bairro (EKANAYAKE et al., 2012).

#### 2.1.4 *Wide Area Network (WAN)*

A *Wide Area Network* é a rede de comunicação formada entre os concentradores de dados e a central de operações da concessionária de energia (EKANAYAKE et al., 2012).

Os medidores inteligentes (MI) são um dos principais componente de uma SG. Representam a fronteira entre a HAN e a NAN, delimitando portanto a área sob domínio administrativo da concessionária (NAN) da área de domínio do usuário (HAN). Os medidores inteligentes podem atuar como produtores e também como consumidores de dados (EKANAYAKE et al., 2012).

Os dados de consumo mensurados no MI, tanto para faturamento quanto para a aplicação de resposta da demanda, são enviados para os sistemas supervisórios, normalmente presentes no Centro de Operações de Distribuição (COD). Já em um ambiente onde esteja sendo aplicada a tarifação dinâmica, os valores de tarifas seguem o fluxo de dados inverso, tendo como origem o COD e destino o MI, para o qual são informadas as tarifas vigentes. A partir disso, o MI poderá repassar esses dados aos eletrodomésticos inteligentes presentes na HAN para que estes possam gerenciar seu gasto energético de acordo com a tarifação aplicada e as preferências do usuário (EKANAYAKE et al., 2012).

#### 2.1.5 *Resposta da Demanda*

A resposta da demanda (RD) é definida como a alteração no perfil de consumo de energia elétrica por parte do usuário, devido a uma recompensa financeira ou a uma alteração nas tarifas por parte da concessionária de energia. Logo, a resposta da demanda é um mecanismo que garante um maior gerenciamento do uso de energia elétrica. E, com esse gerenciamento, os custos são reduzidos e há o aumento da garantia de que a oferta de energia sempre será maior que a demanda (EPE, 2019).

Há duas categorias de programas de RD: baseados em incentivos e baseados em preços. Nos programas baseados em incentivos, os consumidores participam de forma voluntária onde o operador do sistema pode diretamente desligar algumas cargas durante os picos de demanda. Fica claro, que essa possibilidade de desligar os equipamentos dinamicamente, dá-se através do uso do medidores inteligentes e toda a integração que as *smart grids* proporcionam ao sistema elétrico. Já nos programas baseado em preços há a utilização da tarifação dinâmica, onde a tarifa de energia fica mais cara nos períodos em que a demanda é elevada. Estes programas buscam achatar a curva da demanda com a variação dos preços ao longo do tempo (VÁZQUEZ-CANTELI; NAGY, 2019). Na Figura 2.2 é demonstrado um passo-a-passo de como funciona um programa de resposta da demanda.

Entre os benefícios proporcionados pela RD, pode-se citar os seguintes:

Figura 2.2 – Resposta da demanda: Passo-a-passo.



Fonte: Autora.

- Aumento da estabilidade da rede e flexibilização da demanda;
- Mudança do pico da demanda durante os picos de geração de energias renováveis;
- Menores preços de energia elétrica;
- Redução de preços relacionados à geração, transmissão e distribuição de energia;
- Redução da conta de energia elétrica para os consumidores.

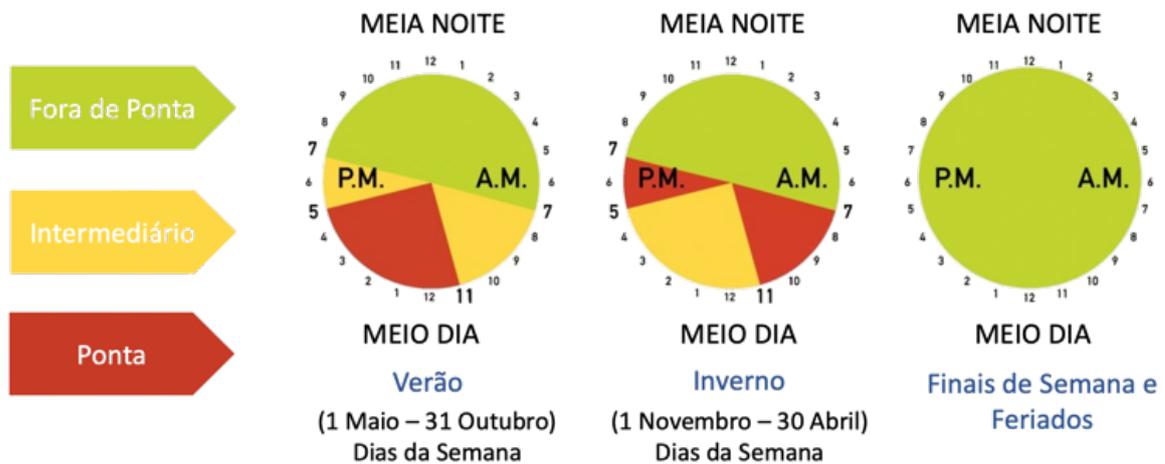
A resposta da demanda pode ser realizada de forma automatizada, onde o consumidor não precisa realizar nenhuma ação para controlar o consumo de seus equipamentos. Este controle normalmente é feito através de modelos matemáticos com a implementação de algoritmos. Nestes casos, a resposta da demanda ocorre de forma dinâmica assim como o gerenciamento do consumo de energia (ZHANG et al., 2020).

#### 2.1.5.1 Time of Use

Na TOU, o preço da tarifa varia conforme diferentes períodos do dia. Essa periodização é definida conforme a demanda, ou seja, horários de pico e horários fora de pico, também podendo existir horários intermediários. Essa variação tarifária também pode ser definida de acordo com as estações do ano, úmidas e secas. Neste tipo de resposta da demanda, o consumidor irá saber antecipadamente os preços da tarifa de energia e quando elas irão ocorrer (COIMBRA; JÚNIOR; CHANTRE, 2021). Logo, a TOU tem uma certa desvantagem para a distribuidora de energia, já que não reflete a situação do sistema elétrico em tempo real. Um exemplo de aplicação da TOU é o *Regulated Price Plan* (RPP)

da província de Ontário, no Canadá. O RPP foi estabelecido em 2005 e é dividido em três períodos: ponta, intermediário e fora de ponta. Para tornar a periodização mais próxima à situação real do sistema elétrico, os períodos intermediário e fora de ponta são distintos para o inverno e verão. A definição dos períodos pode ser observada na Figura 2.3. Apesar de não ser um programa obrigatório, mais de 90% dos consumidores optam pela utilização do RPP (OEB, 2020).

Figura 2.3 – Periodização do RPP.



Fonte: Autora.

### 2.1.5.2 Critical Peak Pricing - CPP

No CPP, os consumidores irão pagar uma tarifa mais alta que o comum em dias em que o sistema elétrico está com a demanda muito alta. Os consumidores são avisados com antecedência para que possam reduzir o consumo no dia em que a tarifa estará mais cara. Este tipo de programa é aplicado em três concessionárias da Califórnia, EUA. Os dias em que a demanda está muito alta são denominados como *CPPs days*, nesses dias os consumidores são notificados para reduzirem o seu consumo, já que a tarifa estará em um valor bem mais elevado (COIMBRA; JÚNIOR; CHANTRE, 2021).

### 2.1.5.3 Peak Time Rebate - PTR

O PTR é bastante similar ao CPP e tem sua aplicação no estado de Maryland nos EUA pela *Baltimore Gas and Electric Company*. O PTR é ofertado a todos os clientes que possuem o medidor inteligente. Os *Energy Savings Days* consistem em dias em que a previsão da demanda de energia é muito alta, normalmente em dias onde a temperatura

está muito elevada. Nesses dias, os consumidores que tiverem uma redução em seu consumo, são recompensados com a redução da tarifa (EPE, 2019).

#### *2.1.5.4 Real Time Pricing - RTP*

O RTP é o programa baseado em preços que mais representa a situação em tempo real do sistema elétrico. Este programa é utilizado na Espanha denominado como *Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor*. O consumidor é informado no dia anterior sobre os valores das tarifas horárias que serão praticados no dia seguinte. Dessa forma, o valor da tarifa exemplifica a situação atual do sistema naquele momento. O RTP é um dos programas de resposta da demanda existentes que apresenta um modelo de tarifação mais avançado (COIMBRA; JÚNIOR; CHANTRE, 2021).

### **2.1.6 Resposta da Demanda Baseada em Incentivos**

A resposta da demanda baseada em incentivos é embasada na oferta de incentivos ao consumidor quando houver uma redução do consumo de energia, em períodos em que a demanda de energia encontra-se em estado crítico (EPE, 2019). Neste programa, deve-se reduzir o consumo em relação a uma linha base calculada previamente. Caso o consumidor não consiga reduzir o consumo abaixo do que foi previamente definido, ele será penalizado. A seguir serão apresentados alguns dos programas existentes de resposta da demanda baseada em incentivos.

#### *2.1.6.1 Controle Direto da Carga (Direct Load Control)*

No DLC, a concessionária pode reduzir ou interromper a carga enviada ao consumidor em momentos pré-definidos. A comunicação entre concessionária e consumidor é realizada através do medidor inteligente. Cada consumidor é avisado anteriormente da redução da carga e é remunerado através da tarifa de energia de acordo com a quantidade de KWh reduzidos (SOUZA, 2010).

#### *2.1.6.2 Interruptibilidade (Interruptible)*

Neste programa, o consumidor deve reduzir a sua demanda quando solicitado pelo operador do sistema e receberá uma taxa de redução ou créditos na fatura de energia.

Caso o consumidor não diminua a demanda quando solicitado, pode sofrer penalizações por parte da concessionária de energia (SOUZA, 2010).

#### 2.1.6.3 *Programas de Emergência (Emergency Demand Response Programs)*

Neste programa, o pagamento de incentivos ao consumidor é realizado quando há a redução da carga em períodos em que o sistema encontra-se em situação de emergência. Este programa é adotado no Texas - EUA, pela *Electric Reliability Council of Texas* (COIMBRA; JÚNIOR; CHANTRE, 2021).

#### 2.1.7 **Tarifação Dinâmica**

A maioria dos consumidores de energia elétrica no Brasil pagam um único valor pela tarifa de energia. A tarifação dinâmica consiste na variação do preço da energia elétrica conforme o período do dia e do ano. Com a tarifação dinâmica, o preço de energia é equivalente à demanda em diferentes períodos de tempo. A tarifa dinâmica traz ao consumidor a necessidade de diminuição do consumo quando a tarifa de energia encontra-se mais elevada, já que a demanda encontra-se em um período crítico (MULLER, 2016).

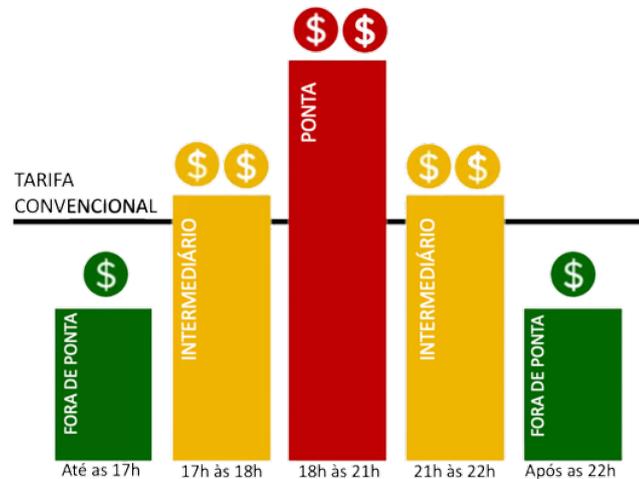
A tarifa branca é um exemplo de modalidade tarifária onde é aplicada a tarifação dinâmica. Esta tarifa pode ser aderida por consumidores do grupo B (??), que é composto pelos consumidores de baixa tensão entre eles os consumidores residenciais. Na tarifa branca o dia é dividido em três períodos: ponta, intermediário e fora de ponta conforme por ser observado na Figura 3.1.

Dessa forma, com a tarifa branca o consumidor irá pagar mais caro nos momentos em que o sistema está sobrecarregado e mais barato nos momentos de baixa demanda. Os horários especificados na Figura 3.1 são os mais usuais, mas cabe a cada concessionária de energia definir os períodos e os respectivos valores das tarifas.

#### 2.1.8 **Protocolos de Comunicação**

Nesta seção são apresentados os protocolos utilizados na implementação na arquitetura proposta neste trabalho.

Figura 2.4 – Tarifa branca.



Fonte: Autora.

### 2.1.8.1 Protocolo MQTT

O MQTT (*Message Queue Telemetry Transport*) é um protocolo de mensagens otimizado para utilização em redes não confiáveis e/ou de alta latência, que contém equipamentos com capacidade de processamento e memória bastante limitados. Seu modo de comunicação baseia-se no modelo publicador/subscritor (*publish/subscriber*). O protocolo possui duas entidades principais: o *message broker* e os clientes. O *broker* é o servidor da comunicação, que recebe todas as mensagens dos clientes e as redireciona para destinos relevantes. Os clientes são qualquer “coisa” que possa interagir com o *broker* e receber mensagens (YUAN, 2017).

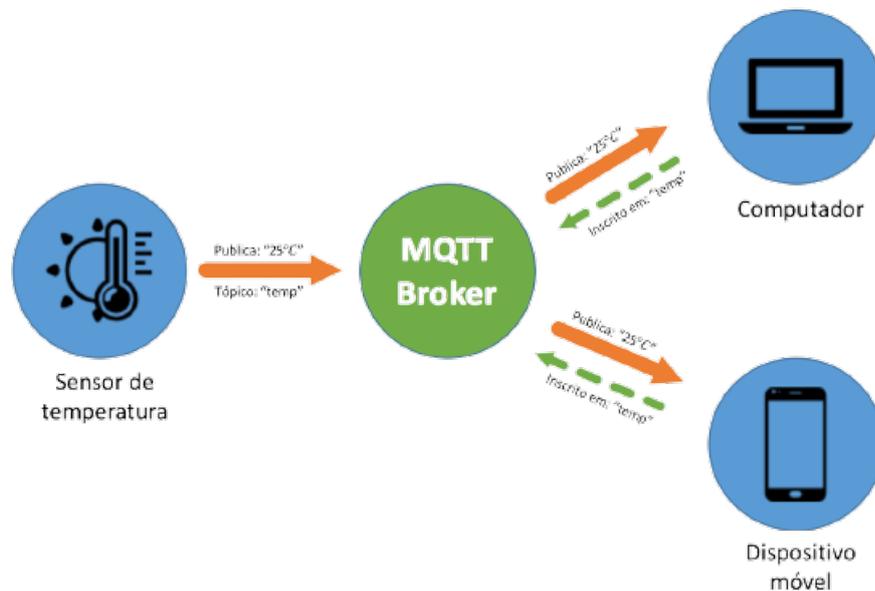
De acordo com (YUAN, 2017), o modelo de publicação e assinatura do MQTT consiste nos seguintes passos:

- O cliente conecta-se ao *broker* e pode assinar qualquer “tópico” de mensagens. A conexão pode ser simples ou utilizar uma conexão criptografada quando é necessário manter em sigilo o conteúdo das mensagens, a autenticidade e irretratabilidade;
- O cliente envia ao *broker* a mensagem e o tópico em que deseja publicá-la;
- Ao receber, o *broker* encaminha as mensagens a todos os clientes que assinaram esse mesmo tópico.

A Figura 2.5 mostra um exemplo prático do funcionamento do modelo de publicação e assinatura.

Conforme pode ser visualizado na Figura 2.5, o sensor de temperatura publica uma mensagem com a temperatura atual no tópico “temp”, ao receber a mensagem o *broker*

Figura 2.5 – Modelo de Comunicação MQTT.



Fonte: Adaptado de (BRENMAN, 2018).

encaminha aos clientes *Computer* e *Mobile device*, que estão inscritos no mesmo tópico “temp”.

Para cada ação a ser tomada durante a comunicação das entidades do protocolo MQTT, existem pacotes de controle que contém comandos com a ação a ser executada (PONNUSAMY; RAJAGOPALAN, 2017), conforme apresenta a Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Pacotes de Controle MQTT.

Pacotes de Controle	Ação
CONNECT	Solicita uma conexão com o <i>broker</i>
CONNACK	Retorno da solicitação de conexão
PUBLISH	Publica uma mensagem
PUBACK	Retorno da publicação de uma mensagem
SUBSCRIBE	Inscrição em um tópico
SUBACK	Retorno da inscrição
UNSUBSCRIBE	Cancelar inscrição em um tópico
UNSUBACK	Retorno do cancelamento
PINGREQ	Requisição de PING
PINGRESP	Resposta do PING
DISCONNECT	Notificação de desconexão

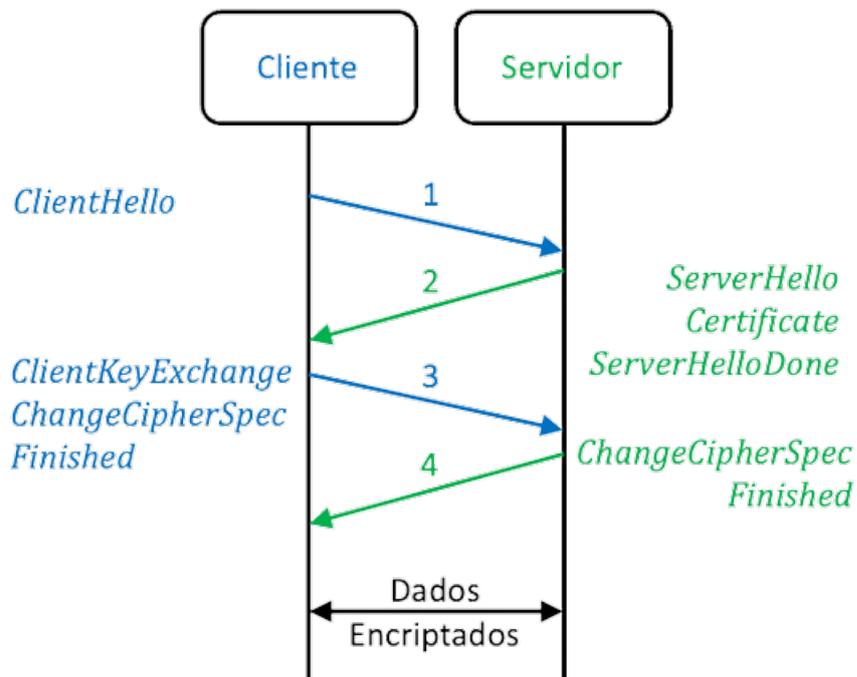
Fonte: Autoraa.

No que diz respeito à segurança, o protocolo MQTT tem suporte à plataforma TLS (*Transport Layer Security*). Essa plataforma provê segurança na comunicação entre cliente

e servidor, onde o principal objetivo é prevenir a interceptação e adulteração das mensagens, ou seja, garantir privacidade e integridade ou qualquer outro parâmetro de segurança conforme configuração da plataforma (DIERKS; RESCORLA, 2008).

De acordo com a norma RFC 5246 (DIERKS; RESCORLA, 2008), a comunicação no plataforma TLS é dada da seguinte forma: quando um cliente e um servidor desejam estabelecer uma conexão deve-se entrar em acordo sobre qual algoritmo criptográfico utilizar e se deve ser realizada a autenticação de um com o outro. Após, é feita a utilização de criptografia assimétrica para compartilhamento de um “segredo” para posteriormente ser usado na criptografia simétrica, que é responsável pela maior parte da encriptação realizada pela plataforma. Na Figura 2.6 encontra-se o funcionamento básico do TLS.

Figura 2.6 – Comunicação TLS.



Fonte: Autora.

O cliente TLS envia uma mensagem de *ClientHello* enquanto o servidor deve responder com uma mensagem de *ServerHello*. Caso essa troca de mensagens não ocorra da forma esperada, a conexão será encerrada. A mensagem de *Hello* inclui qual versão da plataforma é suportada pelo cliente, qual plataforma de criptografia deve ser utilizada, métodos de compressão e um número randômico de 32 *bytes* (DIERKS; RESCORLA, 2008).

A mensagem *Hello* de resposta do servidor seleciona qual versão da plataforma a ser utilizada, a plataforma de criptografia e preenche o ID da sessão, além de preencher o número de 32 *bytes* com a data e a hora. Agora o servidor envia seu certificado digital para o cliente, esse certificado contém a chave pública do servidor. O cliente verifica a autentici-

dade do certificado com a autoridade certificadora. Após essa verificação o cliente começa a negociar a chave simétrica. Como a conexão entre cliente e servidor ainda não foi estabelecida, então a chave simétrica não pode ser trocada diretamente entre eles. Para a realização do acordo de chaves, já que as chaves em si nunca são trocadas pela rede, existem inúmeros algoritmos, como é o caso do *Diffie-Hellmann*. O cliente envia a mensagem juntamente com seu MAC (*Message Authentication Code*) (DIERKS; RESCORLA, 2008).

O servidor processa os parâmetros da troca da chave e também verifica o MAC para garantir a integridade e autenticidade da mensagem enviada. Se tudo ocorreu bem, uma conexão segura TLS é estabelecida entre o cliente e o servidor. A seguir será explicado sobre a criação dos certificados digitais que garantem a autenticação entre cliente e servidor (DIERKS; RESCORLA, 2008).

A Infraestrutura de Chave Pública, do inglês *Public-Key Infrastructure* (PKI), é utilizada para a geração de certificados digitais e chaves de segurança. Com a utilização da PKI é possível garantir o sigilo e privacidade de dados, controle de acesso a aplicativos, identificação do remetente, entre outras características que visam garantir a segurança dos dados trafegados através de uma rede de computadores (STALLINGS; BROWN, 2014).

Para cada entidade participante do sistema é gerado um par de chaves (pública/privada) e também um certificado digital que contém suas informações. Quando alguém tenta iniciar uma comunicação, se houver autenticação mútua, é usada a chave pública do destinatário para cifrar os dados e a chave privada do remetente para assinar a mensagem. Uma CA (*Certificate Authority*) é uma entidade responsável por emitir, distribuir, revogar e gerenciar certificados digitais (STALLINGS; BROWN, 2014).

#### 2.1.8.2 Protocolo OpenADR

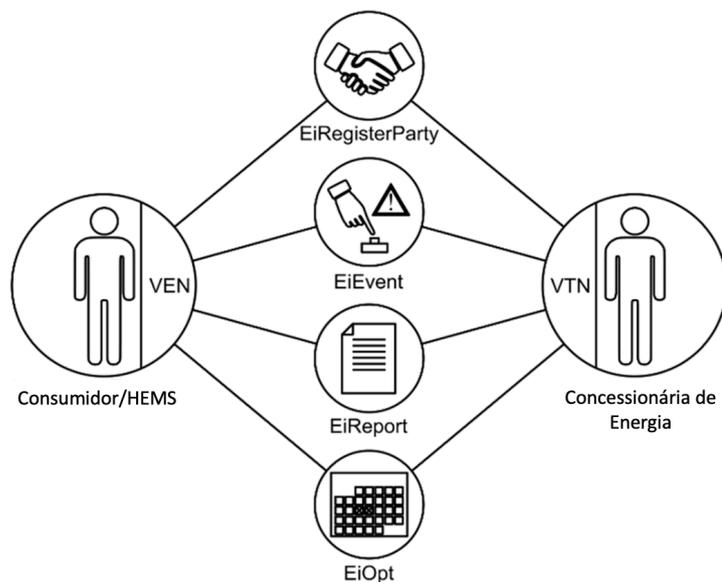
O OpenADR é um protocolo de padrão aberto que tem como principal objetivo permitir implementações de resposta da demanda automatizada. É um modelo de dados de comunicação, mas também define mecanismos de transporte e segurança. O protocolo é baseado em *eXtensible Mark-up Language* (XML). Como mecanismos de transporte, o OpenADR usa o *Extensible Messaging and Presence Protocol* (XMPP) ou o *Hypertext Transfer Protocol* (HTTP) (PAREJO et al., 2021).

O protocolo define dois tipos de atores ou nós herdados do *OASIS Energy Interoperation*, o *Virtual Top Node* (VTN) e o *Virtual End Node* (VEN). A comunicação no OpenADR é hierárquica, ou seja, sempre acontece entre um VTN e um ou mais VENs. Assim, nenhuma comunicação entre o mesmo tipo de nó pode ocorrer. No entanto, um nó pode ser ao mesmo tempo um VEN e um VTN de outro estágio OpenADR hierarquicamente inferior (PAREJO et al., 2021).

Neste sentido, o VTN é responsável por emitir eventos e enviar outros dados relevantes para outras entidades (VENs). Já o VEN é responsável por controlar e gerenciar os recursos elétricos ao nível do consumidor final ou agregar diferentes recursos e/ou clientes. A versão atual do protocolo (OpenADR 2.0b) define quatro serviços principais de comunicação (ver Figura 2.7):

- **EiRegisterParty**: Utilizado para identificar e estabelecer a comunicação entre um VTN e um VEN;
- **EiEvent**: Utilizado pelo VTN para enviar requisição de RD para um ou mais VENs;
- **EiReport**: Utilizado para o compartilhamentos de informações. Ex.: um VEN pode reporta ao VTN medições de potência;
- **EiOpt**: Utilizado para comunicar disponibilidade ou indisponibilidade. Ex.: um VEN pode comunicar a um VTN em que período ele pode ou não aceitar eventos.

Figura 2.7 – Serviços de comunicação do OpenADR.



Fonte: Adaptado de (PAREJO et al., 2021).

Os eventos enviados pelo VTN consistem em dois pontos principais: intervalos e sinais. Os sinais são o conteúdo principal de um evento, descrevem a requisição do VTN enviada ao VEN. Por exemplo, inicie um controle de nível 2. O protocolo OpenADR provê uma gama bastante grande de tipos de sinais que podem ser enviados. Esses sinais são definidos pelo nome, tipo e unidades permitidas. Na prática, o tipo de sinal mais utilizado é da categoria *SIMPLE/levels* (ALONSO et al., 2020).

Os eventos SIMPLE/level têm como *payload* os valores 0, 1, 2 ou 3, onde há apenas 4 opções de controle ao trabalhar com eventos desta categoria. De acordo com os perfis do OpenADR, esses valores *payload* correspondem ao seguinte:

- 0 **normal**: execução normal, não execute nenhum controle;
- 1 **moderado**: realizar uma redução moderada no uso de energia;
- 2 **alto**: realizar uma alta redução no uso de energia;
- 3 **especial**: programa definido / especial.

O intervalo de um evento consiste em períodos de tempo em que o controle deve ser executado. A maior parte dos eventos possuem apenas um período de tempo único. Os eventos podem ser direcionados a VENs, recursos ou grupos específicos. Caso não haja um alvo específico no evento, ele é redirecionado para todos os recursos (ALONSO et al., 2020).

A segurança do protocolo OpenADR utiliza a plataforma TLS com certificados digitais do padrão x.509. A especificação OpenADR 2.0 requer que todos os nós (tanto VTNs quanto VENs) sejam equipados com pares de chaves públicas/privadas e certificados digitais emitidos por uma Autoridade de Certificação (CA) confiável. Dessa forma, é garantida a integridade e confidencialidade das mensagens trocadas durante a comunicação (ALONSO et al., 2020).

## 2.2 TRABALHOS RELACIONADOS

Nesta seção são apresentados os trabalhos abordados na literatura que tratam de algoritmos e métodos de gerenciamento para redução do consumo de energia. Esses métodos possibilitam que os consumidores consigam ter um maior gerenciamento de seu consumo de energia elétrica, tornando a participação nos programas de RD mais dinâmica. A resposta da demanda automatizada (*Automated Demand Response*) é implementada através destes modelos e algoritmos que permitem que o gerenciamento do consumo de energia seja feito de forma automática (PAWITPANICH; PORA; PANITANTUM, 2021).

A maioria dos trabalhos existentes na literatura que tratam destes métodos levam em consideração as preferências do consumidor para a redução do consumo, ou seja, existe a definição das cargas mais prioritárias onde o seu horário de funcionamento deve ser respeitado pelo algoritmo implementado. Logo, as cargas menos prioritárias podem ter seu horário de funcionamento alterado para que a requisição de diminuição de consumo seja atendida (ARUN; SELVAN, 2018).

Em (SOUZA et al., 2020) é desenvolvido um sistema para a gestão de consumo de energia pré-paga. A energia pré-paga consiste na contratação prévia da quantidade de energia, créditos, a ser consumida em determinado período. No sistema de pré-pagamento de energia elétrica, um medidor pré-pago é instalado e configurado com a quantidade de créditos adquiridos pelo consumidor. Quando o consumo chega no limite contratado, o fornecimento de energia é interrompido e deve ser feita uma nova recarga de créditos (OGUNJUYIGBE et al., 2021).

A técnica apresentada em (SOUZA et al., 2020) para a gestão de consumo é baseada na desagregação não intrusiva de cargas. O gerenciador do sistema recebe do consumidor o valor creditado e a expectativa de duração do crédito. Além disso, o gerenciador também recebe informações relativas à flexibilidade das cargas de acordo com as preferências do consumidor. O gerenciador obtém informações de histórico de consumo, analisa as cargas que permitem a redução de uso e determina o tempo máximo de uso para cada carga flexível. Quando o tempo de uso está próximo ao limite, um sinal é enviado a uma sirene, que toca por cinco segundos e avisa o consumidor que a carga que está em uso deve ser desligada. Dessa forma, o sistema evita que os créditos de energia esgotem antes do tempo previsto pelo consumidor.

O sistema apresentado também poderia ter sua aplicação no gerenciamento do consumo, onde o programa de reposta da demanda Controle Direto da Carga fosse aplicado. Neste tipo de programa, cada consumidor é avisado anteriormente do quanto necessita diminuir de sua carga, onde a mesma análise do sistema pré-pago poderia ser feita pelo sistema apresentado em (SOUZA et al., 2020). Porém, ao invés de garantir a duração dos créditos de energia, o sistema notificaria o consumidor quando deve cortar cargas e garantir que o consumo determinado pelo programa de RD está sendo cumprido.

### **2.2.1 Aquisição de Dados e Desagregação de Cargas**

A aquisição de dados é um dos pontos principais na implementação de qualquer sistema de monitoramento do consumo de energia elétrica. Através dos dados de consumo dos equipamentos do consumidor é possível tomar ações, sendo elas baseadas em algum programa de RD ou somente relacionadas às preferências do próprio consumidor (BASNET; ABURUB; JEWELL, 2019).

Em (GARCIA; SOUZA; MARAFAO, 2020) é proposto um medidor capaz de identificar as diferentes cargas através da análise dos sinais de corrente e tensão. O medidor de energia elétrica proposto é composto por sensores não intrusivos e um sistema embarcado, propiciando a realização da desagregação de consumo por cargas. A desagregação de cargas é conhecida pelo termo NILM (do inglês, *Non-intrusive Load Monitoring* monitoramento não intrusivo de cargas). Além disso, o medidor oferece recursos de conectividade

para disponibilização de informações aos consumidores através de um servidor web, por exemplo.

O objetivo em (GARCIA; SOUZA; MARAFAO, 2020) é estimar o consumo  $P_i$  de  $n$  cargas no instante  $t$  e considerando o erro de medição  $e(t)$ , de maneira que o consumo total  $P(t)$  seja definido como em (1).

$$P_i = \sum_{i=1}^n a_i(t) \cdot P_i(t) + e(t) \quad (2.1)$$

Sendo:

$$a_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{se a carga } a_i \text{ está ativa no instante } t \\ 0, & \text{se a carga } a_i \text{ está desativada no instante } t \end{cases}$$

O processo de desagregação das cargas consiste basicamente nas etapas de aquisição de dados, processamento, detecção de eventos, extração de atributos, classificação e cálculo do consumo. Primeiramente é realizada a aquisição e processamento destes dados. Após, as informações são analisadas para identificar as cargas ativas ou desativadas. Na etapa de extração dos atributos, as informações geradas anteriormente são utilizadas para criar um conjunto de atributos específicos de cada carga quando ativa. A etapa de classificação é realizada por um algoritmo de aprendizado de máquina capaz de identificar a carga. E, por fim, é feito o cálculo do consumo estimado de cada carga com base no tipo e no período de utilização (GARCIA; SOUZA; MARAFAO, 2020).

Este sistema pode ser utilizado em cenários de RD onde é necessário conscientizar o consumidor da carga utilizada em determinados momentos. Além disso, a desagregação das cargas permite identificar qual carga possui um consumo mais elevado levando o consumidor a mudar o período de utilização desta carga, respeitando os períodos onde a tarifa de energia elétrica está mais elevada. Mesmo esta dissertação não abordando a desagregação de cargas, o uso de aprendizado de máquina é proposto como trabalho futuro. Dessa forma, será possível identificar o consumo individual de cada carga existente na residência.

## 2.2.2 Preferências do Usuário e o Agendamento de Cargas

Um dos pontos principais de qualquer modelo que busque otimizar o consumo de energia é o conforto do usuário. Na maioria das vezes, os consumidores estão dispostos a participar de programas de RD, mas não de abrir mão do uso de determinados equipamentos em certos períodos. Para isso, os algoritmos de otimização do consumo devem ser capazes de encontrar um meio termo entre as necessidades do consumidor e a diminuição dos custos, especialmente quando o consumidor está participando de algum evento de RD

(ZHANG et al., 2020).

O agendamento de cargas (*load scheduling*) é o principal método utilizado quando o conforto do consumidor é considerado. Esse agendamento consiste em mudar o período de funcionamento de alguns equipamentos baseado nas prioridades definidas pelo consumidor. Logo, os equipamentos menos prioritários podem ter seus horários de funcionamento alterados para que a carga em determinados períodos seja mantida em níveis aceitáveis (FERNANDES et al., 2014).

O algoritmo proposto em (JIANG; WU, 2020) é um *framework* para agendamento de cargas baseado na eficiência econômica (*cost efficiency*) e nas preferências do consumidor. Esse modelo permite que a minimização do custo seja obtida de acordo com diferentes padrões de consumo baseados nas preferências definidas por cada tipo de consumidor. O algoritmo proposto faz com que o consumidor ajuste sua demanda em resposta aos sinais de preço recebidos da concessionária por meio de seu estilo de vida e preferência.

Em relação às preferências do usuário, um ponto importante a ser considerado é a climatização do ambiente, que é responsável por boa parte da demanda de energia elétrica de qualquer tipo de consumidor. A tecnologia de climatização é comumente chamada de HVAC (do inglês, *Heating, Ventilation, and Air Conditioning*), composto pelo aquecimento, ventilação e ar condicionado. O trabalho apresentado em (ZHANG et al., 2020) traz um estudo sobre o comportamento dos consumidores e as diferenças dos parâmetros térmicos utilizados durante períodos críticos da demanda (*critical peak*). Os dados resultantes do estudo foram utilizados para criar uma modelagem de RD para maximizar o benefício para o sistema de distribuição, otimizar o controle automatizado de RD e buscar o maior valor de incentivo/recompensa para o consumidor. Além disso, também foi considerado as preferências do usuário em relação a taxa de permanência em casa e na avaliação da temperatura durante o pico do verão. O sistema proposto neste trabalho, não trata diretamente do conforto térmico, porém a garantia de realizar o gerenciamento das cargas seguindo as preferências do usuário faz com que esse controle seja feito de forma implícita.

### 2.2.3 Fontes Não Convencionais de Energia

O gerenciamento e controle do consumo de energia também deve levar em consideração os consumidores que possuem geração de energia através de fontes renováveis, como por exemplo, a energia solar fotovoltaica. As fontes renováveis têm um papel importante na resolução dos problemas de energia em casos de falta ou até mesmo em áreas remotas. A energia renovável não só aumenta a geração de energia, mas também ajuda a manter um ambiente livre de poluição (BHATI; KAKRAN, 2019). Dessa forma, tratar do controle da demanda considerando a inserção das fontes renováveis, traz inúmeros benefícios tanto para os consumidores quanto para as concessionárias de energia. Esta inserção de

fontes alternativas de energia também será considerada futuramente no sistema proposto nesta dissertação.

O trabalho (BHATI; KAKRAN, 2019) apresenta um modelo de otimização da demanda pelo lado do consumidor, onde o objetivo é minimizar o custo com o consumo de eletricidade através da maximização do uso de fontes de energia não convencionais. O modelo desenvolvido utiliza a programação linear inteira mista (PLIM) e a função objetivo é minimizar o custo do consumo de energia. O custo é definido como a energia drenada da rede e a vendida de volta à rede por uma residência que tem a capacidade de gerar energia).

O modelo proposto também tem o objetivo de controlar os dispositivos de uma casa inteligente. Os aparelhos da casa inteligente são programados de acordo com as preferências dos usuários, disponibilidade de energia renovável e o preço variável de eletricidade durante um dia. O objetivo da programação proposta é reduzir o custo total de eletricidade e maximizar a utilização da energia renovável gerada. A proposta de (BHATI; KAKRAN, 2019) é bastante semelhante a desta dissertação, porém não trata dos protocolos a serem utilizados no controle dos dispositivos, assim como não leva em consideração a segurança dos dados trafegados nesta comunicação. Fica evidenciado que o sistema proposto nesta dissertação é mais robusto e aborda ferramentas essenciais para um sistema de gerenciamento do consumo e controle de cargas.

Todos os trabalhos apresentados no capítulo 2 tratam de um sistema de gerenciamento do consumo de energia pelo lado da demanda, ou seja, pelo próprio consumidor. Esse gerenciamento é denominado na literatura com sistema de gestão de energia residencial, do inglês *Home Energy Management System* (HEMS). Os HEMS se apresentam de diversas formas, sendo com a utilização de técnicas de aprendizado de máquina até técnicas menos complexas, como a PLIM (BHATI; KAKRAN, 2019). A Tabela 2.2 traz as principais características existentes ou não nos trabalhos.

Tabela 2.2 – Características presentes nos trabalhos apresentados.

Trabalho	Minimização do Custo	Controle de Cargas	Agendamento de Cargas	Preferências do Consumidor	Conexão C/ a Concessionária	Segurança dos Dados	Desagregação de Cargas
(SOUZA et al., 2020)	x	x	x	v	x	x	v
(GARCIA; SOUZA; MARAFAO, 2020)	v	x	x	x	x	x	v
(ZHANG et al., 2020)	v	x	x	v	v	x	x
(JIANG; WU, 2020)	v	x	v	v	v	x	x
(BHATI; KAKRAN, 2019)	v	v	v	v	v	x	x

Fonte: Autora.

Os métodos desenvolvidos consideram a principal prerrogativa de um HEMS que é a redução dos custos do consumo de energia elétrica garantindo o conforto do consumidor. Além disso, fica claro que a utilização desses métodos torna mais viável a inserção dos consumidores em programas de RD, já que o gerenciamento do consumo, na maioria dos modelos, é feito de forma automatizada sem a necessidade do controle periódico do

usuário.

Apesar dos benefícios dos modelos apresentados, nenhum deles trata da segurança dos dados dos usuários e da arquitetura de comunicações onde esses dados serão trafegados. Os métodos necessitam coletar dados de consumo e muitas vezes também receber dados de uma rede de dados externa à residência, como é o caso dos modelos que utilizam o preço atual da tarifa de energia. Os dados relacionados ao consumo de energia do usuário devem ser tratados como críticos, já que um indivíduo mal intencionado pode gerar sérios problemas, principalmente se o HEMS é também responsável pelo controle das *appliances* da residência.

A partir disso, algumas prerrogativas básicas de segurança da informação precisam ser consideradas na implementação dos sistemas de gerenciamento do consumo de energia elétrica. Essas prerrogativas são: autenticação, garante que as entidades participantes de uma comunicação sejam realmente quem dizem ser, isso impede que usuários interceptem a comunicação e hajam como se fizessem parte dela; integridade, deve garantir que a mensagem enviada por um emissor seja a mesma entregue ao receptor, um indivíduo mal intencionado poderia modificar informações de medição de consumo de energia, por exemplo; e, confidencialidade, que busca garantir que apenas o emissor e o receptor tenham conhecimento do real conteúdo das mensagens trocadas entre as partes (DIAS; RIZZETTI, 2021).

Os resultados obtidos em (SOUZA et al., 2020), mostram que a utilização de um protótipo de medidor cognitivo que foi ajustado para o projeto, demonstrou que o sistema alcançou o objetivo com a redução de consumo e a expectativa dos créditos durarem o tempo definido pelo consumidor. O medidor não-intrusivo de cargas proposto em (GARCIA; SOUZA; MARAFAO, 2020) mostrou-se capaz de ser incorporado em modernos medidores de energia cognitiva e pode auxiliar a fornecer informações sobre o uso de cargas para sistemas de gerenciamento de energia.

Com o controle direto de carga domésticas, o modelo apresentado em (ZHANG et al., 2020), teve resultados bastante positivos para o controle de custos do sistema, auxiliando a equilibrar o lucro dos clientes ao participar de programas de RD. O algoritmo proposto em (JIANG; WU, 2020) trouxe como resultado a maximização da eficiência econômica através da programação do tempo de funcionamento e a potência dos aparelhos elétricos na casa inteligente. Os resultados da simulação do modelo de otimização de (BHATI; KAKRAN, 2019), mostram que a técnica proposta minimiza o custo total do consumo de energia elétrica e proporciona benefícios econômicos considerando o nível de conforto dos usuários e proporciona um equilíbrio desejado entre a demanda de carga e a geração de energia não convencional mais a energia da rede.

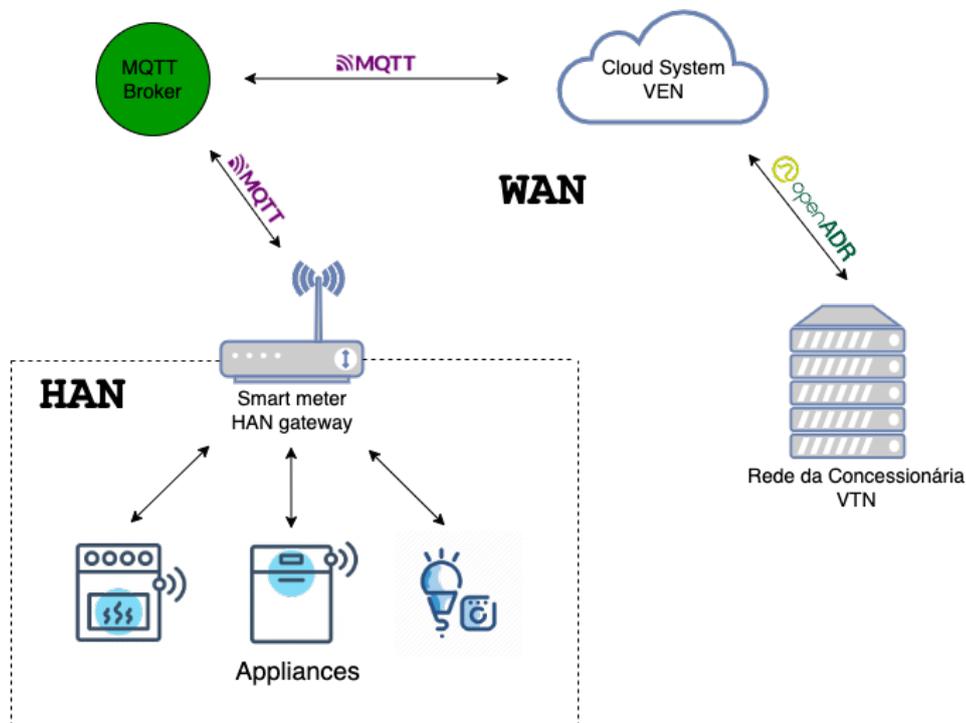
É imprescindível ressaltar que, como em qualquer situação em que haja comunicação entre dispositivos, algumas medidas de segurança devem ser tomadas para evitar que situações não esperadas aconteçam. A arquitetura proposta neste trabalho têm como

principais contribuições a aplicação de métodos que garantam as mínimas prerrogativas de segurança e a garantia de que as preferências do consumidor serão sempre atendidas, independentemente do programa de RD aplicado. A arquitetura assegura que o funcionamento da resposta da demanda automatizada seja algo confiável e escalável. Escalável ao ponto de ser expandido para outras aplicações como: indústrias, prédios, data centers, etc. Além de garantir o conforto do consumidor e a otimização do consumo de energia elétrica.

### 3 METODOLOGIA

Para a implementação do sistema de gerenciamento de cargas foi desenvolvida uma arquitetura segura, que tem como objetivo possibilitar a comunicação entre todos os agentes envolvidos no processo de resposta da demanda e o ambiente em nuvem desenvolvido para hospedar os algoritmos para gerenciamento das requisições de RD. A Figura 3.1 apresenta a arquitetura desenvolvida, com os elementos envolvidos no sistema, os protocolos de comunicação e sua organização dentro da AMI.

Figura 3.1 – Arquitetura implementada.



Fonte: Autora.

A arquitetura possui quatro elementos principais: o ambiente em nuvem, a concessionária de energia, o *broker* MQTT e a HAN do usuário. A seguir serão descritos o que cada um dos elementos representa dentro do sistema desenvolvido, bem como a integração com os demais elementos da arquitetura.

1. **Ambiente em nuvem:** O ambiente em nuvem do sistema foi implementado no serviço de hospedagem da Oracle, o *Oracle Cloud*. Consiste em uma máquina virtual com o sistema operacional Ubuntu Linux. A arquitetura do sistema em nuvem será definida em um trabalho futuro para que seja possível a adição de mais máquinas rodando o serviço ao mesmo tempo, aumentando assim a capacidade de processamento através da utilização de técnicas de balanceamento de carga e sistemas

distribuídos. O ambiente em nuvem é responsável por receber e armazenar os dados de preferências do usuário, bem como os estados atuais das cargas e potências de operação. Estes dados são utilizados para alimentar os algoritmos de otimização, que serão descritos no próximo capítulo, e tomar as decisões de acordo com as necessidades definidas pelo consumidor. Além disso, o VEN (cliente OpenADR) foi implementado no ambiente e é responsável por receber as requisições da concessionária (VTN) e enviá-las internamente para o processamento dos algoritmos.

2. **Rede da Concessionária:** A concessionária de energia também é representada por um ambiente virtual em redes de dados de domínios distintos. Basicamente, a concessionária é responsável por enviar as requisições de DR e atua como o VTN da implementação do OpenADR.
3. **Broker MQTT:** O broker MQTT é utilizado como servidor e centraliza as mensagens trocadas entre o ambiente em nuvem e a HAN do consumidor.
4. **HAN do Consumidor:** A HAN é composta pelo gateway da rede doméstica (*smart meter*) e as cargas controláveis (*smart appliances*) existentes. Se comunica diretamente com o ambiente em nuvem através do protocolo MQTT, enviando os dados estabelecidos pelo consumidor e recebendo os comandos de decisão dos algoritmos e atuando nas cargas.

Para a comunicação entre os elementos da arquitetura são utilizados dois protocolos principais: o OpenADR e o MQTT. O OpenADR foi utilizado para o gerenciamento das requisições de DR enviadas pela concessionária com destino à HAN do consumidor. A implementação prática do protocolo deu-se através de uma biblioteca desenvolvida na linguagem Python chamada OpenLEADR. O principal objetivo desta biblioteca é abstrair a complexidade do protocolo e tornar a implementação mais facilitada (CONTRIBUTORS, 2020).

Já o protocolo MQTT é utilizado na troca de informações entre o ambiente em nuvem e HAN do consumidor, visto que o VEN foi implementado diretamente no ambiente virtual não necessitando o uso do OpenADR dentro da HAN.

No que diz respeito à segurança, ambos os protocolos têm suporte à utilização da plataforma TLS. Desta forma, a implementação completa da arquitetura foi realizada através da autenticação dos elementos com a utilização de certificados digitais. Logo, as mensagens trocadas entre todas as partes são encriptadas, impossibilitando que usuários mal intencionados tenha acesso às mensagens trocadas dentro do sistema.

O Apêndice A traz os códigos de implementação do VEN e do VTN. E o Apêndice B desta dissertação apresenta a configuração do *broker* MQTT.

### 3.1 FORMALIZAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO PARA RD

O método para resposta da demanda dinâmica proposto neste trabalho, busca atender a redução do consumo das cargas levando em consideração as preferências e o conforto do consumidor. A partir disto, a função objetivo do modelo matemático é garantir o menor consumo de energia elétrica das cargas, tendo como restrições as prioridades definidas pelo consumidor conforme seu perfil.

Para isto, dois perfis diferentes de consumidores serão utilizados: consumidor que utiliza a modalidade da tarifa branca e o consumidor que participa de programas de resposta da demanda que tem como objetivo diminuir a carga em momentos críticos para o sistema elétrico.

#### 3.1.1 Cenário 1 - Participante de programas de RD

Neste cenário, cada consumidor possui sua curva de carga fornecida pela concessionária de energia. Então  $C_n(t)$  representa a curva de carga do consumidor  $n$  no tempo  $t$ . Logo, a carga total  $P_n^{tot}$  pode ser escrita como em 3.1:

$$P_n^{tot} = \sum_{t=1}^T C_n(t) \quad (3.1)$$

A requisição enviada pelo programa de Resposta da Demanda  $R_P(t)$  consiste na carga total, em W (*Watts*), que deve ser respeitada durante o evento. O objetivo deste modelo é minimizar o consumo de energia durante o evento de RD, respeitando a requisição de carga máxima recebida e, também, as prioridades e preferências definidas previamente. Desta forma, a função objetivo deste cenário é descrita em 3.2.

$$\text{Minimizar } P_n^{tot} = \sum_{t=1}^T C_n(t) \quad (3.2)$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\text{R1 } P_n^{tot} \geq 0;$$

$$\text{R2 } P_n^{tot} \leq R_P(t);$$

R3 Prioridades e preferências do consumidor devem ser levadas em consideração.

#### 3.1.2 Cenário 2 - Participante da modalidade Tarifa Branca

Na tarifa branca existem horários durante o dia, onde a tarifa de energia elétrica torna-se mais cara. Desta forma, o objetivo do método neste cenário é diminuir o consumo

de energia elétrica nos períodos onde o preço é mais elevado, mantendo as prioridades das cargas e preferências do consumidor.

A curva de carga do consumidor  $n$  no tempo  $t$   $C_n(t)$ , também é recebida como parâmetro. Logo, a carga total continua sendo o representado em (1).  $E_n(t)$  é a energia consumida pelo usuário  $n$  no tempo  $t$ . Então, o total de energia consumida no dia  $C_T(n)$  é definido em 3.3:

$$C_T(n) = \sum_{t=1}^T E_n(t) \quad (3.3)$$

A função objetivo 3.4 consiste na minimização do consumo de energia nos períodos em que o preço da tarifa de energia é mais elevado.

$$\text{Minimizar } C_T(n) = \sum_{t=1}^T E_n(t) \quad (3.4)$$

Sujeito às seguintes restrições:

$$\text{R1 } C_T(n) \leq P_n^{tot};$$

$$\text{R2 } P_n^{tot} \geq 0;$$

$$\text{R3 } E_n(t_{critico}) < E_n(t_{acritico});$$

R4 Prioridades e preferências do consumidor devem ser levadas em consideração.

A resolução dos problemas descritos nos dois cenários é feita através da aplicação de algoritmos de otimização, que serão apresentados na próxima seção deste artigo.

## 3.2 ALGORITMOS DE OTIMIZAÇÃO

Para chegar ao cenário ideal do consumo de energia elétrica, tanto para o caso da tarifa branca quanto para participantes de programas de RD, foram desenvolvidos dois algoritmos distintos, um para cada caso. Os algoritmos foram implementados utilizando a linguagem de programação Python.

O primeiro algoritmo tem o objetivo de auxiliar o consumidor no gerenciamento de suas cargas de acordo com os horários da tarifa branca definidos pela concessionária de energia. Onde, as cargas mais prioritárias de acordo com as preferências do usuário, podem estar em funcionamento em qualquer período do dia, não importando o valor da tarifa de energia. Já as cargas menos prioritárias, têm seus horários de funcionamento alterados para os horários onde a tarifa de energia se torna mais barata. A Figura 3.2 traz o fluxo de funcionamento do algoritmo aplicado ao cenário de utilização da tarifa branca.

Na primeira parte da execução do algoritmo, são definidos os horários de funcionamento das cargas, bem como as respectivas prioridades. Estes dados são determinados

de acordo com as preferências do usuário.

A prioridade das cargas é definida num intervalo de 0 a 2, onde 0 são as cargas mais prioritárias e devem ter seu horário de funcionamento respeitado, independente do valor da tarifa. Já as cargas de prioridade 1 podem ser desligadas somente durante o horário de ponta, e as cargas de prioridade 2, podem ser desligadas tanto no horário de ponta quanto no horário intermediário da tarifa branca.

Após a definição destas variáveis é feita a chamada da função *scheduler*, responsável por agendar o horário de funcionamento e desligamento das cargas conforme definição do consumidor. O algoritmo está sempre monitorando caso o consumidor ligue alguma carga fora do horário planejado. Caso isso aconteça, a prioridade daquela carga recém é acionada é alterada para 0, considerada de altíssima prioridade para o consumidor já que recém foi acionada.

É feita a checagem dos períodos da tarifa branca (ponta, intermediário e fora de ponta), conforme definição realizada no início do algoritmo seguindo o padrão utilizado pela concessionária de energia que fornece o serviço ao consumidor. Caso alguma carga esteja em funcionamento fora do horário permitido para sua prioridade, a mesma é desligada.

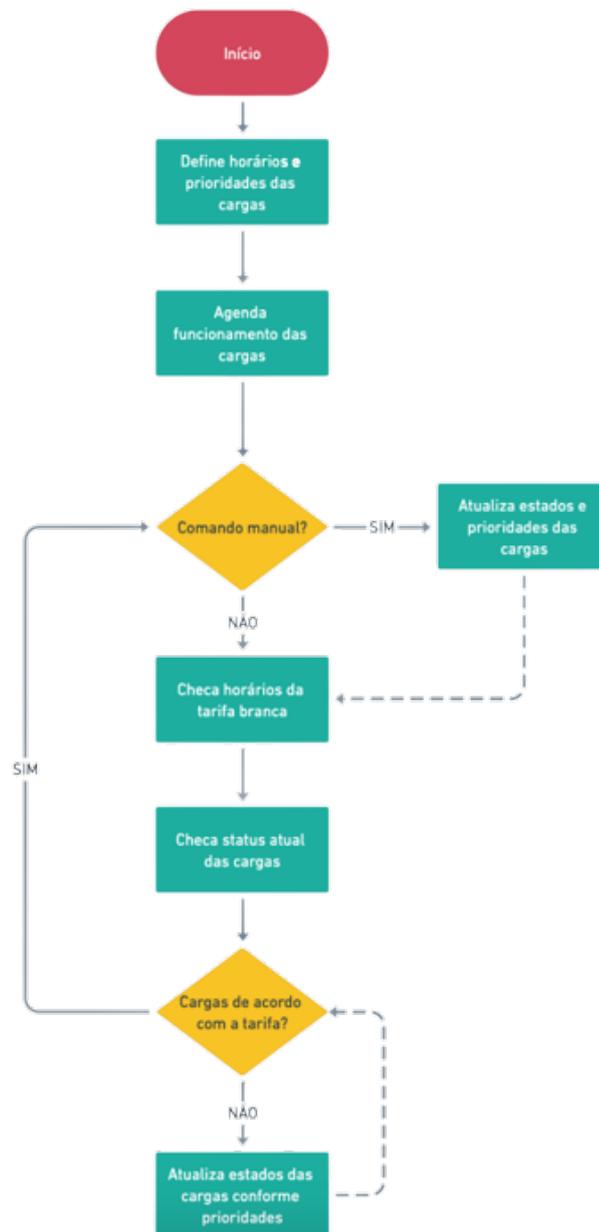
É possível observar que o algoritmo roda em um *loop*, onde a checagem do recebimento de algum comando manual e também dos períodos da tarifa branca. Caso algo esteja fora do objetivo final de minimização do custo com o consumo de energia, o algoritmo toma as ações necessárias de forma automática.

O algoritmo aplicado ao cenário do consumidor participante de programa de resposta da demanda, é bastante similar ao anterior. Ambos consideram as prioridades e os horários de funcionamento das cargas definidos pelo consumidor. A Figura 3.3 traz o fluxo de funcionamento do algoritmo aplicado ao cenário de RD. A principal diferença entre o algoritmo de RD e do cenário de tarifa branca é a verificação do recebimento de alguma requisição de RD enviada pela concessionária de energia, e não é realizada a verificação dos horários relativos às definições de períodos da tarifa branca.

Quando é recebida alguma requisição de RD contendo a porcentagem de potência a ser reduzida no período, o algoritmo automaticamente calcula a potência atual total das cargas que estão em funcionamento. Se a potência atual é maior que a requisição recebida, as cargas de menor prioridade começam a ser desligadas até que a potência seja menor ou igual ao recebido na requisição. Na possibilidade de ser necessário desligar alguma carga de prioridade 0 para atender a requisição da concessionária, uma resposta de declino na participação do evento de DR enviada, já que as cargas de prioridade 0 nunca são desligadas automaticamente.

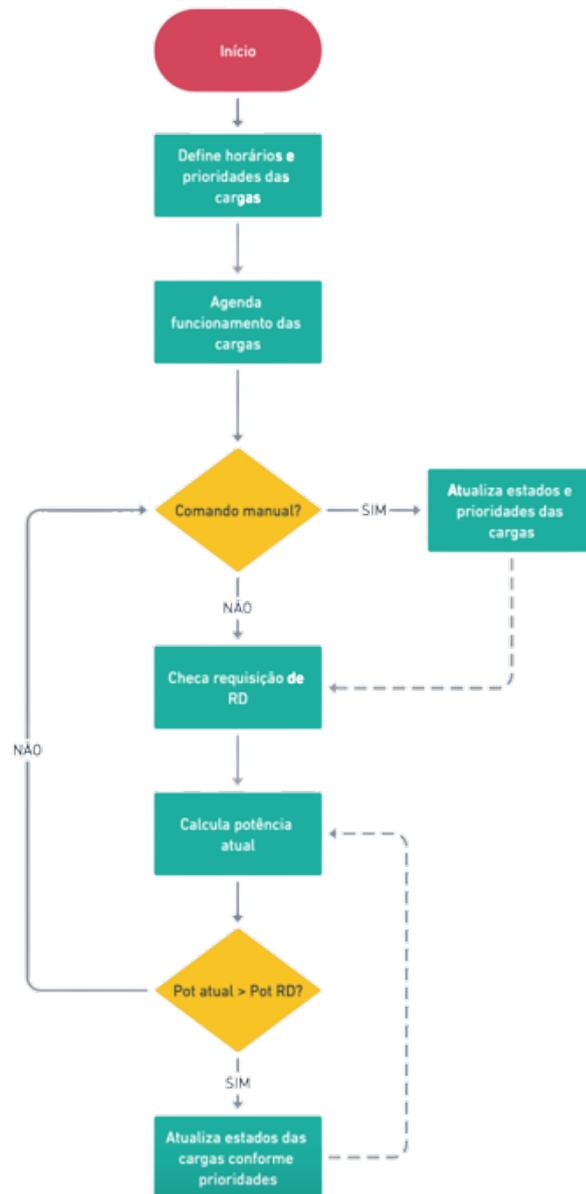
A seguir serão apresentados os testes realizados com os algoritmos desenvolvidos, bem como os resultados obtidos após as simulações.

Figura 3.2 – Algoritmo cenário de tarifa branca.



Fonte: Autora.

Figura 3.3 – Algoritmo cenário de resposta da demanda.



Fonte: Autora.

## 4 CENÁRIOS DE TESTES E RESULTADOS

Para a validação dos algoritmos desenvolvidos foi utilizado um cenário de testes contendo sete cargas controláveis. Estas cargas podem ter seus horários de funcionamento alterados, diferentemente de um refrigerador, por exemplo, que tem funcionamento obrigatório durante as 24 horas do dia (carga não-controlável).

Na Tabela 4.1 são descritas as cargas controláveis utilizadas no cenário de testes com as informações do horário de funcionamento, prioridade e potência média por equipamento.

Tabela 4.1 – Cenário de testes.

Aparelho Elétrico	Potência Média	Utilização	Prioridade
Ar-condicionado	2640W	23h às 7h	1
Computador	300W	8h às 17h	0
Chuveiro	5500W	19h às 19h30	2
Televisão	120W	18h às 23h	1
Lavadora de roupas	1000W	7h30 às 8h30	2
Forno micro-ondas	450W	12h às 12h30	1
Forno elétrico	3500W	11h às 12h	1

Fonte: Autora.

Os testes foram feitos seguindo o fluxo padrão, sem a inserção de comandos manuais pelo usuário. Os algoritmos não impedem que o consumidor ligue os equipamentos em horários distintos dos que foram definidos em suas preferências. Caso as cargas sejam ligadas fora dos horários definidos, as prioridades são atualizadas e a programação para ligar determinada carga é desfeita. Abaixo serão descritos os testes e apresentados os resultados dos dois cenários, participante do programa da tarifa branca e participante de programas de RD.

### 4.1 CENÁRIO 1 - TARIFA BRANCA

Para o cenário da tarifa branca foram considerados os períodos padrões utilizados pela concessionária RGE Sul (RGE, 2022), onde:

- Horário Fora de Ponta: 22h00 às 15h59;
- Horário de Ponta: 18h00 às 20h59;
- Horário Intermediário: 16h00 às 17h59 e 21h00 às 21h59.

Figura 4.1 – Curva de carga padrão.



Fonte: Autora.

Para a simulação foram utilizadas as cargas apresentadas na Tabela 4.1, seguindo os horários e as prioridades pré-definidas pelo consumidor. No gráfico da Figura 4.1 é apresentado o comportamento padrão da curva de carga do consumidor, sem a utilização de nenhum algoritmo de controle.

Sem nenhum controle aplicado, seguindo o comportamento de consumo padrão do usuário, é possível observar que o pico de consumo ocorre entre às 18h e 20h. Seguindo as definições da tarifa branca da RGE Sul, esse período está exatamente dentro do Horário de Ponta, onde o custo de energia é o mais caro durante o dia.

No caso descrito, evidencia-se a necessidade da utilização de um controle para que as cargas menos prioritárias sejam migradas para períodos onde a tarifa de energia é mais barata.

Na Figura 4.2 é apresentada a curva de carga com a utilização do algoritmo de controle aplicado exclusivamente ao cenário da tarifa branca.

É possível observar que com a utilização do controle, o pico de consumo tem seu período alterado e fica entre às 21h e 23h, fora do horário de ponta. Dessa forma, levando em consideração que o custo da tarifa de energia no horário de ponta é R\$1,115 por Kwh consumido, do horário intermediário R\$0,724 e do horário fora de ponta R\$0,499 fica evidenciado que o custo de energia elétrica com a aplicação do algoritmo torna-se menor. Logo, a minimização do custo com energia elétrica é alcançada seguindo as preferências do consumidor através da definição das prioridades das cargas.

Figura 4.2 – Curva de carga - controle tarifa branca.



Fonte: Autora.

#### 4.2 CENÁRIO 2 - PROGRAMAS DE RESPOSTA DA DEMANDA

Neste cenário, o horário de funcionamento das cargas não se torna tão relevante, já que o objetivo é atender as requisições de RD da concessionária de energia. No cenário de testes, estas requisições são recebidas pelo VEN, através de eventos da categoria SIMPLE/level enviados pelo VTN. Em termos de simulação foi definido que quando o *payload* do evento for 1, deve ser realizada uma diminuição de 10% do consumo no intervalo definido no evento. Caso seja recebido o valor 2, a diminuição deverá ser de 20%. E, por fim, no caso especial 3, a redução deverá ser de 40%.

Quando um evento é recebido pelo VEN, os dados da requisição recebida são enviados para o algoritmo e são iniciados os cálculos necessários. As definições do usuário são verificadas e caso seja necessário desligar alguma carga prioritária para alcançar a diminuição de consumo solicitada, a participação do evento de DR é declinada. Ao contrário, se a diminuição puder ser alcançada desligando cargas que estejam de acordo com as definições do consumidor, a participação no evento é confirmada através da resposta do VEN ao VTN.

A Figura 4.3 apresenta um evento de DR criado no VTN. O resultado da utilização do algoritmo para atender a requisição apresentada neste evento, pode ser observado na curva de carga apresentada na Figura 4.4.

Observa-se que no período recebido na requisição, iniciando-se às 7h e com duração de 60 minutos, a potência total das cargas foi reduzida em no mínimo 10% no início do evento e continuou dentro do esperado pelos 60 minutos seguintes. E, logo após o período

Figura 4.3 – Evento de RD no OpenADR.

```
server.add_event(ven_id="ven_id_123",
                 signal_name="simple",
                 signal_type="level",
                 intervals=[{"dtstart": datetime(2022, 6, 24, 7, 0, 0,
                                                tzinfo=timezone.utc),
                             "duration": timedelta(minutes=60),
                             "signal_payload": 1}],
                 callback=event_response_callback)
```

Fonte: Autora.

Figura 4.4 – Curva de carga - controle RD.



Fonte: Autora.

(a partir das 8h), as cargas voltam a seu funcionamento sempre respeitando as prioridades definidas pelo consumidor.

Nota-se que ambos os algoritmos desenvolvidos alcançaram seus objetivos. A minimização do consumo nos períodos necessários foi alcançada respeitando todas as restrições da modelagem da otimização.

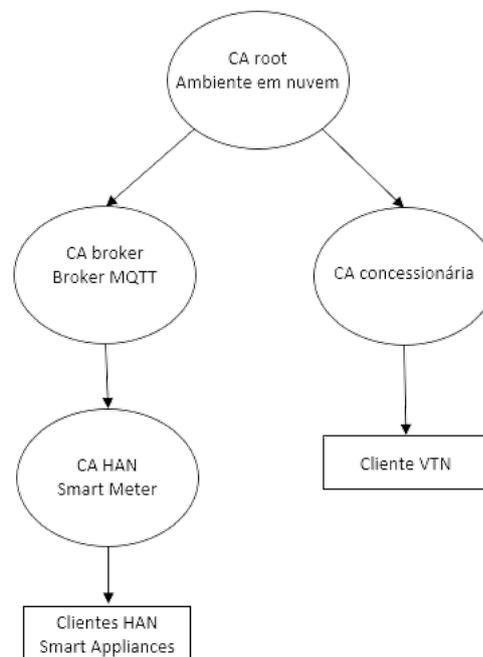
### 4.3 TESTES DE SEGURANÇA

Ambos os cenários de testes foram implementados utilizando a arquitetura segura descrita anteriormente. A segurança dos dados foi implementada através da utilização do

protocolo TLS com certificados digitais para autenticação, das partes envolvidas, tanto nas comunicações utilizando o protocolo MQTT quanto no OpenADR.

A criação dos certificados digitais deu-se através da implementação do cenário apresentado na Figura 4.5. A arquitetura para distribuição dos certificados digitais é composta pela CA (entidade certificadora) Root que foi implementada no ambiente em nuvem, duas CAs intermediárias de nível 1 representando a rede da concessionária de energia e o *broker* MQTT. No caso do *broker* há ainda uma CA intermediária de nível 2 representando a HAN do usuário. A CA da HAN é responsável por distribuir os certificados digitais de todas as *smart appliances* que existem na residência. Já a CA da concessionária é responsável por distribuir o certificado para o VTN da comunicação OpenADR.

Figura 4.5 – Distribuição dos certificados digitais.



Fonte: Autora.

Para validação da arquitetura, principalmente ao que diz respeito à segurança das informações trafegadas, também foram realizados testes para verificação da confidencialidade dos dados trocados entre as requisições. Através do *sniffer* de rede Wireshark foi feita a captura dos pacotes da comunicação. Essa captura foi realizada em dois cenários distintos: com a utilização do TLS e sem a utilização.

Quando não é utilizado nenhum tipo de ferramenta de segurança e a comunicação é interceptada por algum agente externo, tanto o tópico MQTT quando o conteúdo da mensagem é visualizado em texto plano, ou seja, o conteúdo real do que foi enviado. Na Figura 4.6 é possível observar a tela do *software Wireshark* com a captura da comunicação MQTT sem a utilização de nenhuma técnica de segurança.

Figura 4.6 – Comunicação MQTT sem segurança.

```

> Frame 239: 82 bytes on wire (656 bits), 82 bytes captured (656 bits) on interface en0, id 0
> Ethernet II, Src: Apple_30:5f:d6 (3c:a6:f6:30:5f:d6), Dst: Shenzhen_2c:01:f1 (c0:25:2f:2c:01:f1)
> Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.1.101, Dst: 152.70.209.252
> Transmission Control Protocol, Src Port: 58413, Dst Port: 1883, Seq: 1, Ack: 1, Len: 16
< MQ Telemetry Transport Protocol, Publish Message
  > [Expert Info (Note/Protocol): Unknown version (missing the CONNECT packet?)]
  > Header Flags: 0x30, Message Type: Publish Message, QoS Level: At most once delivery (Fire and Forget)
  Msg Len: 14
  Topic Length: 8
  Topic: demo/one
  Message: 35303030

```

Fonte: Autora.

Tanto o tópico quanto o conteúdo da mensagem pode ser visto. Logo, a interceptação das mensagens trocadas na comunicação, como informações de consumo dos equipamentos e até comandos enviados às *appliances*, ficam visíveis com o simples uso de um *sniffer* de rede, possibilitando que usuários mal intencionados possam fazer uso ilícito destas informações.

Figura 4.7 – Comunicação MQTT com segurança.

```

> Frame 156: 92 bytes on wire (736 bits), 92 bytes captured (736 bits) on interface en0, id 0
> Ethernet II, Src: Shenzhen_2c:01:f1 (c0:25:2f:2c:01:f1), Dst: Apple_30:5f:d6 (3c:a6:f6:30:5f:d6)
> Internet Protocol Version 4, Src: 152.70.209.252, Dst: 192.168.1.101
> Transmission Control Protocol, Src Port: 8883, Dst Port: 51458, Seq: 5076, Ack: 428, Len: 26
< Transport Layer Security
  < TLSv1.3 Record Layer: Application Data Protocol: mqtt
    Opaque Type: Application Data (23)
    Version: TLS 1.2 (0x0303)
    Length: 21
    Encrypted Application Data: 1a057b5ef5b681d4ed930066e8d9195b6154db94f5
    [Application Data Protocol: mqtt]

```

```

0000 3c a6 f6 30 5f d6 c0 25 2f 2c 01 f1 08 00 45 00 < . 0 _ . % / , . . . E .
0010 00 4e 3b 40 40 00 39 06 da 19 98 46 d1 fc c0 a8 . N ; @ 9 . . . . F . . .
0020 01 65 22 b3 c9 02 fd 3e 49 25 51 94 aa 96 80 18 . e " . . . . > I % Q . . . .
0030 01 e7 cd ea 00 00 01 01 08 0a bc b7 df cf d8 46 . . . . . . . . . . F
0040 a0 33 17 03 03 00 15 1a 05 7b 5e f5 b6 81 d4 ed . 3 . . . . . { ^ . . . .
0050 93 00 66 e8 d9 19 5b 61 54 db 94 f5 . . f . . . [ a T . . .

```

Fonte: Autora.

Já na Figura 4.7, a comunicação interceptada faz o uso do protocolo de segurança TLS e como pode ser observado, as informações estão encriptadas. Sendo assim, qualquer agente que intercepte as mensagens trocadas não tem acesso ao real conteúdo das mesmas.

Quanto ao protocolo OpenADR, a biblioteca utilizada neste trabalho, usa o HTTP para a transferência de dados. A utilização do TLS se dá sobre o HTTP, assim as mensagens trocadas são encriptadas e a confidencialidade do seu conteúdo é garantida. Na

Figura 4.8 é possível observar a captura de um pacote da comunicação utilizando o HTTP seguro para troca de informações do OpenADR.

Figura 4.8 – Comunicação OpenADR com segurança.

```
> Frame 176: 104 bytes on wire (832 bits), 104 bytes captured (832 bits) on interface en9, id 0
> Ethernet II, Src: Routerbo_09:7e:6c (b8:69:f4:09:7e:6c), Dst: Luxshare_6a:c8:46 (60:6d:3c:6a:c8:46)
> Internet Protocol Version 4, Src: 157.240.19.53, Dst: 173.230.89.18
> Transmission Control Protocol, Src Port: 443, Dst Port: 51453, Seq: 1, Ack: 32, Len: 38
> Transport Layer Security
  > TLSv1.2 Record Layer: Application Data Protocol: http-over-tls
0000  60 6d 3c 6a c8 46 b8 69  f4 09 7e 6c 08 00 45 00  `m<j.F.i .~l.E.
0010  00 5a 5b 67 40 00 5a 06  0d 19 9d f0 13 35 ad e6  .Z[g@Z. ....5..
0020  59 12 01 bb c8 fd 0e 83  f8 33 a7 db 0b 57 80 18  Y..... 3..W..
0030  03 01 d6 1a 00 00 01 01  08 0a 47 9b a4 2f ef 55  .....G../U
0040  c2 4d 17 03 03 00 21 b2  d8 4e 70 ed 38 38 cc 60  .M.....!..Np.88.~
0050  2b ae 55 81 70 12 2f 00  ea 67 f8 38 62 74 e5 7e  +.U.p/. .g.8bt~
0060  50 ec 93 8a 41 1c c9 50  P...A.P
```

Fonte: Autora.

A utilização dos protocolos com suas prerrogativas de segurança garante que as informações trocadas durante toda comunicação, sejam mantidas seguras e confidenciais. A arquitetura desenvolvida garante que, mesmo com a utilização de protocolos distintos, o processo de gerenciamento das cargas seja feito de forma robusta e eficiente. Além disso, garante que as necessidades do consumidor sejam atendidas ao mesmo tempo que assegura a participação nos programas da concessionária/distribuidora de energia.

## 5 CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a implementação de algoritmos de otimização para gerenciamento de cargas residenciais, em consumidores participantes de programas de Resposta da Demanda e da modalidade da Tarifa Branca de energia. Além de trazer a implementação destes métodos dentro de uma arquitetura que trata os dados de forma segura, garantindo a confidencialidade das informações trocadas entre as partes.

O gerenciamento do consumo de energia é uma tarefa bastante complexa. Garantir que a otimização do funcionamento das cargas para que o consumo seja o mínimo possível, torna o processo bastante particularizado, ainda mais em casos onde as preferências e conforto do usuário são levadas em consideração.

Os programas de Resposta da Demanda existentes permitem que os consumidores possam minimizar os custos de consumo de energia elétrica, além de permitir às distribuidoras de energia que possam suprir as demandas em momentos críticos do sistema. Com o surgimento das *Smart Grids*, a aplicação de algoritmos tornou o processo de gerenciamento totalmente automatizado, onde o consumidor necessita somente definir suas preferências e deixar que o modelo controle todas as cargas sem a necessidade de qualquer interferência. Desta forma, os problemas de otimização têm papel fundamental na criação de um algoritmo de controle para o gerenciamento de cargas.

Os algoritmos desenvolvidos e apresentados neste trabalho tratam de cenários distintos, possibilitando uma maior flexibilidade ao consumidor. Vale ressaltar que os algoritmos são somente uma das partes necessárias para implementação do controle das cargas. É imprescindível ter em mente, que há a necessidade de uma infraestrutura bastante complexa para a aplicação destes controles em uma residência. Uma rede de comunicação, como a arquitetura apresentada, é fundamental para que seja possível receber as requisições da concessionária de energia, logo a segurança dos dados trafegados também é um dos pontos críticos a serem considerados.

A arquitetura implementada com a utilização dos protocolos de comunicação MQTT e OpenADR mostrou-se bastante confiável. Os testes de segurança mostraram que os dados trafegados nas requisições e respostas são encriptados, impossibilitando o uso mal intencionado dessas informações. Além disso, a arquitetura traz uma robustez ao sistema como um todo, já que é possível adicionar vários consumidores, realizando a automatização de um conjunto de residências com a implementação de múltiplos VENS.

É imprescindível ressaltar que, como em qualquer situação em que haja comunicação entre dispositivos, algumas medidas de segurança devem ser tomadas para evitar que situações não esperadas aconteçam. A aplicação de métodos que garantam as mínimas prerrogativas de segurança é essencial para que o funcionamento da resposta da demanda automatizada seja algo confiável e escalável. Escalável ao ponto de ser expandido para

outras aplicações como: indústrias, prédios, data centers, entre outros. Qualquer cenário onde haja a utilização de eletricidade pode tornar-se um potencial participante de programas de resposta da demanda e é importante garantir que o gerenciamento do consumo seja feito de forma eficiente e segura.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Futuramente pretende-se adicionar aos algoritmos a funcionalidade de identificar o comportamento do usuário de forma autônoma, através do seu comportamento usual. Técnicas de aprendizado de máquina (*machine learning*) serão adicionadas aos algoritmos, possibilitando esse fluxo contínuo de evolução em relação às preferências do consumidor.

Além das melhorias nos algoritmos, a inserção de novos cenários também será adotada no futuro. Cenários como, por exemplo, onde o consumidor possua micro-geração distribuída, fazendo com que a minimização do consumo seja também feita em períodos em que a geração esteja mais baixa, totalmente de forma automatizada. Além disso, criar uma arquitetura em nuvem mais versátil que permita a escalabilidade do sistema levando em consideração a inserção de diversas concessionárias de energia e consumidores. Outro ponto a ser implementado é uma interface, onde o consumidor possa inserir os parâmetros desejados, como horário de funcionamento das cargas, prioridades e também poder monitorar o consumo em tempo real, bem como ter uma estimativa dos custos. E ainda, que possa emitir alertas configuráveis, mesmo fora de eventos de RD, caso o consumo esteja acima de um valor pré-determinado, por exemplo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALONSO, J. I. G. et al. Flexibility services based on openadr protocol for dso level. **Sensors (Switzerland)**, v. 20, n. 21, p. 1–24, 2020.
- ARUN, S. L.; SELVAN, M. P. for Dynamic Demand Response in Smart Buildings. **IEEE Systems Journal**, IEEE, v. 12, n. 2, p. 1329–1340, 2018.
- BASNET, S. M.; ABURUB, H.; JEWELL, W. Residential Demand Response Program: Virtual Storage Model and Its Optimization. **2018 IEEE Conference on Technologies for Sustainability, SusTech 2018**, v. 23, n. April, p. 183–194, 2019.
- BHATI, N.; KAKRAN, S. Smart Home Energy Management with Integration of Renewable Energy. **Proceedings of the 2nd International Conference on Intelligent Computing and Control Systems, ICICCS 2018**, IEEE, n. Iciccs, p. 1785–1789, 2019.
- BRENNAN, L. **API Builder and MQTT for IoT Part 1**. 2018. <https://www.appcelerator.com/blog/2018/03/api-builder-and-mqtt-for-iot-part-1/>. Acessado em Novembro/2018.
- CGEE. Redes Elétricas Inteligentes: Contexto Nacional. **Centro de Gestão e Estudos Estratégicos**, v. 16, p. 172, 2012. Disponível em: <[http://www.cgee.org.br/publicacoes/documentos\\_tecnicos.php](http://www.cgee.org.br/publicacoes/documentos_tecnicos.php)>.
- COIMBRA, M.; JÚNIOR, W.; CHANTRE, C. **O Estado da Arte da Resposta da Demanda no Brasil**. [S.l.], 2021.
- CONTRIBUTORS, O. **Welcome to OpenLEADR**. 2020. <https://openleadr.org/docs/index.html>. Acessado em Junho/2022.
- DIAS, L.; RIZZETTI, T. A. A Review of Privacy-Preserving Aggregation Schemes for Smart Grid. **IEEE Latin America Transactions**, v. 19, n. 7, p. 1109–1120, 2021. ISSN 15480992.
- DIERKS, T.; RESCORLA, E. **The Transport Layer Security (TLS) Protocol**. 2008. <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc5246>. Acessado em Junho/2022.
- EKANAYAKE, J. et al. **Smart Grid: Technology and Applications**. [S.l.: s.n.], 2012. ISBN 9780470974094.
- EPE. **Resposta da Demanda: Conceitos, Aspectos Regulatórios e Planejamento Energético**. [S.l.], 2019.
- FERNANDES, F. et al. Dynamic load management in a smart home to participate in demand response events. **Energy and Buildings**, v. 82, p. 592–606, 2014. ISSN 03787788.
- GARCIA, F. D.; SOUZA, W. A. D.; MARAFAO, F. P. Embedded NILM as Home Energy Management System: A Heterogeneous Computing Approach. **IEEE Latin America Transactions**, v. 18, n. 2, p. 360–367, 2020. ISSN 15480992.
- JIANG, X.; WU, L. A residential load scheduling based on cost efficiency and consumer's preference for demand response in smart grid. **Electric Power Systems Research**, v. 186, p. 106410, 09 2020.

MULLER, G. d. M. **Impacto de novas tecnologias e smart grids na demanda de longo prazo do elétrico brasileiro.** [S.l.], 2016.

OEB. **Regulated Price Plan Manual Ontario Energy Board.** [S.l.], 2020.

OGUNJUYIGBE, A. S. et al. **Design and Implementation of an Energy Auto Crediting Scheme for Prepaid Energy Meters.** 2021. 1-6 p.

PAREJO, A. et al. Openadr and agreement audit architecture for a complete cycle of a flexibility solution. **Sensors (Switzerland)**, v. 21, n. 4, p. 1–21, 2021. ISSN 14248220.

PAWITPANICH, N.; PORA, W.; PANITANTUM, N. A single-phase smart meter with autocalibration and load control conformed to OpenADR protocol. In: **ECTI-CON 2021 - 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology: Smart Electrical System and Technology, Proceedings.** [S.l.]: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. p. 870–873. ISBN 9780738111278.

PONNUSAMY, K.; RAJAGOPALAN, N. Internet of things: A survey on iot protocol standards. **Advances in Intelligent Systems and Computing**, v. 564, p. 651–663, 2017.

RGE. **Tarifa Branca.** 2022. <<https://servicosonline.cpfl.com.br/agencia-webapp/#/migracao-tarifaria-informativo>>. Acessado: 25-04-2022.

SOUZA, W. A. et al. Automatic Consumption Management for Prepaid Electricity Meter with NILM. **IEEE Latin America Transactions**, v. 18, n. 6, p. 1102–1110, 2020. ISSN 15480992.

SOUZA, Z. F. d. A importância da reação da demanda na formação dos preços de curto prazo em mercados de energia elétrica. 2010.

STALLINGS, W.; BROWN, L. **Segurança de Computadores: Princípios e Práticas.** [S.l.]: LTC, 2014. 744 p.

TUBALLA, M. L.; ABUNDO, M. L. **A review of the development of Smart Grid technologies.** 2016. 710–725 p.

VÁZQUEZ-CANTELI, J. R.; NAGY, Z. Reinforcement learning for demand response: A review of algorithms and modeling techniques. **Applied Energy**, Elsevier, v. 235, n. April 2018, p. 1072–1089, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.11.002>>.

VIZZOTTO, W. D. et al. Advanced Metering Infrastructure Case Study in Federal University of Santa Maria. **2019 IEEE PES Conference on Innovative Smart Grid Technologies, ISGT Latin America 2019**, p. 5–10, 2019.

YAN, Y. et al. A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges. **IEEE COMMUNICATIONS SURVEYS TUTORIALS**, Hsinchu, TAIWAN, v. 15, n. 1, p. 15–22, 2013.

YUAN, M. **Conhecendo o MQTT.** 2017. <https://www.ibm.com/developerworks/br/library/iot-mqtt-why-good-for-iot/iot-mqtt-why-good-for-iot-pdf.pdf>. Acessado em Novembro/2018.

ZHANG, Z. et al. Survey-based air-conditioning demand response for critical peak reduction considering residential consumption behaviors. **Energy Reports**, v. 6, p. 3303–3315, 2020. ISSN 23524847.

ZHOU, X. et al. Summary of smart metering and smart grid communication. **2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)**, p. 300–304, 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8015832/>>.

## **APÊNDICE A – IMPLEMENTAÇÃO DO OPENADR**

Os códigos Python de implementação do VEN e do VTN utilizados neste trabalho encontram-se no GitHub. Acesso disponível <https://github.com/larissasouto/openadr-ppgee>.

## APÊNDICE B – CONFIGURAÇÃO DO BROKER MQTT

Configuração do *broker* MQTT para utilização do TLS a partir dos certificados digitais gerados.

```
port 1883
log_type error
log_type notice
log_type information
log_type debug

listener 8883

#ssl settings
cafile /etc/mosquitto/certs/ca.crt
keyfile /etc/mosquitto/certs/server.key
certfile /etc/mosquitto/certs/server.crt

#client certificate settings
require_certificate true
```