

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL – UCS  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DA REGIÃO DOS VINHEDOS – CARVI  
ÁREA DO CONHECIMENTO DE CIÊNCIAS EXATAS E ENGENHARIAS  
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

**JONAS EDUARDO ROOCKS**

**GERENCIAMENTO DE RESPOSTA A DEMANDA RESIDENCIAL UTILIZANDO  
ALGORITMO GENÉTICO**

**BENTO GONÇALVES**

**2019**

**JONAS EDUARDO ROOCKS**

**GERENCIAMENTO DE RESPOSTA A DEMANDA RESIDENCIAL UTILIZANDO  
ALGORITMO GENÉTICO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica pela Universidade de Caxias do Sul.

Orientador:

Prof. Me. André Bernardes Michel

**BENTO GONÇALVES**

**2019**

**JONAS EDUARDO ROOCKS**

**GERENCIAMENTO DE RESPOSTA A DEMANDA RESIDENCIAL UTILIZANDO  
ALGORITMO GENÉTICO**

Trabalho de conclusão de curso  
apresentado como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Elétrica pela Universidade de  
Caxias do Sul.

**Aprovado em** \_\_/\_\_/\_\_\_\_

**Banca Examinadora:**

-----  
Prof. Me. André Bernardes Michel (orientador)  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

-----  
Prof. Me. Cícero Zanoni  
Universidade de Caxias do Sul - UCS

-----  
Prof. Me. Jaime Andre Back  
Universidade de Caxias do Sul – UCS

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais, Paulo Rooks e Dalva Fries Rooks, pelo apoio e incentivo para a minha educação.

A minha namorada, Janaina Bach, pelo carinho, pela paciência e por estar sempre ao meu lado me apoiando durante a execução desse trabalho.

Ao meu orientador, André Bernardes Michel, pelos ensinamentos e incentivo que tornaram possível a conclusão deste trabalho.

A todos os professores do curso, que foram tão importantes na minha vida acadêmica.

A todos aqueles que de alguma forma estiveram e estão próximos de mim, fazendo esta vida valer cada vez mais a pena.

*“Os obstáculos são aquelas coisas terríveis que você vê quando desvia os olhos do seu objetivo.”*

**(Henry Ford)**

## RESUMO

A oferta e a demanda de energia elétrica precisam ser balanceadas simultaneamente. Para garantir a sustentação da oferta, a capacidade total de geração de eletricidade deve ser maior que a demanda máxima prevista. Nos últimos anos, a demanda por eletricidade está aumentando a cada ano, e as construções de novas usinas de energia estão sendo barradas devido ao custo econômico e ambiental. Um método para adiar ou até evitar certos investimentos, são os Programas de Resposta a Demanda. Seu propósito é modificar o consumo de energia, modelando as cargas do sistema para preencher os vales e diminuir os picos da carga de consumo, tornando assim, o sistema de energia mais eficiente. Desta forma, este trabalho apresenta o desenvolvimento de um algoritmo genético capaz de gerenciar um sistema de resposta a demanda residencial. Para tanto, foi necessário gerar os modelos de consumo das residências, sendo esses baseados em dados reais adquiridos por meio de diversos estudos de hábitos de uso de consumidores, caracterização de cargas, potência de equipamentos e padrões de utilização diária. Como estratégia de resposta a demanda foi utilizada a realocação de cargas, dentro de um horizonte de 24 horas, combinada com a tarifação dinâmica de energia, tendo seus valores variados com base na curva de carga nacional. O trabalho foi realizado utilizando o *software* Matlab. Diante disso, verificou-se que o algoritmo foi capaz de reduzir o custo total de energia em 16,40% para 100 consumidores, divididos em 5 faixas de consumo, o que impõe a constatação de que a metodologia utilizada produziu um impacto positivo no custo total de energia.

**Palavras-chave:** Resposta a demanda. Algoritmos genéticos. Gerenciamento pelo lado da demanda. Deslocamento de cargas.

## ABSTRACT

Electricity supply and demand need to be balanced simultaneously. To ensure sustained supply, the total electricity generation capacity must be greater than the expected maximum demand. In recent years, the demand for electricity is increasing every year, and the construction of new power plants is being barred due to the economic and environmental cost. One method for delaying or even avoiding certain investments are Demand Response Programs. Its purpose is to modify energy consumption by modeling system loads to fill the valleys and reducing peak consumption loads, thus making the energy system more efficient. Thus, this paper presents the development of a genetic algorithm capable of managing a residential demand response system. Therefore, it was necessary to generate household consumption models, which are based on real data acquired through various studies of consumer usage habits, load characterization, equipment power and daily use patterns. As a demand response strategy, load reallocation within a 24-hour horizon was used, combined with dynamic energy pricing, and its values varied based on the national load curve. The work was performed using Matlab software. Given this, it was found that the algorithm was able to reduce the total cost of energy by 16,40% for 100 consumers, divided into 5 consumption ranges, which requires that the methodology used had a positive impact on the total energy cost.

**Keywords:** Demand response. Genetic algorithms. Demand side management. Load Shifting.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Smart Grid.....	16
Figura 2 - Participação dos eletrodomésticos no consumo residencial do Brasil .....	20
Figura 3 - Curva de carga diária média no Brasil .....	20
Figura 4 - Participação no consumo final de eletricidade por equipamento residencial .....	24
Figura 5 - Perfil típico da carga do SIN .....	25
Figura 6 - Comparativo entre Tarifa Branca e Convencional .....	28
Figura 7 - Programas de resposta a demanda .....	30
Figura 8 - Estratégias de gerenciamento da demanda.....	34
Figura 9 - Espaço de busca e região factível .....	36
Figura 10 - Função multimodal.....	37
Figura 11 - Pseudocódigo de um algoritmo genético .....	38
Figura 12 - Esquema de um algoritmo genético.....	39
Figura 13 - Esquema da Roleta.....	42
Figura 14 - Exemplo de seleção pelo método do torneio .....	43
Figura 15 - Exemplo de cruzamento .....	44
Figura 16 - Funcionamento do <i>crossover</i> uniforme .....	45
Figura 17 - Exemplo de mutação .....	45
Figura 18 – Fluxograma do sistema proposto .....	53
Figura 19 - Curva de consumo da faixa de 101- 200kWh .....	57
Figura 20 - Curva de consumo da faixa de 201- 300kWh .....	58
Figura 21 - Curva de consumo da faixa de 301- 400kWh .....	59
Figura 22 - Curva de consumo da faixa de 401- 500kWh .....	60
Figura 23 - Curva de consumo da faixa de 501- 1000kWh .....	61
Figura 24 - Curva de carga dos consumidores.....	63
Figura 25 - Curva de carga nacional (inverno) .....	67
Figura 26 - Tarifas de energia por hora.....	68
Figura 27 - Estrutura de dados.....	69

Figura 28 - Carga de consumo inicial de um aquecedor.....	73
Figura 29 - Carga de consumo alterada do aquecedor.....	73
Figura 30 - Carga de consumo inicial de uma máquina de lavar roupas.....	74
Figura 31 - Carga de consumo final da máquina de lavar roupas.....	75
Figura 32 - Fluxograma do algoritmo genético.....	77
Figura 33 - Comparação curva de consumo faixa 101-200kWh.....	84
Figura 34 - Comparação curva de consumo faixa 201-300kWh.....	85
Figura 35 - Comparação curva de consumo faixa 301-400kWh.....	85
Figura 36 - Comparação curva de consumo faixa 401-500kWh.....	86
Figura 37 - Comparação curva de consumo faixa 501-1000kWh.....	86
Figura 38 - Comparação curva de consumo total.....	87
Figura 39 - Comparação curva de consumo total com delimitação.....	90
Figura 40 - Comparação curva de consumo total com delimitação e sem delimitação .....	91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Vida útil e posse média de equipamentos elétricos .....	21
Tabela 2 - Aumento anual de eficiência dos equipamentos .....	22
Tabela 3 - Evolução do consumo de equipamentos eletrodomésticos.....	23
Tabela 4 - Potência média dos eletrodomésticos.....	24
Tabela 5 - Consumo médio mensal por Subsistema.....	26
Tabela 6 - Consumidores residenciais por faixa de consumo .....	26
Tabela 7 - Consumo residencial por faixa de consumo (GWh) .....	27
Tabela 8 - Ranking das Tarifas (R\$/kWh) .....	28
Tabela 9 - Exemplo de seleção pelo método da roleta .....	42
Tabela 10 - Revisão da Literatura .....	52
Tabela 11 - Dados de entrada para curva de carga de um consumidor.....	54
Tabela 12 - Períodos ativos para cada equipamento (0 a 12).....	55
Tabela 13 - Períodos ativos para cada equipamento (12 a 24).....	55
Tabela 14 - Estatísticas da faixa de consumo de 101- 200kWh.....	56
Tabela 15 - Estatísticas da faixa de consumo de 201- 300kWh.....	57
Tabela 16 - Estatísticas da faixa de consumo de 301- 400kWh.....	58
Tabela 17 - Estatísticas da faixa de consumo de 401- 500kWh.....	59
Tabela 18 - Estatísticas da faixa de consumo de 501- 1000kWh.....	60
Tabela 19 - Estatísticas de consumo base.....	62
Tabela 20 - Estatísticas de consumo dos modelos criados.....	62
Tabela 21 - Potência e capacidade para boilers comerciais .....	63
Tabela 22 - Tempos de aquecimento de água para boiler .....	66
Tabela 23 - Valores dos pesos e das tarifas por hora .....	67
Tabela 24 - Parâmetros do algoritmo genético com a seleção por roleta .....	81
Tabela 25 - Parâmetros do algoritmo genético com a seleção por torneio .....	82
Tabela 26 - Parâmetros do algoritmo genético com aplicação por carga.....	83
Tabela 27 - Comparação de custos por faixa e total .....	84
Tabela 28 - Comparação de custos por cliente .....	87

## LISTA DE SIGLAS

AG	Algoritmo genético
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
B1	Grupo residencial de consumo de energia
CPP	<i>Critical Peak Pricing</i>
DNAEE	Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica
DR	<i>Demand Response</i>
ED-CPP	<i>Extreme Day CPP</i>
EDP	<i>Extreme Day Pricing</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
FECOERGS	Federação das Cooperativas de Energia, Telefonia e Desenvolvimento Rural do Rio Grande do Sul
IBP	<i>Incentive Based Programs</i>
PBP	<i>Priced Based Programs</i>
PPH	Pesquisa de Posse e Hábitos de Consumo de Energia
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
RIC	Regulamento de Instalações Consumidoras
RTP	<i>Real Time Pricing</i>
SIN	Sistema Interligado Nacional
TOU	<i>Time-of-Use</i>

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>15</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA .....	15
1.2 SITUAÇÃO PROBLEMA.....	16
<b>1.2.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>17</b>
<b>1.2.2 Objetivos específicos</b> .....	<b>17</b>
1.3 ESCOPO E RESTRIÇÕES .....	17
1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	17
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS CARGAS.....	19
<b>2.1.1 Posse e consumo de equipamentos eletrodomésticos</b> .....	<b>19</b>
<b>2.1.2 Potência média dos principais equipamentos eletrodomésticos</b> .....	<b>23</b>
2.2 DEMANDA DE ENERGIA ELETRICA BRASILEIRA.....	24
<b>2.2.1 Consumo médio mensal, número de consumidores e consumo por faixa de consumo</b> .....	<b>26</b>
2.3 TARIFA BRANCA .....	27
2.4 RESPOSTA A DEMANDA .....	29
<b>2.4.1 Programas de resposta a demanda</b> .....	<b>29</b>
<b>2.4.2 Estratégias de controle de demanda</b> .....	<b>32</b>
<b>2.4.3 Benefícios dos programas de resposta a demanda</b> .....	<b>33</b>
<b>2.4.4 Desafios da resposta a demanda</b> .....	<b>35</b>
2.5 ALGORITMOS GENÉTICOS .....	35
<b>2.5.1 Codificação</b> .....	<b>39</b>
<b>2.5.2 Inicialização</b> .....	<b>40</b>
<b>2.5.3 Função de avaliação</b> .....	<b>40</b>
<b>2.5.4 Seleção de pais</b> .....	<b>41</b>
2.5.4.1 Método da roleta viciada .....	41
2.5.4.2 Método do torneio.....	42
<b>2.5.5 Módulos de população</b> .....	<b>43</b>
2.5.5.1 Elitismo.....	43
<b>2.5.6 Operador de cruzamento</b> .....	<b>44</b>
2.5.6.1 Crossover Uniforme.....	44

<b>2.5.7 Operador de mutação</b> .....	<b>45</b>
<b>2.5.8 Parâmetros Genéticos</b> .....	<b>46</b>
2.5.8.1 Tamanho da população.....	46
2.5.8.2 Taxa de cruzamento.....	46
2.5.8.3 Taxa de mutação.....	46
2.5.8.4 Taxa de substituição.....	47
2.5.8.5 Condição de parada .....	47
<b>2.5.9 Restrições</b> .....	<b>47</b>
2.5.9.1 Método de penalização de cromossomos .....	48
<b>2.6 ABORDAGENS DA LITERATURA</b> .....	<b>49</b>
<b>3 METODOLOGIA</b> .....	<b>53</b>
3.1 CONSUMIDORES .....	54
<b>3.1.1 Estatísticas totais dos consumidores</b> .....	<b>61</b>
<b>3.1.2 Substituição do chuveiro por boiler</b> .....	<b>63</b>
3.2 CONCESSIONÁRIA.....	66
3.3 ESTRUTURA DE DADOS .....	68
3.4 OTIMIZAÇÃO DO PROBLEMA .....	69
<b>3.4.1 Restrições</b> .....	<b>72</b>
3.4.1.1 Penalização de cromossomos.....	75
<b>3.4.2 Métodos e parâmetros de otimização</b> .....	<b>76</b>
<b>3.4.3 Estratégia de evolução</b> .....	<b>78</b>
3.5 NOVAS CURVAS DE CONSUMO .....	78
<b>4 RESULTADOS</b> .....	<b>80</b>
4.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	80
4.2 RESULTADO DO ALGORITMO GENÉTICO.....	83
<b>4.2.1 Resultados sem delimitação de consumo</b> .....	<b>83</b>
<b>4.2.2 Resultados com delimitação de consumo</b> .....	<b>90</b>
<b>5 CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>92</b>
5.1 TRABALHOS FUTUROS .....	93
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>94</b>

<b>APÊNDICE A – TABELA COM OS TEMPOS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA PARA BOILER.....</b>	<b>97</b>
<b>APÊNDICE B – MELHOR RESULTADO GERADO PELO ALGORITMO GENÉTICO .....</b>	<b>98</b>
<b>APÊNDICE C – COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE CONSUMO POR CONSUMIDOR .....</b>	<b>103</b>
<b>APENDICE D – PRINCIPAIS CÓDIGOS UTILIZADOS .....</b>	<b>116</b>
<b>ANEXO A – TABELAS COM AS POTÊNCIAS DOS PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS ELETRODOMÉSTICOS E AR CONDICIONADOS .....</b>	<b>137</b>
<b>ANEXO B – TABELAS COM AS POTÊNCIAS DOS BOILERS DA MARCA BROILO®.....</b>	<b>139</b>

## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO E JUSTIFICATIVA

Ao longo dos últimos anos, o consumo de energia elétrica vem crescendo no Brasil, impulsionado pelo aumento do consumo de tecnologias eletroeletrônicas e também devido ao aumento na posse de equipamentos eletrodomésticos. A demanda de energia elétrica deve crescer em média 3,7% ao ano até 2026, chegando aproximadamente a 744 TWh/ano, onde o consumo residencial equivale a 29,7% desse valor (EPE, 2017).

A demanda de energia varia ao longo do dia, criando vales e picos na curva de consumo. Quando o consumo é maior que a capacidade de geração, entram em ação as usinas termoelétricas e caso estas não sejam capazes de suprir a demanda pode ocorrer a importação de energia elétrica, elevando assim o custo da energia e consequentemente encarecendo a tarifa de energia para o consumidor final. Além disso, um pico muito alto de consumo pode saturar a rede elétrica naquele instante, aumentando as perdas do sistema e diminuindo a qualidade da energia. Atender o aumento do consumo de energia, somado aos problemas dos picos de consumo, requer expansões no sistema de energia, tanto na geração como na transmissão, que podem ser demorados e caros (ALBADI; EL-SAADANY, 2007).

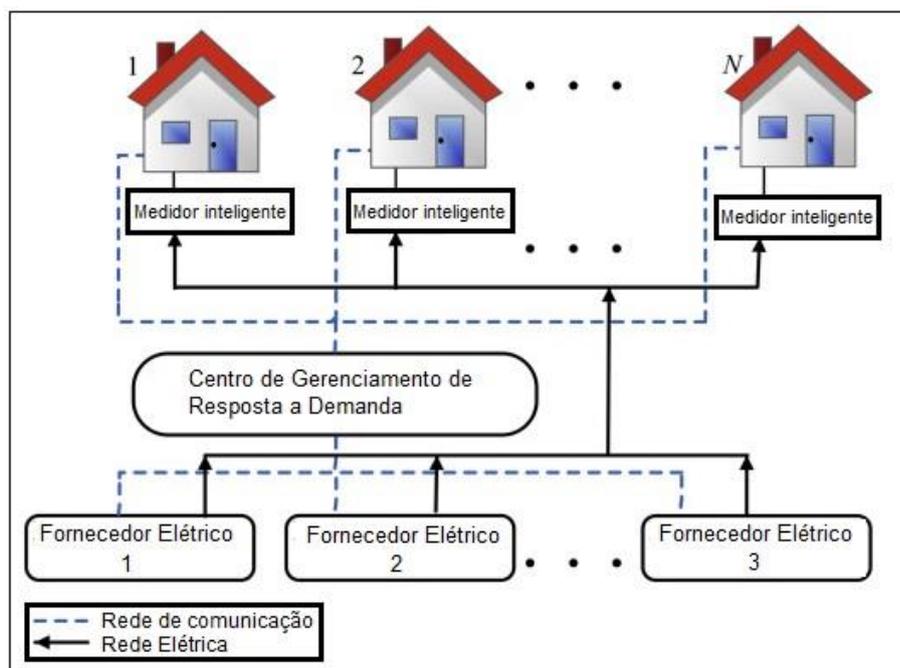
Um método para adiar ou até evitar certos investimentos, são os Programas de Resposta a Demanda. Seu propósito é modificar o consumo de energia, modelando as cargas do sistema para preencher os vales e diminuir os picos da carga de consumo, tornando assim, o sistema de energia mais eficiente. Um dos maiores desafios desses programas é agradar o lado do cliente, que busca o menor custo, mas mantendo o conforto, e o lado do fornecimento de energia, que busca diminuir os custos de operação e geração (FERRAZ, 2016).

Com o advento das *smart grids* e eletrodomésticos inteligentes, modelar a carga de residências se torna mais fácil, já que essas tecnologias permitem a leitura e controle dos equipamentos a distância (SIEBERT, 2013).

A Figura 1 ilustra um esquema de resposta a demanda, onde há um centro de gerenciamento que se comunica com os fornecedores de energia (oferta) e com os consumidores (demanda). O objetivo do centro de gerenciamento é equilibrar o

consumo de energia e diminuir os custos tanto para os fornecedores quanto para os consumidores.

Figura 1 - Smart Grid



Fonte: Jalali (2015).

## 1.2 SITUAÇÃO PROBLEMA

Determinar quais cargas conectadas a rede devem ser desligadas ou deslocadas em tempo real é um processo complexo, pois esse gerenciamento deve respeitar o cliente e a concessionária de energia, diminuindo os custos, mas mantendo o conforto. Um grande número de cargas conectadas ao sistema gera um valor muito elevado de combinações possíveis, caracterizando o gerenciamento como uma função multimodal, com vários máximos e mínimos. Desta forma, o presente trabalho propõe gerenciar a resposta a demanda por meio de um algoritmo genético. A seguir serão expostos os objetivos gerais e específicos desse trabalho.

### 1.2.1 Objetivo Geral

Implementar um algoritmo genético capaz de gerenciar um sistema de resposta a demanda residencial, com o objetivo de diminuir o custo final da energia elétrica para o cliente.

### 1.2.2 Objetivos específicos

A fim de atender o objetivo geral, pretendeu-se utilizar o deslocamento de cargas combinado com a precificação dinâmica, com a finalidade de diminuir o custo de energia mensal dos consumidores. Para implementar esse sistema, os objetivos específicos necessários para o desenvolvimento desse projeto foram:

- a) Analisar o comportamento do consumo residencial brasileiro;
- b) Modelar as curvas de demanda residencial;
- c) Aplicar a técnica de gerenciamento das cargas no algoritmo;
- d) Analisar os resultados de minimização dos custos propostos pelo algoritmo.

## 1.3 ESCOPO E RESTRIÇÕES

O trabalho limitou-se a utilizar curvas de consumo e tarifação simuladas como base para gerar os resultados. As curvas foram geradas a partir de dados históricos brasileiros concebidos por pesquisas, ou seja, os dados não foram criados ou capturados pelo autor. Os sistemas de controle da carga não foram abordados nesse trabalho, o algoritmo indicou apenas a programação diária das cargas.

## 1.4 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Esse trabalho está dividido em 5 capítulos. No capítulo 2 são apresentados os conceitos de resposta a demanda e de algoritmos genéticos, os dados necessários para a modelagem das curvas de consumo e tarifação, e ainda, trabalhos correlatos para o desenvolvimento da metodologia. O capítulo 3 contém a metodologia seguida

para o desenvolvimento do trabalho sendo abordados os parâmetros para a modelagem das curvas e os métodos que foram utilizados na estrutura do algoritmo genético. No capítulo 4 são apresentados os resultados do algoritmo genético. O capítulo 5 apresenta as considerações finais do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão teórica do tema deste trabalho abrange o estudo dos padrões de consumo de energia elétrica, com enfoque no consumo residencial, destacando principalmente a contribuição de eletrodomésticos ao longo do dia. Além disso, serão apresentados os conceitos de resposta a demanda, formas de gerenciamento de cargas e uma explanação sobre algoritmos genéticos aplicados à gerenciamento.

### 2.1 CARACTERIZAÇÃO DAS CARGAS

Nessa seção serão apresentados resultados de pesquisas, realizadas em âmbito nacional, que representam o padrão de consumo de energia elétrica residencial, a contribuição dos principais equipamentos elétricos nesse consumo e a quantidade média de equipamentos por domicílio.

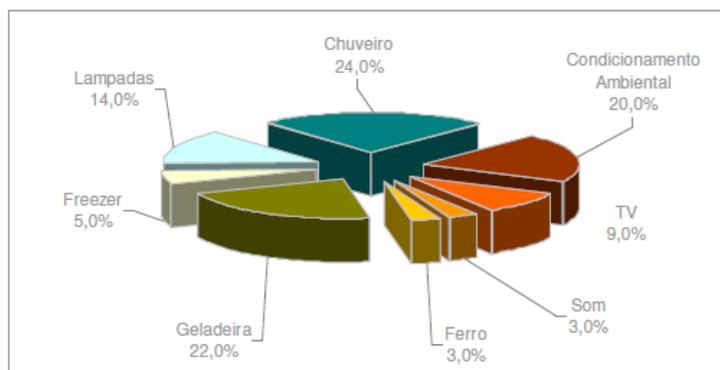
#### 2.1.1 Posse e consumo de equipamentos eletrodomésticos

O PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica, em parceria com a Eletrobrás, realizou no período de 2004/2006 a Pesquisa de Posse e Hábitos de Consumo de Energia (PPH). A pesquisa traçou um perfil da posse e hábitos de consumo de equipamentos elétricos, nos setores residencial, comercial e industrial, com a finalidade de avaliar o mercado de eficiência energética no Brasil (PROCEL, 2019).

É possível observar na Figura 2, a participação dos principais eletrodomésticos no consumo residencial do país, no qual o condicionamento ambiental representa 20% desse consumo.

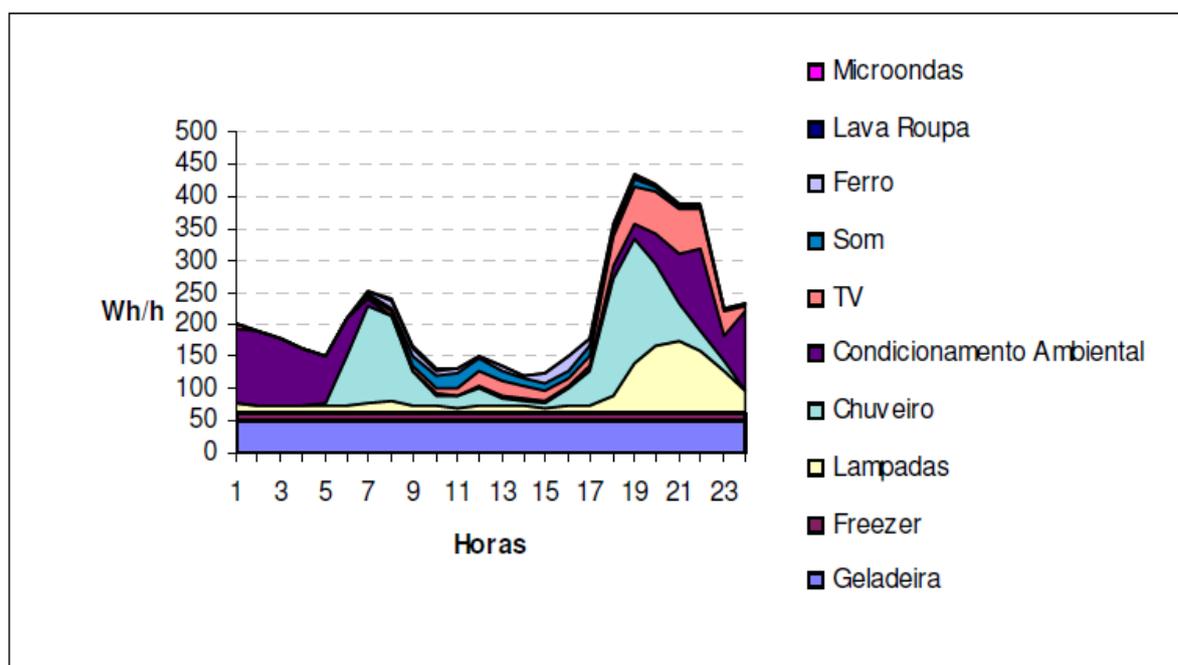
Ainda em âmbito nacional, a curva de carga da Figura 3, representa a divisão da curva de carga diária residencial do país pelo número de consumidores atendidos ou, ainda, reflete o consumo de energia elétrica, considerando as frações dos equipamentos possuídos, bem como os hábitos de uso, distribuídos ao longo de um dia típico (ELETROBRÁS; PROCEL. 2007).

Figura 2 - Participação dos eletrodomésticos no consumo residencial do Brasil



Fonte: ELETROBRÁS (2007)

Figura 3 - Curva de carga diária média no Brasil



Fonte: ELETROBRÁS; PROCEL (2007)

De acordo com a Figura 3, o consumo de freezers e geladeiras são apresentados constantes já que a forma de operação desses equipamentos, quando tratada estatisticamente, permite esse tipo de modelagem (ELETROBRÁS; PROCEL, 2007).

Embora a Pesquisa de Posse e Hábitos de consumo ofereça uma base sólida para a caracterização das cargas, os dados carecem de uma atualização, pois foram coletados no ano de 2005. O consumo residencial desse ano foi de 82.644 GWh, já o consumo em 2015 chegou a 131.190 GWh, segundo dados apresentados pela EPE – Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2019).

A EPE realizou no ano de 2016, na série Estudos de Energia, a Avaliação da Eficiência Energética e Geração Distribuída, onde compila as notas técnicas produzidas pela Diretoria de Estudos Econômicos-Energéticos e Ambientais da EPE e contempla a análise de uma série de temas ligados ao mercado de energia (EPE, 2016). Na metodologia empregada para a projeção de demanda residencial de energia elétrica, a evolução na posse de equipamentos determina o ritmo de crescimento do consumo de eletricidade nas residências. A evolução da posse média resulta da estimativa sobre a evolução do estoque dos principais eletrodomésticos, onde a projeção do estoque é realizada a partir da diferença entre a estimativa de evolução das vendas e o sucateamento dos equipamentos considerados. Para efeito de cálculo, foi considerada uma renovação dos equipamentos domésticos por novos mais eficientes e ainda um crescimento das vendas de eletrodomésticos em função do incremento no número de novas ligações à rede e do aumento da renda das famílias, utilizando como base o perfil de idade dos equipamentos levantado na Pesquisa de Posse e Hábitos de Consumo (EPE, 2016). Pode ser observado na Tabela 1 a vida útil e a posse média dos equipamentos elétricos residenciais.

Tabela 1 - Vida útil e posse média de equipamentos elétricos

Equipamento	Vida útil (anos)	Posse média (equipamentos por 100 domicílios)			
		2014	2015	2019	2024
Ar condicionado	15	23	24	26	32
Refrigerador	15	103	104	103	103
Freezer	15	18	18	17	15
Chuveiro elétrico <sup>1</sup>	15	66	66	62	58
Máquina de lavar roupas	15	69	70	76	79
Televisão	10	171	183	192	198
Lâmpadas <sup>2</sup>	8	821	829	855	882

Notas: 1 - Corresponde ao número de domicílios que utilizam exclusivamente o chuveiro elétrico.

2 - Número médio de lâmpadas por domicílio.

Fonte: EPE (2016)

Há uma tendência no decréscimo da posse de chuveiros elétricos, devido ao aumento da participação de aquecedores de água a gás ou coletores solares e uma diminuição no número de congeladores devido à redução na necessidade de estoque doméstico (EPE, 2016).

Além da alteração da quantidade de equipamentos eletrodomésticos, com o passar do tempo, os mesmos se tornam mais eficientes, levando em conta a substituição dos equipamentos antigos por novos. Assim, a eficiência média do estoque de equipamentos em poder das famílias aumenta progressivamente (EPE, 2016). Segundo a EPE (2016), a eficiência de novos equipamentos adquiridos crescerá conforme a Tabela 2.

Tabela 2 - Aumento anual de eficiência dos equipamentos

Equipamento	Aumento anual de eficiência (%)		Fundamentação geral
	2014 - 2024		
Ar condicionado	0,2		Reposição tecnológica natural do estoque e ações dos fabricantes com melhorias de eficiência impulsionadas principalmente pelo PBE e PROCEL.
Geladeira	0,2		
Freezer	0,2		
Máquina de Lavar Roupas	0,2		
Televisão	0,2		
Lâmpadas	5,2		Substituição das lâmpadas incandescentes
Chuveiro elétrico	-0,5		Tendência de aquisição de equipamentos com maior potência.

Fonte: EPE (2016)

Segundo a EPE (2016), para determinar o consumo específico por equipamento elétrico foram utilizadas informações contidas em uma série de estudos, como o da “Pesquisa de Posse e Hábitos de Consumo” do PROCEL (ELETROBRAS, 2007) além de dados de concessionárias, somadas a hipóteses de consumo destes equipamentos, tais como:

- a) Refrigerador: funcionamento durante 10 horas por dia, 365 dias por ano;
- b) Freezer: uso durante 9 horas por dia e 365 dias por ano;
- c) Ar condicionado: considerou-se um tempo médio de uso de 8 horas por dia, 4 meses por ano;
- d) Chuveiro elétrico: foi considerado um tempo de utilização de 10 minutos por habitante, na posição “inverno” durante 4 meses e no restante do ano na posição “verão”;
- e) Máquina de lavar roupas: funcionamento médio de 12 horas por mês;
- f) Televisão: tempo médio de utilização de 4 horas por dia e 365 dias por ano;

A partir dessas condições, o consumo médio de equipamentos por ano pode ser visto na Tabela 3.

Tabela 3 - Evolução do consumo de equipamentos eletrodomésticos

Equipamento	kWh/equipamento/ano			
	2014	2015	2019	2024
Ar condicionado	653	647	631	622
Refrigerador	337	333	320	314
Freezer	513	504	474	467
Lâmpadas	35	33	21	15
Chuveiro elétrico	493	494	502	515
Máquina de lavar roupas	66	65	63	63
Televisão	176	175	171	169

Fonte: EPE (2016)

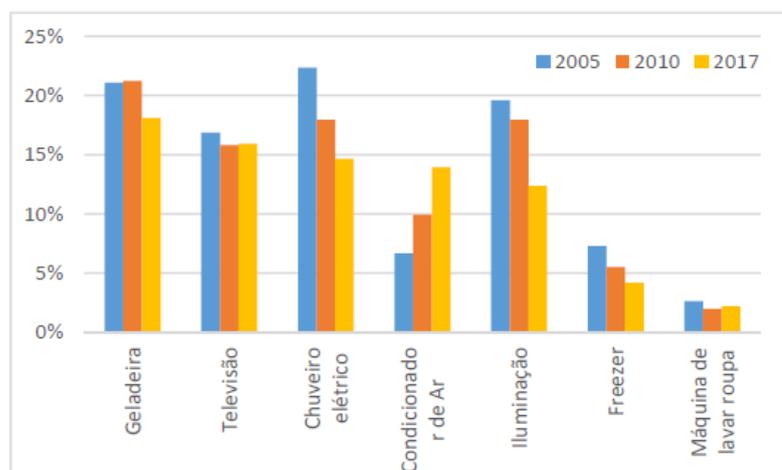
Entre 2005 e 2017 o consumo de energia elétrica do setor residencial teve um crescimento de 61%, sendo influenciado em grande parte pelo aumento no uso de aparelhos de ar-condicionado. O aumento no uso desses equipamentos é estimado em 237% nos últimos 12 anos, atingindo 18,7 TWh em 2017 (EPE, 2018a).

Nesse mesmo período, com a diminuição no uso de congeladores e a substituição de lâmpadas incandescentes por tecnologias mais eficientes, o ar condicionado se tornou o quarto equipamento que mais consome eletricidade nas residências, passando de 7% em 2005 para 14% em 2017 (EPE, 2018a). Pode ser observado na Figura 4, a variação da participação dos eletrodomésticos nesse período.

### 2.1.2 Potência média dos principais equipamentos eletrodomésticos

O mercado oferece uma grande variedade de eletrodomésticos, cada um com sua potência específica. Para fins de cálculo, serão utilizados valores de potência média extraídos do Regulamento de Instalações Consumidoras (RIC) de baixa tensão da FECOERGS – Federação das Cooperativas de Energia, Telefonia e Desenvolvimento Rural do Rio Grande do Sul. A Tabela 4 apresenta a potência média de alguns eletrodomésticos. A tabela completa extraída do RIC pode ser consultada no Anexo A.

Figura 4 - Participação no consumo final de eletricidade por equipamento residencial



Fonte: EPE (2018a)

Tabela 4 - Potência média dos eletrodomésticos

Aparelhos	Potência (W)
Aparelho de som	200
Ar condicionado 12.000 Btu/h	1.185
Ar condicionado 24.000 Btu/h	2.190
Aspirador de pó	1.000
Aquecedor central de água	5.000
Computador	350
Chuveiro elétrico/eletrônico	7.500
Freezer acima de 200 litros	150
Máquina de lavar louça	2.700
Máquina de lavar roupa	1.500
Motor 3cv	2.208
Refrigerador	350
Secadora de roupa	3.500

Fonte: FECOERGS (2019), adaptado.

## 2.2 DEMANDA DE ENERGIA ELETRICA BRASILEIRA

O uso da energia elétrica pela sociedade acontece de forma concentrada em algumas horas do dia, gerando períodos críticos de fornecimento, sendo esse uso representado pela curva de carga, que por sua vez caracteriza o consumo e horários em que ele ocorre (EPE, 2018a). Com o passar do tempo os hábitos de uso de

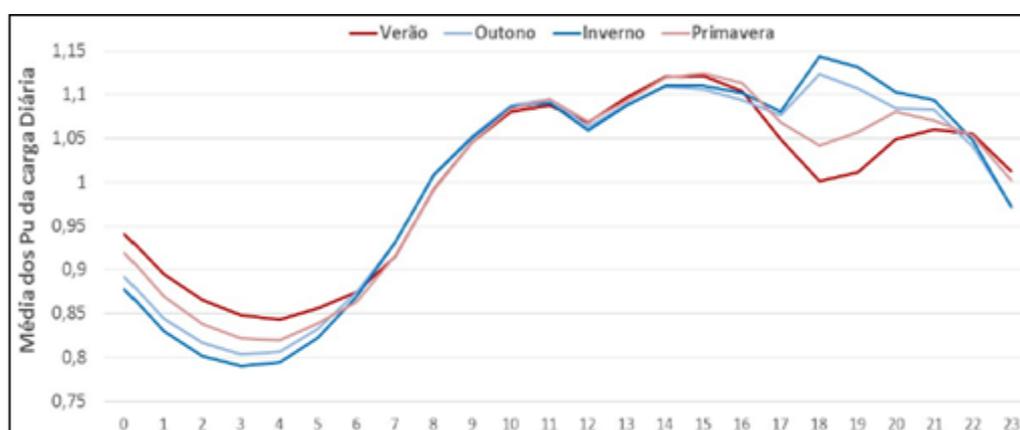
equipamentos elétricos sofrem mudanças, que alteram a curva de carga e o período crítico de fornecimento do sistema (EPE, 2018a).

De acordo com a EPE (EPE, 2018a), o Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica (DNAEE) definiu na década de 80 o período de ponta sendo composto por três horas consecutivas situadas no intervalo entre às 17 e 22 horas de acordo com a concessionária. Entretanto, observa-se que ao longo do tempo, nos dias úteis, a carga máxima noturna tem se aproximado cada vez mais da vespertina tendo sido por vezes menor, indicando ocorrências da ponta do sistema no período vespertino.

Esse comportamento apresenta certa sazonalidade, iniciando em setembro e atenuando-se em abril. Além disso, no mesmo período, a carga da madrugada tem um impacto maior sobre a média diária que por sua vez é causada pelo uso de climatização nessa época do ano (EPE, 2018a).

O comportamento diário médio da curva de carga do Sistema Interligado Nacional (SIN) em cada uma das estações do ano pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Perfil típico da carga do SIN



Fonte: EPE (2018a)

Segundo a EPE (EPE, 2018a) o uso dos equipamentos de ar condicionado ocorre predominantemente nos períodos da noite e madrugada, já o uso nos setores comercial e industrial ocorre no período vespertino. Nos dois casos, a utilização desses equipamentos contribui para a ocorrência de ponta do sistema, sendo a contribuição residencial no período das 17 às 22 horas e das classes comercial e industrial no período entre 14 e 17 horas.

## 2.2.1 Consumo médio mensal, número de consumidores e consumo por faixa de consumo

Segundo o Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2018, ano base 2017 elaborado pela EPE, o consumo médio mensal residencial no Brasil foi de 157,9 KWh/mês e no Rio Grande do Sul foi de 178,1 KWh/mês. Os valores de consumo por subsistema elétrico podem ser observados na Tabela 5.

Tabela 5 - Consumo médio mensal por Subsistema

	2013	2014	2015	2016	2017	Δ% (2017/2016)
<b>Brasil</b>	<b>163,0</b>	<b>167,0</b>	<b>161,4</b>	<b>159,8</b>	<b>157,9</b>	<b>-1,2</b>
<b>Subsistemas elétricos</b>	<b>163,0</b>	<b>167,0</b>	<b>161,4</b>	<b>159,8</b>	<b>157,9</b>	<b>-1,2</b>
Sistemas Isolados	258,0	200,8	220,8	189,6	183,5	-3,3
Norte	122,6	144,9	148,9	154,9	148,4	-4,2
Nordeste	118,4	121,3	120,8	121,0	119,2	-1,5
Sudeste/C.Oeste	180,6	183,1	175,6	172,5	170,8	-1,0
Sul	181,6	190,3	177,4	177,1	177,0	-0,1

Fonte: EPE (2018b)

No mesmo ano, para a região sul, o número de consumidores residenciais conectados ao SIN foi de 9.449.785 (Tabela 6) com um consumo de 21.247 GWh (Tabela 7).

Tabela 6 - Consumidores residenciais por faixa de consumo

	2013	2014	2015	2016	2017	Δ% (2017/2016)	Part. % (2017)	
<b>Sul</b>	<b>9.028.327</b>	<b>9.318.898</b>	<b>9.561.766</b>	<b>9.746.164</b>	<b>10.002.105</b>	<b>2,6</b>	<b>14,1</b>	<b>South</b>
<b>Alta Tensão</b>	<b>54</b>	<b>53</b>	<b>52</b>	<b>34</b>	<b>46</b>	<b>35,3</b>	<b>0,0</b>	<b>High Voltage</b>
<b>Convencional</b>	<b>8.203.863</b>	<b>8.472.379</b>	<b>8.971.157</b>	<b>9.178.591</b>	<b>9.449.785</b>	<b>3,0</b>	<b>94,5</b>	<b>Conventional</b>
0-30 kWh	601.071	616.565	731.653	732.679	752.742	2,7	8,0	0-30 kWh
31-100 kWh	1.846.470	1.791.110	2.206.556	2.168.598	2.254.764	4,0	23,9	31-100 kWh
101-200 kWh	3.030.536	3.008.931	3.460.660	3.466.435	3.539.994	2,1	37,5	101-200 kWh
201-300 kWh	1.556.805	1.651.200	1.596.176	1.699.316	1.743.234	2,6	18,4	201-300 kWh
301-400 kWh	619.484	714.322	550.671	618.393	632.164	2,2	6,7	301-400 kWh
401-500 kWh	253.001	311.799	203.664	237.531	244.007	2,7	2,6	401-500 kWh
501-1000 kWh	246.395	319.118	183.224	213.350	224.730	5,3	2,4	501-1000 kWh
> 1000 kWh	50.101	59.333	38.553	42.289	58.150	37,5	0,6	> 1000 kWh

Fonte: EPE (2018b)

Tabela 7 - Consumo residencial por faixa de consumo (GWh)

	2013	2014	2015	2016	2017	Δ% (2017/2016)	Part. % (2017)	
<b>Brasil</b>	<b>124.908</b>	<b>132.302</b>	<b>131.190</b>	<b>132.872</b>	<b>134.368</b>	<b>1,1</b>	<b>100</b>	<b>Brazil</b>
<b>Sul</b>	<b>19.671</b>	<b>21.278</b>	<b>20.353</b>	<b>20.714</b>	<b>21.247</b>	<b>2,6</b>	<b>15,8</b>	<b>South</b>
<b>Alta Tensão</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	<b>5</b>	<b>4</b>	<b>-11,6</b>	<b>0,0</b>	<b>High Voltage</b>
<b>Convencional</b>	<b>18.232</b>	<b>19.733</b>	<b>19.268</b>	<b>19.672</b>	<b>20.282</b>	<b>3,1</b>	<b>95,5</b>	<b>Conventional</b>
0-30 kWh	96	98	109	116	188	62,1	0,9	0-30 kWh
31-100 kWh	1.447	1.417	1.646	1.682	1.815	7,9	9,0	31-100 kWh
101-200 kWh	5.195	5.257	5.809	5.841	6.096	4,4	30,1	101-200 kWh
201-300 kWh	4.549	4.787	4.822	4.915	5.067	3,1	25,0	201-300 kWh
301-400 kWh	2.608	2.882	2.617	2.710	2.708	-0,1	13,4	301-400 kWh
401-500 kWh	1.385	1.614	1.370	1.431	1.404	-1,9	6,9	401-500 kWh
501-1000 kWh	1.935	2.444	1.933	2.009	1.962	-2,3	9,7	501-1000 kWh
> 1000 kWh	1.017	1.235	962	968	1.040	7,5	5,1	> 1000 kWh

Fonte: EPE (2018b)

### 2.3 TARIFA BRANCA

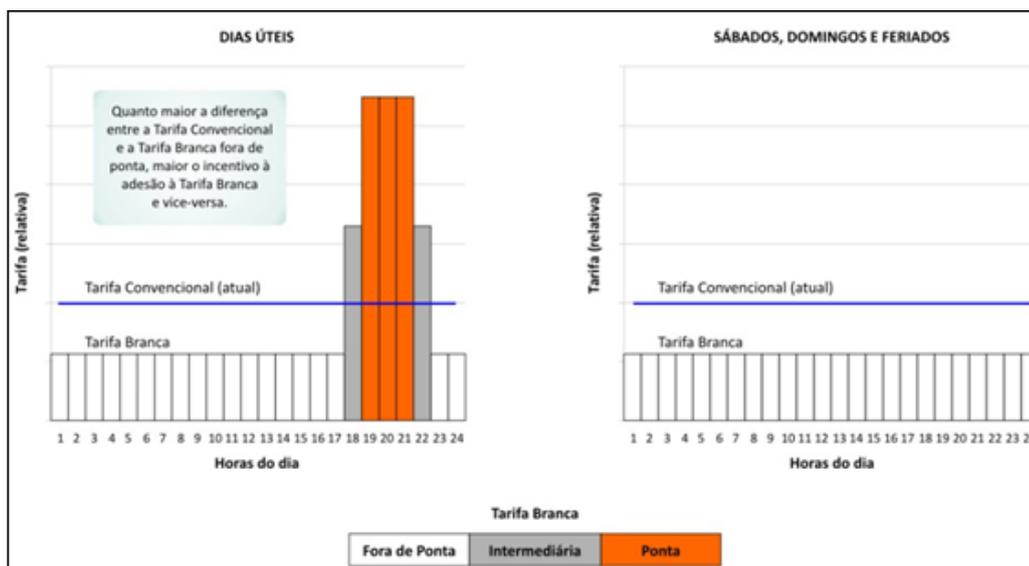
Segundo a ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL, 2019a), o aumento no consumo de energia nos horários de ponta acarreta a expansão da estrutura da rede elétrica, gerando custos. A Tarifa Branca cria condições que incentivam consumidores a deslocarem seu consumo fora desse período.

A tarifa Convencional tem um valor único cobrado pela energia consumida, já a tarifa Branca possibilita ao consumidor o pagamento de valores diferentes ao longo do dia (ANEEL, 2019b). Segundo a ANEEL (ANEEL 2019c), ela é aplicada em dias úteis, em três horários diferentes:

- horário de ponta: período composto por três horas diárias consecutivas definidas pela distribuidora;
- horário intermediário: período de horas conjugadas ao horário de ponta, por via de regra, uma hora antes e uma hora depois do horário de ponta;
- horário fora de ponta: período composto pelas horas complementares com menor demanda de energia.

No horário fora de ponta, fins de semana e feriados a energia é mais barata, nos horários intermediário e de ponta é mais cara (ANEEL, 2019b). Pode ser observado na Figura 6 a comparação entre a Tarifa Branca e a Convencional.

Figura 6 - Comparativo entre Tarifa Branca e Convencional



Fonte: ANEEL (2019b)

Segundo a ANEEL (ANEEL, 2019a), a partir de 1º de janeiro de 2020, todos os consumidores poderão optar pela Tarifa Branca. Os períodos de horário de ponta, intermediário e fora de ponta são homologados pela ANEEL nas revisões tarifárias periódicas de cada distribuidora, que ocorrem anualmente. A Tabela 8 apresenta os valores tarifários das distribuidoras de energia do Rio Grande do Sul para o grupo B1 (residencial).

Tabela 8 - Ranking das Tarifas (R\$/kWh)

Distribuidora	UF	Ranking	Tarifa Convencional	Tarifa Branca - Ponta	Tarifa Branca - Intermediária	Tarifa Branca - Fora ponta	Resolução Homologatória	Início de vigência
COOPERNORTE	RS	1	0,679	1,519	1,011	0,502	2516/2019	01/03/19
Certaja	RS	2	0,596	1,042	0,623	0,455	2398/2018	29/05/18
Eletrocar	RS	3	0,583	1,422	0,796	0,442	2418/2018	22/07/18
Hidropan	RS	4	0,571	1,241	0,711	0,396	2416/2018	22/07/18
Cermissões	RS	5	0,569	0,942	0,690	0,437	2424/2018	30/07/18
Demei	RS	6	0,558	1,148	0,719	0,452	2420/2018	22/07/18
Creal	RS	7	0,551	1,044	0,709	0,375	2429/2018	30/07/18
CEEE-D	RS	8	0,548	0,987	0,642	0,475	2484/2018	22/11/18
COOPERSUL	RS	8	0,548	1,050	0,746	0,442	2515/2019	01/03/19
RGE SUL	RS	10	0,547	0,958	0,618	0,448	2385/2018	19/04/18
Uhenpal	RS	11	0,545	1,086	0,693	0,419	2397/2018	22/05/18
Creluz-D	RS	12	0,539	0,965	0,676	0,386	2428/2018	30/07/18
CERFOX	RS	13	0,528	0,834	0,627	0,420	2473/2018	01/11/18
RGE	RS	14	0,528	0,932	0,601	0,422	2401/2018	19/06/18
Coprel	RS	15	0,526	0,899	0,647	0,395	2427/2018	30/07/18
MuxEnergia	RS	16	0,518	0,954	0,612	0,395	2417/2018	22/07/18
CERTHIL	RS	17	0,499	0,830	0,606	0,382	2467/2018	01/11/18
Ceriluz	RS	18	0,455	0,747	0,548	0,349	2423/2018	30/07/18
Cooperluz	RS	19	0,452	0,611	0,504	0,396	2426/2018	30/07/18
Certel	RS	20	0,423	0,773	0,540	0,306	2425/2018	30/07/18

Fonte: ANEEL (2019d)

As tarifas apresentadas na tabela 8 representam o comportamento apresentado na Figura 6. Enquanto a média da Tarifa Convencional é de 0,538 R\$/kWh, a média da Tarifa Branca fora de ponta é de 0,4147 R\$/kWh, já nos períodos intermediário e de ponta, as médias das tarifas ficam em 0,666 R\$/kWh e 0,999 R\$/kWh respectivamente.

## 2.4 RESPOSTA A DEMANDA

Segundo Albadi e El-Saadany (2007), a resposta a demanda é definida como a mudança no padrão de consumo de eletricidade do consumidor em resposta às alterações no preço da energia ao longo do dia e do ano. A seguir serão apresentados programas e estratégias de resposta a demanda, assim como seus benefícios e desafios.

### 2.4.1 Programas de resposta a demanda

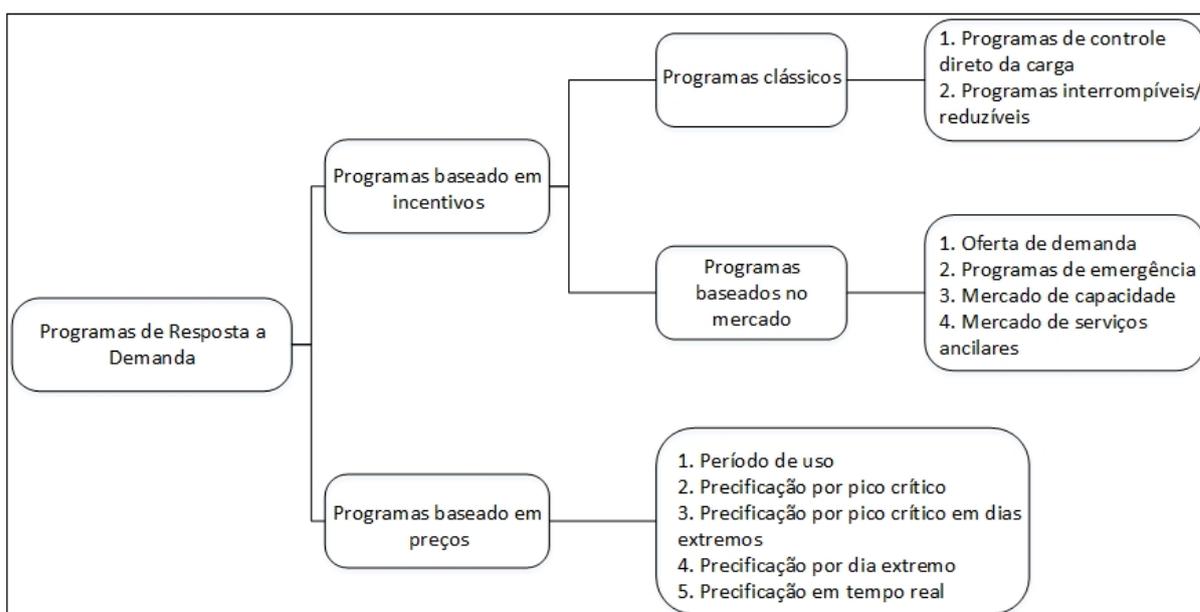
Existem várias maneiras de gerenciamento pelo lado da demanda, como: gerenciamento de carga, conservação estratégica, eletrificação, geração distribuída e ajustes na participação de mercado (GELLINGS, 1985). De acordo com Albadi e El-Saadany (2007), como pode ser observado na Figura 7, programas de resposta a demanda podem ser classificados em Programas Baseados em Incentivos (IBP – *Incentive Based Programs*) e em Programas Baseados em Preços (PBP – *Priced Based Programs*).

De acordo com Albadi e El-Saadany (2007), os IBP são divididos em programas clássicos e em programas baseados no mercado. Os programas clássicos incluem Programas de Controle Direto da Carga (*Direct Load Programs*) e Programas Interrompíveis/Reduzíveis (*Interruptible/Curtailable Programs*) (ALBADI; EL-SAADANY, 2007). A seguir serão descritos brevemente cada um destes.

- a) Programas de Controle Direto da Carga (*Direct Load Programs*): concessionárias podem desligar remotamente o equipamento, tipicamente ar condicionados e bombas de água, do consumidor participante em um curto prazo;

- b) Programas Interrompíveis/Reduzíveis (*Interruptible/Curtailable Programs*): consumidores participantes recebem pagamentos de incentivo ou desconto na taxa para reduzir sua demanda para valores pré-definidos.

Figura 7 - Programas de resposta a demanda



Fonte: SHINGLE; VIJAYA, 2016, adaptado.

Programas baseados no mercado incluem Oferta de Demanda (*Demand Bidding*), Programas de Emergência (*Emergency DR*), Mercado de capacidade (*Capacity Market*) e Serviços Ancilares (*Ancillary Services*), como descrito a seguir:

- a) Oferta de Demanda (*Demand Bidding*): o consumidor oferta uma redução na demanda por um preço definido. Se o preço ofertado for menor que o preço do mercado, sua oferta é aceita e se não cumprir a redução de demanda ele é penalizado (CARRIJO, 2013);
- b) Programas de Emergência (*Emergency DR*): durante condições de emergência, consumidores participantes recebem pagamentos pela redução da demanda (US DEPARTMENT OF ENERGY apud ALBADI; EL-SAADANY, 2007);
- c) Mercado de Capacidade (*Capacity Market*): consumidores participantes se comprometem a fornecer reduções de carga pré-especificada quando surgirem contingências no sistema sendo avisados com um dia de antecedência e caso não responderem ao

chamado, serão penalizados (US DEPARTMENT OF ENERGY apud ALBADI; EL-SAADANY, 2007);

- d) Serviços Ancilares (*Ancillary Services*): programas que permitem ao consumidor oferecer redução de demanda como reserva operacional, por meio do mercado *spot*. Quando as ofertas são aceitas, o consumidor participante recebe um valor por se comprometer a permanecer de prontidão e ainda recebe pela redução da carga (US DEPARTMENT OF ENERGY apud ALBADI; EL-SAADANY, 2007).

Programas de resposta a demanda baseados em preço são mais adequados para consumidores residenciais (SHINGLE; VIJAYA, 2016). Segundo Carrijo (2013), são baseados na variação dinâmica do preço da eletricidade, onde refletem o custo real da energia no momento, com o objetivo de achatar as curvas de demanda oferecendo um baixo preço nos períodos fora de pico e altos preços nos períodos de pico. Programas baseados em preço incluem Período de Uso (TOU – *Time-of-Use*), Precificação por Pico Crítico (CPP – *Critical Peak Pricing*), Precificação por Pico Crítico em Dias Extremos (ED-CPP – *Extreme Day CPP*), Precificação por Dia Extremo (EDP – *Extreme Day Pricing*) e Precificação em Tempo Real (RTP – *Real Time Pricing*). Nos itens a seguir serão descritos cada um destes programas baseados em preço.

- a) Período de Uso (TOU – *Time-of-Use*): possui apenas dois períodos de tarifação: pico e fora de pico. O valor da tarifa é calculado para períodos específicos de tempo baseados nos custos da geração ou na compra do mercado atacadista. As tarifas são pré-estabelecidas e de conhecimento dos consumidores, permitindo que variem sua demanda deslocando o consumo para períodos com a tarifa mais baixa. Esse método não necessita do uso de medição inteligente ou comunicação com a concessionária, além de não ser um programa dinâmico;
- b) Precificação por Pico Crítico (CPP – *Critical Peak Pricing*): em um número de dias limitado por ano, esse programa inclui no programa TOU um alto preço de energia durante períodos de contingência e de elevado custo da energia no mercado. O valor da tarifa em vigência é o mesmo da praticada no TOU, com exceção dos períodos de pico onde é ajustada baseando-se nos custos de geração e compra de energia no mercado atacadista. Esse método é considerado a evolução

da cobrança por demanda e requer o uso de infraestrutura inteligente. A tarifação CPP ainda pode ser por pico crítico em dias extremos (ED-CPP – *Extreme Day CPP*), onde as tarifas de pico e fora de pico são utilizadas somente em dias extremos e durante os outros dias a tarifação é fixa. Há ainda a precificação por dia extremo (EDP – *Extreme Day Pricing*), onde a tarifação é vigente durante 24 horas com um número máximo de dias críticos, que pode ser determinado com um dia de antecedência;

- c) Precificação em Tempo Real (RTP – *Real Time Pricing*): os consumidores recebem tarifas horárias que refletem o custo flutuante do mercado, sendo informados com um dia de antecedência ou até uma hora de antecedência das tarifas bases (ALBADI; EL-SAADANY, 2007). Uma das desvantagens desse método é a possibilidade de as tarifas chegarem a valores extremamente elevados.

#### 2.4.2 Estratégias de controle de demanda

Utilizando medidores inteligentes e tecnologias de automação industrial, a integração do lado da demanda pode oferecer vários serviços ao sistema elétrico por meio das modificações dos padrões de consumo dos consumidores (CARRIJO, 2013).

De acordo com Gellings(1985), existem seis estratégias, apresentadas na Figura 8, para moldar a curva de carga do sistema: redução do pico (*Peak Clipping*), preenchimento de vales (*Valley Filling*), deslocamento de carga (*Load Shifting*), uso racional (*Strategic Conservation*), crescimento estratégico da carga (*Strategic Load Growth*) e curva de carga flexível (*Flexible Load Shape*):

- a) Redução de Pico (*Peak Clipping*): uma das formas clássicas de gerenciamento é a redução das cargas de pico do sistema utilizando o controle de carga direta, desligamento de aparelhos de consumidores por meio das concessionárias, ou utilizando tarifas interrompíveis/reduzíveis para clientes industriais e comerciais. Pode ser utilizado para reduzir o custo operacional e a dependência de combustíveis críticos;

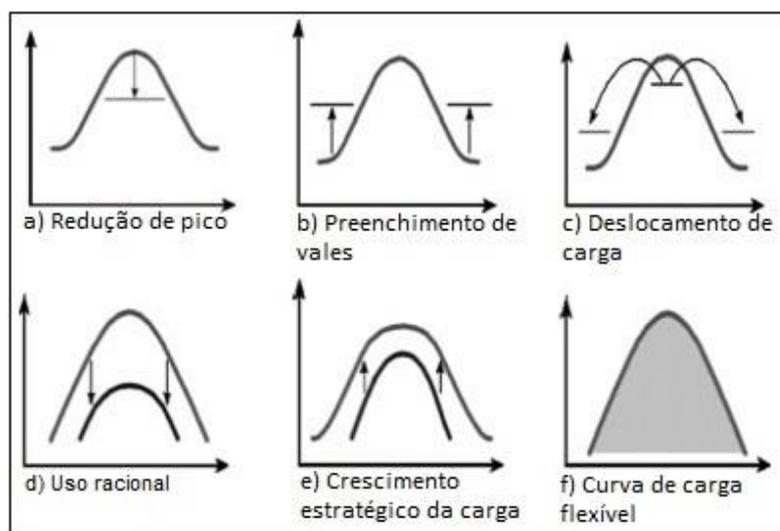
- b) Preenchimento de Vales (*Valley Filling*): segundo método de gerenciamento de demanda clássico. Incentiva o consumidor no uso de energia elétrica fora de horários de pico, gerando diminuição do custo médio da eletricidade;
- c) Deslocamento de Carga (*Load Shifting*): último método de gerenciamento de demanda clássico. Incentiva os consumidores a deslocarem seu consumo no horário de pico para o horário fora de pico. Um exemplo é a utilização de aquecedores de água com armazenamento de energia térmica (*boilers*) no lugar de aquecedores de água elétricos regulares;
- d) Uso racional (*Strategic Conservation*): é a mudança na forma de carga baseado na redução do consumo de modo geral. Pode ser implementada incentivando os consumidores a utilizar equipamentos mais eficientes;
- e) Crescimento Estratégico da Carga (*Strategic Load Growth*): mudança na forma de carga que se baseia no crescimento da carga, onde envolve o aumento da participação de cargas que são, ou podem ser, servidas por combustíveis concorrentes. Esse aumento pode ser motivado pela redução no uso de combustíveis fósseis resultando na melhora da produtividade geral;
- f) Curva de Carga Flexível (*Flexible Load Shape*): conceito relacionado à confiabilidade, uma restrição de planejamento. A oferta de energia é estudada e planejada a partir do conhecimento antecipado da carga, incluindo as atividades do lado da demanda. A forma da carga pode ser flexível se os clientes tiverem opções sobre as variações na qualidade de serviço que estão dispostos a permitir a troca de incentivos.

#### 2.4.3 Benefícios dos programas de resposta a demanda

Segundo Albadi e El-Saadany (2007), clientes que participam de programas de resposta a demanda podem esperar uma economia na fatura de energia se

reduzirem seu consumo em períodos de pico. Ainda, é possível para um consumidor aumentar o seu consumo de energia, em períodos fora de pico, pagando menos.

Figura 8 - Estratégias de gerenciamento da demanda



Fonte: HARISH; KUMAR (2014), adaptado

Os benefícios de programas de resposta a demanda não se limitam apenas aos participantes. Com a utilização mais eficiente da infraestrutura disponível, uma redução geral do preço da eletricidade é esperada. Um exemplo clássico para a redução da tarifa é a redução da demanda de unidades geradoras de eletricidade caras, além de que a utilização desses programas pode postergar ou evitar investimentos em distribuição e transmissão de energia (ALBADI; EL-SAADANY, 2007).

Um programa de resposta a demanda bem concebido permite ao operador mais opções e recursos para manter a confiabilidade do sistema, reduzindo interrupções forçadas e suas consequências. No lado econômico, mesmo que não exista competição, os programas de resposta a demanda melhoram o desempenho do mercado de energia. Uma pequena redução da demanda residencial pode gerar uma grande redução no custo da geração, pois quando a demanda está próxima da capacidade máxima de geração, o custo aumenta (ALBADI; EL-SAADANY, 2007).

#### 2.4.4 Desafios da resposta a demanda

Embora as tecnologias existentes sejam adequadas para a resposta a demanda, sua implementação tem sido lenta. É possível verificar vários motivos que contribuem para isso (SHINGLE; VIJAYA, 2016).

Implantar um sistema de resposta a demanda incorre em custos iniciais de instalação e execução para proprietários e participantes. O participante do programa pode necessitar instalar tecnologias facilitadoras, como termostatos inteligentes, controle de carga de pico, sistemas de gerenciamento de energia e unidades de geração no local. Também é necessário traçar um plano estratégico que possa ser utilizado em caso de um evento emergencial (ALBADI; EL-SAADANY, 2007).

Podem existir ainda custos de funcionamento para os consumidores, como a redução do conforto, que pode ocorrer durante um evento. Outros custos relevantes para eventos são mais fáceis de quantificar, como perda de negócios, reescalonamento de processos ou atividades industriais. Além disso, é necessário a instalação de sistemas de medição avançados para medir, armazenar e transmitir o uso de energia nos intervalos necessários (ALBADI; EL-SAADANY, 2007).

Segundo Albadi e El-Saadany (2007), administração e gerenciamento do programa também devem ser contabilizados como custos, assim como os pagamentos de incentivos. A atualização do sistema de faturamento é fundamental antes de implantar a maioria dos programas de resposta a demanda, para permitir que o sistema lide com a variação da tarifa de energia no tempo.

Segundo Shingle & Vijaya (2016), educar o cliente é o desafio mais importante para implementação dos programas de resposta a demanda. Além disso, é necessário medir a eficácia da resposta a demanda por meio de medidores inteligentes e sistemas de comunicação. Para reduzir a complexidade operacional de programas de resposta a demanda se faz necessária uma abordagem de controle corretivo para operar o sistema de energia.

## 2.5 ALGORITMOS GENÉTICOS

A otimização pode ser definida como a busca pelo modo mais eficiente possível de realizar uma tarefa ou processo (BOECHEL, 2003). “Entende-se por

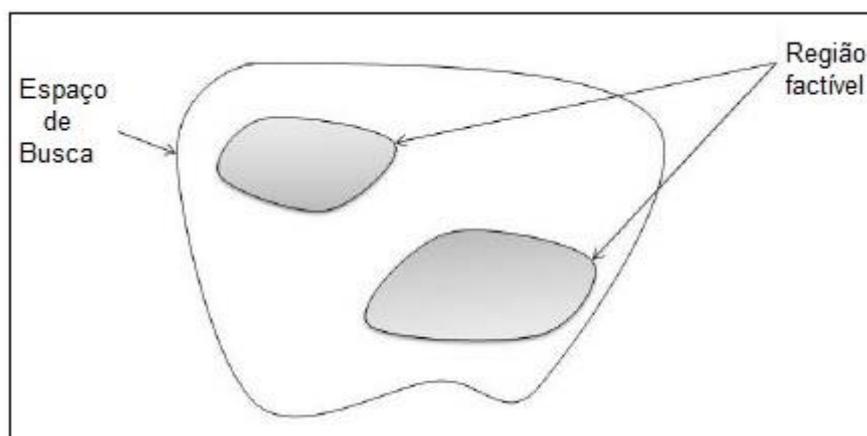
otimização, não um processo de busca do melhor absoluto, mas a procura sistemática do melhor prático” (NOVAES, 1978 apud BOECHEL, 2003, p. 6).

De acordo com Santana (2012), a otimização tem por finalidade minimizar ou maximizar uma função por meio da escolha sistemática dos valores das variáveis que compõem essa função dentro de um conjunto viável, respeitando as restrições do problema. As técnicas de otimização geralmente apresentam:

- a) uma função objetivo;
- b) um espaço de busca;
- c) um conjunto de restrições.

Como apresentado na Figura 9, o espaço de busca é dividido em duas regiões: factível e não factível. A solução pode ser encontrada em qualquer uma das regiões. As soluções que se encontram na região factível atendem todas as restrições do problema (SANTANA, 2012).

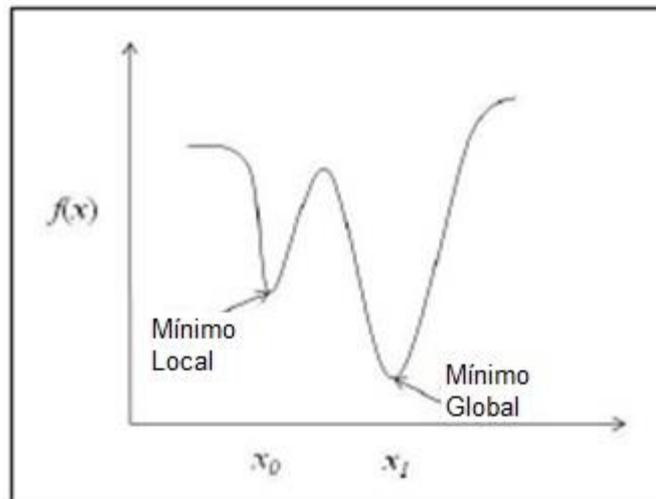
Figura 9 - Espaço de busca e região factível



Fonte: SANTANA (2012)

O problema de otimização pode ser de minimização ou maximização da função objetivo, onde a resposta do problema é chamada de ótimo global. O problema ainda pode ser unimodal ou multimodal. Problemas unimodais apresentam apenas um ponto mínimo ou máximo, ou seja, há apenas uma solução para o problema. Problemas multimodais apresentam vários pontos de máximos e mínimos locais, mas apenas um ótimo global, o que confunde muitos métodos de otimização (SANTANA, 2012). A Figura 10 apresenta uma função multimodal.

Figura 10 - Função multimodal



Fonte: SANTANA (2012)

Quando a resposta para um problema pode assumir um grande número de combinações possíveis, os métodos heurísticos são mais indicados pois são capazes de encontrar uma solução útil em um tempo aceitável (SANTANA, 2012).

Goldberg & Luna (2005) definem que:

Uma heurística é uma técnica que busca alcançar uma boa solução utilizando um esforço computacional considerado razoável, sendo capaz de garantir a viabilidade ou a otimalidade da solução encontrada ou, ainda, em muitos casos, ambas, especialmente nas ocasiões em que essa busca partir de uma solução viável próxima ao ótimo.

Segundo Santana (2012), algoritmos de busca heurística podem ser divididos em:

- a) determinísticos: retornam sempre a mesma solução em todas as soluções que utilizam o mesmo critério de avaliação e parada;
- b) estocásticos: retornam soluções diversas devido a aleatoriedade embutida no algoritmo, apresentando vantagem para evitar mínimos locais.

No caso de problemas combinatórios, as técnicas heurísticas se destacam tanto pelo bom retorno dado ao compromisso do objetivo, como em virtude da qualidade das soluções encontradas (GOLDBARG; LUNA, 2005).

Os algoritmos genéticos utilizam técnicas heurísticas de otimização estocástica, portanto não asseguram a obtenção do melhor resultado possível (ótimo

global) em todas as suas execuções. São indicados para resolver problemas cujos algoritmos convencionais são extraordinariamente lentos ou incapazes de obter solução, como por exemplo, problemas de maximização de funções multimodais (LINDEN, 2012).

Algoritmos genéticos são algoritmos de otimização global baseados nos mecanismos de seleção natural e genética. Isto é feito através de processos iterativos, onde cada processo de iteração é chamado de geração (MOREIRA SILVA, 2013).

O algoritmo consiste em criar uma população de organismos (*cromossomos*) candidatos a solução de um problema. Por meio de um processo de seleção são determinados quais organismos representam a melhor resposta ao problema. Os organismos selecionados (*pais*), passam pelo processo de recombinação (*crossover*) para gerar os organismos da próxima geração (*filhos*). Durante o processo de recombinação, pode ocorrer uma mutação, alterando aleatoriamente parte de um organismo (LINDEN, 2012).

Um algoritmo genético trabalha com uma população de indivíduos  $P$ , onde cada indivíduo  $x$  equivale a uma solução no espaço de busca. Em seguida, cada indivíduo será avaliado por uma função objetivo  $f$  para medir seu nível de aptidão (HOLLAND, 1975 apud NOGUEIRA, 2017). O pseudocódigo de um algoritmo genético pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Pseudocódigo de um algoritmo genético

Algoritmo 2.1: Pseudocódigo do AG clássico.
1. $ger \leftarrow 0$ ; //Inicializa o contador de gerações
2. $P(ger) \leftarrow Inicializa\_populacao()$ ; //Gera aleatoriamente uma população inicial
3. <b>Enquanto</b> $g < criterio\_parada$
4. $Avalia(P(ger))$ ; //Avalia cada indivíduo da população inicial de acordo com a função objetivo $f$
5. $(x_1, x_2) \leftarrow Selecao\_individuos()$ ; //Seleção de dois indivíduos para reprodução de descendentes
6. $x_c \leftarrow cruzamento(x_1, x_2)$ ; //Cruzamento dos pais para gerar os filhos
7. $x_m \leftarrow mutacao(x_c)$ ; //operação de mutação dos filhos gerados
8. $ger \leftarrow ger + 1$ ;
9. $P(ger) \leftarrow atualiza(x_m)$ ; //atualiza a População
10. <b>Fim Enquanto</b>

Fonte: NOGUEIRA (2017)

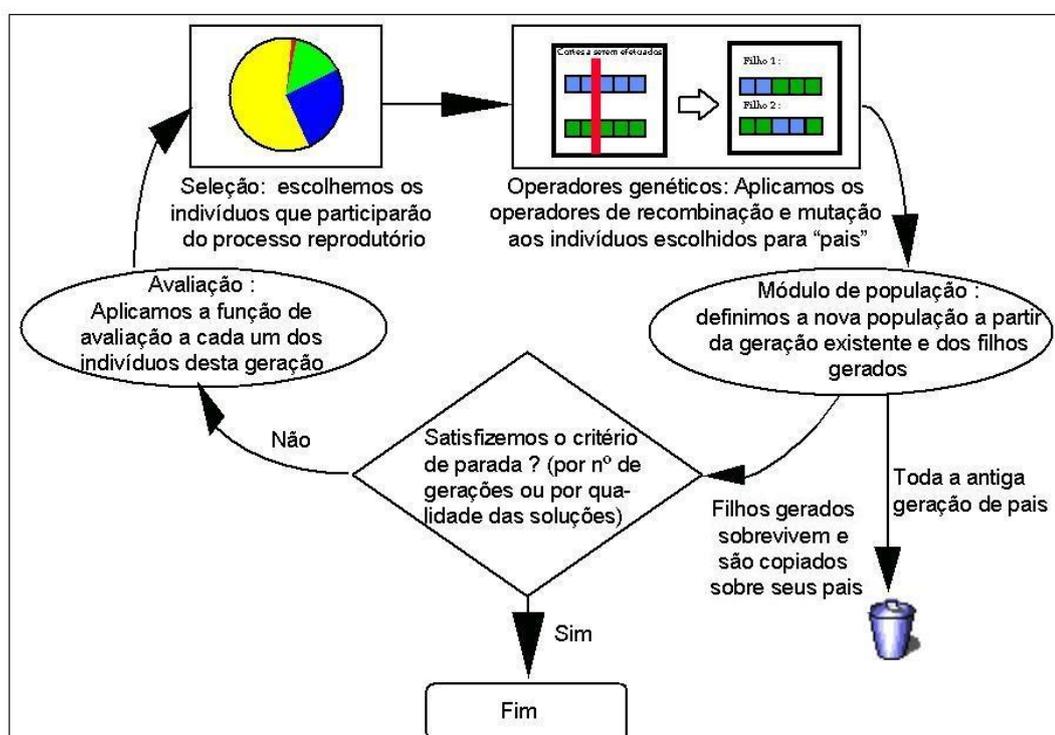
Segundo Linden (2012), o funcionamento de um algoritmo genético pode ser resumido pelos seguintes passos:

- a) inicializar a população de cromossomos;

- b) avaliar cada cromossomo na população;
- c) selecionar os pais para gerar novos cromossomos;
- d) aplicar os operadores de recombinação e mutação a estes pais;
- e) apagar os velhos membros da população;
- f) avaliar todos os novos cromossomos e inseri-los na população;
- g) se o tempo acabar ou o melhor cromossomo satisfazer os requerimentos, retorna-lo, caso contrário, voltar para o passo c).

O esquema de um algoritmo genético pode ser visto na Figura 12.

Figura 12 - Esquema de um algoritmo genético



Fonte: LINDEN (2012)

### 2.5.1 Codificação

A codificação da informação em cromossomos é o ponto de partida para a aplicação de algoritmos genéticos. Se trata de representar o problema de maneira que o algoritmo possa atuar sobre ele (MOREIRA SILVA, 2013).

Os algoritmos genéticos processam populações de indivíduos ou cromossomos onde cada parte indivisível desse cromossomo é denominado gene. O cromossomo nada mais é do que uma estrutura de dados, geralmente vetores ou

cadeia de valores binários, reais ou combinação de ambos. O conjunto de genes que define a constituição genética de um indivíduo é denominada genótipo e é sobre estes genes que serão aplicados os operadores genéticos (MOREIRA SILVA, 2013).

Segundo Linden (2012), é aconselhável que a representação cromossômica siga algumas regras:

- a) a representação deve ser o mais simples possível;
- b) é preferível que soluções proibidas ao problema não tenham uma representação;
- c) devem estar implícitas à representação todas as condições do problema.

### 2.5.2 Inicialização

Segundo Linden (2012), a inicialização da população em grande parte dos trabalhos é feita a partir de uma escolha aleatória, que cobre praticamente todo o espaço de soluções.

Para garantir que a o processo de convergência do algoritmo seja o mais rápido possível, o usuário deve estabelecer condições de contorno tendo em vista o seu conhecimento prévio do problema (LACERDA & CARVALHO, 1999 apud MOREIRA SILVA, 2013).

A definição do número de indivíduos da população depende muito do problema a ser resolvido e da experiência do usuário. (SOARES, 1997 apud MOREIRA SILVA, 2013). Quanto maior for o número de indivíduos, a possibilidade de o algoritmo convergir é maior, entretanto o tempo de processamento também aumenta. No caso de uma população de indivíduos pequena, o tempo de processamento diminui, mas devido à perda de diversidade, a convergência será prematura, não alcançando a solução desejada (R. K. URSEN, 2002 apud MOREIRA SILVA, 2013).

### 2.5.3 Função de avaliação

Algoritmos genéticos necessitam de uma função que avalia a qualidade de cada indivíduo como solução do problema. A avaliação de cada indivíduo é dada por

um valor não-negativo denominado aptidão (*fitness*) (MOREIRA SILVA, 2013). Esse valor é utilizado para a escolha dos indivíduos no método de seleção dos pais, diferenciando os resultados que melhor se adaptam ao problema (LINDEN, 2012).

A análise de desempenho da população pode ser feita utilizando vários fatores, tais como: valores máximo, mínimo e médio da função de aptidão. Ainda, é possível utilizar o desvio padrão dos valores da função de aptidão da população como forma de análise de convergência (GOLDBERG, 1989 apud MOREIRA SILVA, 2013).

Mesmo que na população inicial seja encontrada a melhor resposta ao problema, o algoritmo continuará com o processo de busca, devido ao fato de que a convergência é regida pela população e não sobre um indivíduo (MOREIRA SILVA, 2013). Ainda assim, ao final do algoritmo, o indivíduo mais apto será selecionado, independentemente de este fazer parte ou não da população atual (TANOMARU, 1995 apud MOREIRA SILVA, 2013).

#### 2.5.4 Seleção de pais

A seleção deve preferenciar os pais mais capazes para assim gerar mais filhos, mas também deve permitir que pais menos aptos se reproduzam, imitando o mecanismo de seleção natural, garantindo assim a diversidade da população (LINDEN, 2012). Manter a diversidade da população é importante pois até mesmo um indivíduo com um valor de função de avaliação extremamente baixo pode conter características únicas, que podem não estar presentes em nenhum outro cromossomo da população (LINDEN, 2012).

##### 2.5.4.1 Método da roleta viciada

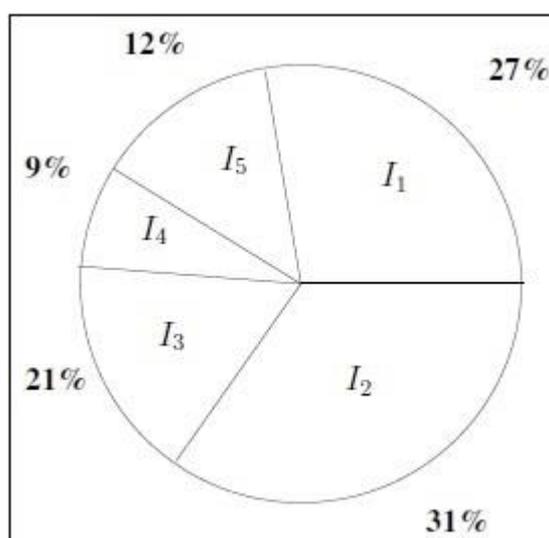
A maneira mais utilizada para manter a diversidade em algoritmos genéticos é o método da roleta viciada. Nesse método é criada uma roleta virtual onde cada cromossomo recebe uma parte proporcional à sua avaliação, em seguida a roleta é girada e o indivíduo selecionado será onde ela parar (LINDEN, 2012). Um exemplo do método da roleta pode ser observado na Tabela 9, assim como sua representação na Figura 13.

Tabela 9 - Exemplo de seleção pelo método da roleta

<b>Indivíduo</b>	<b>Aptidão</b>	<b>Roleta</b>	<b>Porcentagem</b>
$I_1$	22	22	27%
$I_2$	25	47	31%
$I_3$	17	64	21%
$I_4$	7	71	9%
$I_5$	10	81	12%

Fonte: MOREIRA SILVA (2013), adaptado

Figura 13 - Esquema da Roleta



Fonte: MOREIRA SILVA (2013)

Segundo Linden (2012), a escolha do indivíduo deve ser aleatória e pode ser feita por meio de três métodos:

- escolher um número de 0 a 100, representando a porcentagem de cada indivíduo;
- escolher um número entre 0 e 360, que representa uma posição do círculo;
- escolher um valor entre 0 e a soma total das avaliações, representando um pedaço do somatório.

#### 2.5.4.2 Método do torneio

No método do torneio são escolhidos  $k$  indivíduos da população de forma aleatória para que disputem entre si qual o melhor indivíduo. Aquele com a melhor

função de avaliação será selecionado para o cruzamento (para dois pais) ou mutação direta (para um pai). O menor valor de  $k$  é 2 e o maior é o tamanho da população. No último caso, o vencedor será sempre o indivíduo com a melhor avaliação, resultando na perda de diversidade (LINDEN, 2012). Um exemplo do método do torneio pode ser observado na Figura 14, onde  $k=3$ .

Figura 14 - Exemplo de seleção pelo método do torneio

Indivíduo	Fitness	Torneios		
$x_1$	200	$x_1$	$x_7$	$x_8$
$x_2$	100	$x_2$	$x_3$	$x_5$
$x_3$	9500	$x_6$	$x_4$	$x_4$
$x_4$	100	$x_2$	$x_7$	$x_1$
$x_5$	100	$x_5$	$x_5$	$x_5$
$x_6$	10000	$x_3$	$x_4$	$x_2$
$x_7$	1	$x_4$	$x_2$	$x_6$
$x_8$	40	$x_4$	$x_6$	$x_5$

Fonte: LINDEN (2012)

### 2.5.5 Módulos de população

O método mais simples de gerar uma nova população consiste em destruir toda a população anterior e substituir pelos filhos gerados. Entretanto, existem algumas alternativas para o comportamento do módulo que permite a exploração das melhores qualidades da geração atual de modo que sejam aproveitadas para a melhora da próxima geração (LINDEN, 2012).

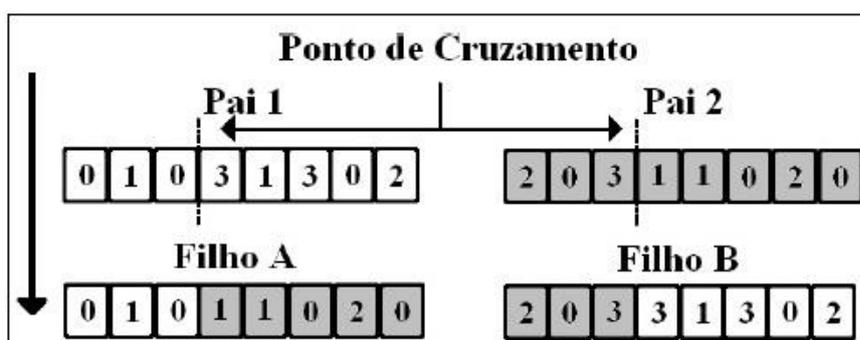
#### 2.5.5.1 Elitismo

O elitismo seleciona os  $k$  melhores indivíduos de cada geração para passar para a próxima geração, não sendo descartados, visando garantir que seus genomas sejam preservados. Essa técnica quase não altera o tempo de processamento e garante que o desempenho do algoritmo genético sempre cresça com o decorrer das gerações. Apesar da simplicidade, esse método melhora o desempenho da execução de um algoritmo genético, pois mantém dentro da população os cromossomos responsáveis pelas boas avaliações (LINDEN, 2012).

### 2.5.6 Operador de cruzamento

O processo de cruzamento (*crossover*) é feito a partir da recombinação de pares de indivíduos (*pais*), imitando o processo natural de reprodução sexuada. Nesse processo é gerado um ponto de corte que divide os cromossomos em duas partes, gerando dois novos cromossomos. A Figura 15 ilustra esse método.

Figura 15 - Exemplo de cruzamento



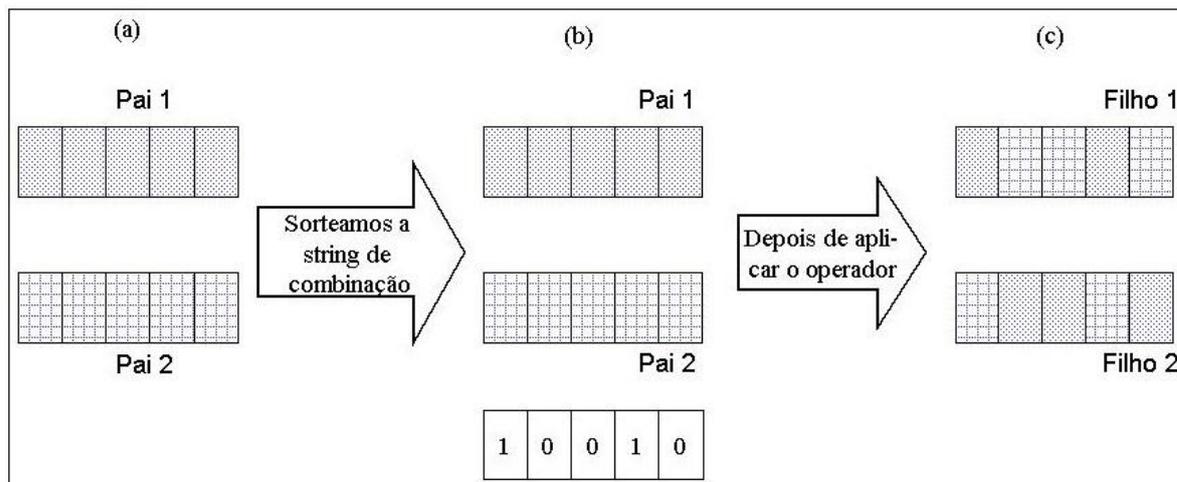
Fonte: NALDI (2013)

Segundo Moreira Silva (2013), os operadores de cruzamento são divididos em três grupos:

- operadores convencionais: é composto pelos operadores *Uniforme* e de *N Pontos* (Figura 14, para  $N=1$ );
- operadores aritméticos: esse grupo é composto pelos operadores de *Média Aritmética*, *Média Geométrica*, *Michalewicz*, *Blend –  $\alpha$* , *Unimodal Normal Distribution*, *Simulated Binary* e *Simplex*;
- operadores heurísticos.

#### 2.5.6.1 Crossover Uniforme

No operador de cruzamento uniforme, diferentemente do operador de *N pontos*, não são escolhidos *N* pontos de cruzamento, mas é sorteado para cada gene um número zero ou um. Se o número sorteado for um, o primeiro filho recebe o gene do primeiro pai e o segundo filho recebe o gene do segundo pai. De outro modo, se o número sorteado for zero, as atribuições dos genes serão invertidas (LINDEN, 2012). Esse método se torna mais claro na Figura 16.

Figura 16 - Funcionamento do *crossover* uniforme

Fonte: LINDEN (2012)

O *crossover* uniforme, em comparação ao *crossover* de *N Pontos*, tem um tempo de processamento um pouco mais lento, mas devido a sua maior capacidade de combinar esquemas, tende a obter resultados superiores (LINDEN, 2012).

### 2.5.7 Operador de mutação

Após o operador de cruzamento compor os dois filhos, entra em ação o operador de mutação. Consiste em alterar o valor de um gene para outro valor aleatório, mas com uma probabilidade extremamente baixa. Todos os genes dos filhos passam por esse método (LINDEN, 2012). O processo de mutação pode ser visto na Figura 17.

Figura 17 - Exemplo de mutação



Fonte: NALDI (2013)

O operador de mutação serve para aumentar a diversidade dos cromossomos na população, entretanto, informações úteis contidas nos cromossomos podem ser

perdidas. Dessa maneira, a taxa de mutação deve ser baixa, mas suficiente para manter a diversidade da população (NALDI, 2013).

### 2.5.8 Parâmetros Genéticos

Segundo Linden (2012), a efetividade de um algoritmo genético para resolver um problema está diretamente ligada ao correto ajuste dos parâmetros que são utilizados durante a sua execução. Não existem valores ideais de parâmetros, eles devem ser otimizados para cada problema.

#### 2.5.8.1 Tamanho da população

Definir corretamente o tamanho da população é importante, pois afeta diretamente o desempenho global e a eficiência do algoritmo genético. Com uma população muito pequena, o algoritmo pode sofrer com o problema de convergência prematura, obtendo soluções locais e não globais. Em contrapartida, a utilização de uma população muito grande requer níveis maiores de processamento, deixando assim a execução do algoritmo lenta (MOREIRA SILVA, 2013).

#### 2.5.8.2 Taxa de cruzamento

Com uma taxa de cruzamento alta, novas estruturas serão introduzidas na população, mas o algoritmo pode perder estruturas com boas aptidões. Já com a taxa muito baixa, o algoritmo se torna lento (MOREIRA SILVA, A. J., 2013).

#### 2.5.8.3 Taxa de mutação

Uma taxa de mutação muito alta deve ser evitada, pois tornará a busca pela solução do problema completamente aleatória (MOREIRA SILVA, 2013). Com uma taxa de mutação baixa a população perde sua diversidade, podendo resultar em uma convergência prematura (LINDEN, 2012).

#### 2.5.8.4 Taxa de substituição

A taxa de substituição define a porcentagem da população a ser substituída. Uma taxa muito alta pode resultar em perdas de estruturas. Com uma taxa muito baixa, o algoritmo se torna lento (MOREIRA SILVA, 2013).

#### 2.5.8.5 Condição de parada

Em um algoritmo de otimização, a condição de parada ideal seria quando o ponto ótimo fosse encontrado. No caso de funções multimodais, não há como afirmar com certeza se o ponto ótimo encontrado corresponde ao ótimo global. Dessa maneira, utiliza-se como condição de parada o critério do *número máximo de gerações* ou um tempo limite de processamento. Outro método de parada é a ideia de *estagnação*, que ocorre se o algoritmo não apresentar melhora na aptidão média ou na aptidão do melhor indivíduo ou quando as aptidões dos indivíduos de uma população se tornarem muito parecidas, após várias gerações consecutivas (MOREIRA SILVA, 2013).

### 2.5.9 Restrições

Grande parte dos problemas reais envolvem restrições, sejam elas financeiras, regulatórias ou mercadológicas. No âmbito científico, planos limítrofes, dependências numéricas e outras restrições devem ser obedecidas para que o problema possa ser validado (LINDEN, 2012).

Um problema de otimização sujeito a restrições é composto de uma tripla  $\langle S, f, \Phi \rangle$ , onde,  $S$  é um espaço de busca,  $f$  é a função objetivo do problema e  $\Phi$  é um conjunto de uma ou mais fórmulas lógicas que dividem o espaço de busca  $S$  em uma região admissível e uma região de pontos inviáveis ou inadmissíveis (LINDEN, 2012).

Segundo Linden (2012), existem dois tipos de restrições:

- a) *Hard Constraints*: devem ser obrigatoriamente obedecidas, pois, se não forem, fazem com que a solução se torne inadmissível;

- b) *Soft Constraints*: são desejáveis, mas podem ser desobedecidas se necessário.

Entretanto, eliminar cromossomos da população que não respeitam as restrições não é totalmente recomendável. Alguns cromossomos podem estar muito perto do espaço de busca e podem ter características importantes e se eliminados podem afetar o progresso populacional (LINDEN, 2012).

#### 2.5.9.1 Método de penalização de cromossomos

A forma mais simples lidar com indivíduos inviáveis, mas mantendo o progresso populacional, é designar uma avaliação baixa arbitrária a eles. A penalização de cromossomos consiste em associar um valor numérico ao descumprimento de cada restrição e penalizar o cromossomo com esse valor, diminuindo sua avaliação proporcionalmente (LINDEN, 2012).

De acordo com Linden (2012), a penalização pode ser feita de três maneiras:

- a) estática: pode ser feita usando-se faixas de violação ou usando-se uma métrica absoluta da violação cometida. Não se altera com a execução do algoritmo;
- b) dinâmica: é definida uma função para a evolução da punição com o tempo, que aumente o valor da punição com o decorrer do algoritmo. No início do algoritmo, a penalidade pode ser menor para permitir o progresso da população. Com a evolução da população, não há necessidade de manter soluções com restrições.
- c) adaptativa: a função de penalização varia de acordo com a avaliação da população. Se em determinado período a porcentagem da população dentro da região admissível for maior, a punição é diminuída caso contrário, seu valor aumenta.

É importante salientar que ao usar o método da roleta, as avaliações de todos os cromossomos devem ser estritamente positivas (LINDEN, 2012).

## 2.6 ABORDAGENS DA LITERATURA

Pavitrha e Esther (2017) simulam a utilização de algoritmos genéticos como método de controle de resposta a demanda, com a finalidade de reduzir a demanda geral de carga de pico e o custo operacional. Os programas utilizados são o controle direto da carga e a precificação em tempo real. A estratégia de modelagem da demanda é a realocação de cargas.

A aplicação é feita sobre uma residência e serviços públicos, como hospitais, escolas e clubes. Divide o estudo em áreas rural, urbana e vilas. O trabalho demonstra que a redução no custo da concessionária é maior nos finais de semana.

Em uma abordagem semelhante Chen *et al* (2013) utiliza uma tarifa que varia ao longo do dia de acordo com a demanda. O algoritmo trabalha com dois tipos de cargas: elásticas e inelásticas. As cargas elásticas são as cargas acessíveis e que podem ser realocadas ao longo do dia, como por exemplo o carregamento de veículos elétricos. O objetivo do algoritmo é encontrar a menor tarifa para o consumidor. A curva de carga é conhecida com 24 horas de antecedência, assim como o preço médio da tarifa diária e o peso de preço por hora. Adiciona a restrição de consumo máximo de contrato, onde mesmo o algoritmo atingindo a menor tarifa para o cliente, limita o consumo de energia para que não exceda a oferta. O critério de parada utilizado foi o número de gerações, estipulado em 5000. O tamanho da população foi determinado em 30. A nova população foi gerada por meio do método de elitismo. A inicialização da população é aleatória.

Xu *et al* (2017) apresenta um método de controle por blocos com escalonamento de cargas. O objetivo é a geração constante de energia. Segundo os autores, a geração de energia por meio de termoelétricas apresenta um custo menor de operação quando operado de forma contínua, pois os processos de partida e parada demandam uma maior quantidade de carvão. Sendo assim, o algoritmo trabalha com o objetivo de manter as termoelétricas operando de forma contínua, mas respeitando a oferta máxima de energia. No que tange as cargas, as mesmas são realocadas em diferentes horários, podendo ser divididas em várias partes. Se uma bateria leva duas horas para carregar, ela pode ser dividida em dois blocos de uma hora, o processo de carregamento não precisa ser necessariamente contínuo. A inicialização da população apresentada nesse trabalho se diferencia das demais. Na grande maioria das vezes, a população é iniciada aleatoriamente. Nesse caso, o

algoritmo passa por duas etapas. O algoritmo é iniciado com o método tradicional e executado por 500 gerações, em seguida seleciona o melhor indivíduo para gerar outra população e então executar o algoritmo de otimização.

Polaki, Reza e Roy (2015) aplicam o gerenciamento de resposta a demanda utilizando um AG para consumidores residenciais, separando-os em três categorias de consumo: clientes com demanda máxima de até 50kWh (U1), 100kWh (U2) e 150 kWh (U3). Foram considerados 50 clientes por categoria. O consumo e as tarifas são conhecidos com um dia de antecedência. O objetivo a ser alcançado é o menor custo de energia para o cliente escalonando as cargas durante o período de um dia. O critério de parada é definido em 1000 gerações, com a utilização do operador de cruzamento de um ponto e sua população foi definida em 100 indivíduos. Além disso, o algoritmo compara a utilização de duas funções de aptidão. Na primeira função a busca é pelo indivíduo que gera o menor custo e a segunda seleciona os 90% melhores e 10% piores de todos os cromossomos. O algoritmo é executado 20 vezes e o resultado final é calculado por meio de uma média ponderada. Os clientes da categoria U1 obtiveram um melhor resultado a partir da segunda função, já os clientes das categorias U2 e U3 obtiveram melhores resultados com a primeira função de aptidão.

Always *et al* (2015) expandem o gerenciamento de resposta a demanda incluindo os setores comercial e industrial. O algoritmo utiliza a realocação de cargas para minimizar os custos e a razão pico média de demanda. Ainda, foram utilizados um grande número de cargas controláveis, sendo 2600 no setor residencial, 800 no setor comercial e 100 no setor industrial. Utilizando codificação binária, o tamanho da população foi definido em 200 cromossomos e o critério de parada foi definido em 500 gerações. A técnica de seleção foi o método de torneio e a nova população foi gerada por meio do método de elitismo. O algoritmo obteve uma redução no custo de aproximadamente 17,1% no setor residencial, 21,9% no setor comercial e 26,7% no setor industrial. A redução da razão pico média de demanda ultrapassou os 20% nos três setores.

Salami e Farsi (2015) apresentam um sistema de resposta a demanda que compara resultados do ponto de vista do consumidor e da concessionária. O algoritmo trabalha com duas variáveis de peso,  $K_1$  e  $K_2$ , que variam entre 0 e 1 e a soma das duas deve ser igual a 1. A curva de carga é alterada com uma programação de um dia de antecedência. No primeiro cenário, com  $K_1=1$  e  $K_2=0$ , o controle de cargas é

feito pelo lado do cliente, com o objetivo de reduzir os custos. No segundo cenário, com  $K_1=0$  e  $K_2=1$ , o controle de cargas é feito pelo lado da concessionária, com o objetivo de reduzir os custos e reduzir o pico. No terceiro cenário, com  $K_1=0,5$  e  $K_2=0,5$ , o controle de cargas é feito por ambos, com o objetivo de reduzir os custos do cliente e da concessionária e reduzir o pico, sendo esse o que gerou os melhores resultados.

Hu *et al* (2013) chegam ainda mais longe utilizando múltiplos objetivos e fazendo a comparação com o algoritmo de objetivo único. Utilizam o controle de carga direto para realizar o escalonamento de cargas. As tarifas e a demanda são conhecidas com um dia de antecedência. Abrange os setores residencial, comercial e industrial.

O primeiro objetivo é reduzir o pico de consumo, que beneficia mais o lado da concessionária. O segundo objetivo é direcionado para o cliente, onde a solução ideal é minimizar a fatura de eletricidade total.

O critério de parada utilizado foi de 5000 gerações com uma população de 200 cromossomos. Foram realizados 50 ensaios, onde 9 em cada 10 soluções do método de múltiplos objetivos apresentam resultados superiores as soluções de objetivo único.

Na Tabela 10 são apresentados os principais aspectos dos trabalhos analisados nesta revisão da literatura.

Tabela 10 - Revisão da Literatura

<b>Autor</b>	<b>Objetivo</b>	<b>Grupo(s)</b>	<b>Horizonte</b>	<b>Estratégia de modelagem da curva de consumo</b>	<b>Métodos</b>	<b>Parâmetros</b>
PAVITHRA et al (2017)	Minimizar picos de consumo	Residencial, Serviços Públicos	1 Semana	Tarifa de Hora do Dia; Realocação de cargas;	N/A	N/A
CHEN et al (2013)	Minimizar tarifa para o consumidor	Residencial	24 Horas	Precificação dinâmica, possui uma tarifa média que varia por hora através de pesos; Realocação de cargas.	Inicialização: Aleatória Seleção: Roleta Método de população: Elitismo	Critério de parada: 5000 gerações Tamanho da população: 30 Taxa de cruzamento: 1 Taxa de mutação: 0,02
XU et al (2017)	Minimizar interrupções de consumo, garantindo a continuidade da geração de energia	Residencial	24 Horas	Combinação de demandas de cargas comutáveis;	Inicialização: Aleatória, modificada.	N/A
POLAKI et al (2015)	Minimização do custo para o cliente	Residencial	24 horas	Precificação dinâmica por hora; Realocação de cargas.	Codificação: Binária Inicialização: Aleatória Cruzamento: De um ponto Seleção: Melhor indivíduo Método de população: Parcial	Critério de parada: 1000 gerações Tamanho da população: 100
AWAIS et al (2015)	Minimizar razão-pico-média e consumo	Residencial, Comercial, Industrial	24 Horas	Precificação dinâmica por hora; Realocação de cargas.	Codificação: Binária Inicialização: Aleatória Cruzamento: De um ponto Seleção: Torneo Método de população: Elitismo	Critério de parada: 500 gerações Tamanho da população: 200 Taxa de cruzamento: 0,9 Taxa de mutação: 0,1
SALAMI et al (2015)	Minimizar o pico de consumo e reduzir os custos pelo lado do cliente e da concessionária	Residencial, Industrial	24 Horas	Tarifa de tempo de uso; Realocação de cargas.	N/A	N/A
HU et al (2013)	Minimizar a fatura de eletricidade e o pico de consumo	Residencial, Comercial, Industrial	24 Horas	Precificação dinâmica por hora; Realocação de cargas.	Codificação: Decimal	Critério de parada: 5000 Tamanho da população: 200 Taxa de cruzamento: 0,9 Taxa de mutação: 0,1

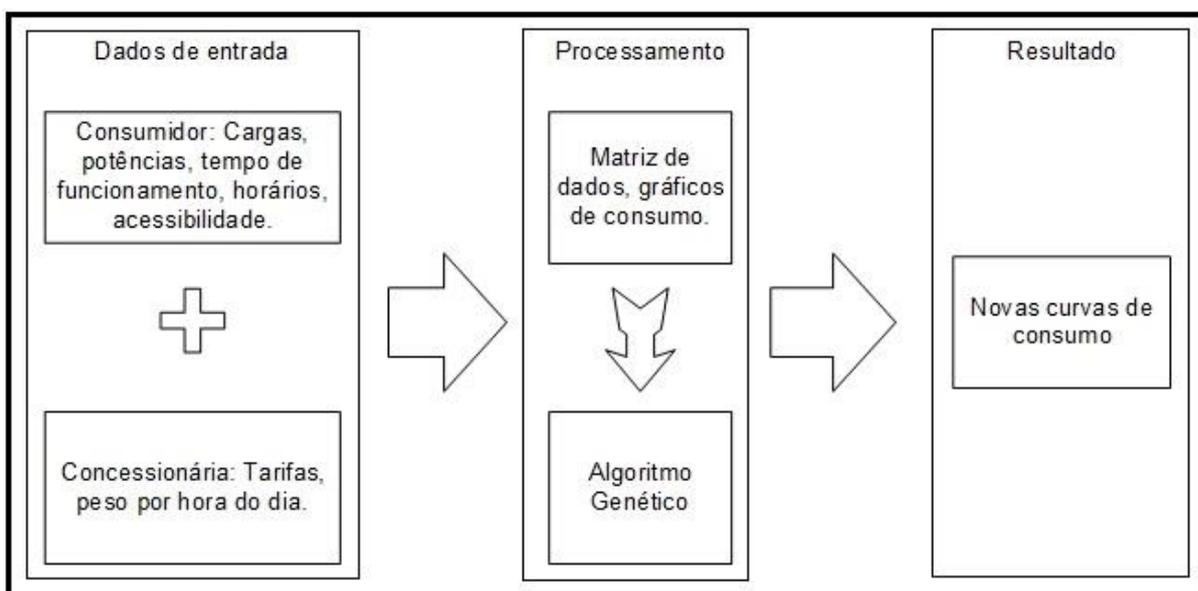
Fonte: O autor (2019)

### 3 METODOLOGIA

Devido aos vários trabalhos de otimização combinatória relatados em Goldberg & Luna (2005) e Linden (2012), além é claro, dos trabalhos apresentados na seção 2.6, a técnica de otimização será por meio de algoritmos genéticos. Nos trabalhos apresentados na seção 2.6, é utilizada como estratégia de resposta a demanda, a realocação de cargas combinada com programas baseados em preços, com destaque para a precificação dinâmica. Desse modo, sabendo-se que a proposta desse trabalho é desenvolver um algoritmo genético capaz de gerenciar a resposta a demanda residencial, optou-se por utilizar a estratégia de realocação de cargas com um horizonte de 24 horas e como programa foi utilizado a precificação dinâmica. Embora a estratégia de controle e o programa de RD utilizado se assemelhem com a maioria dos artigos apresentados, a função de avaliação do AG, assim como sua implementação são de origem do autor.

Os dados de entrada são as curvas de carga dos consumidores juntamente com a curva de tarifas por hora da concessionária. A próxima etapa é combinar os dados em uma matriz e gerar os gráficos de consumo, individual e global dos consumidores. Em seguida as cargas acessíveis são realocadas utilizando o algoritmo genético e por fim são geradas as novas curvas de consumo. A Figura 18 ilustra esse processo.

Figura 18 – Fluxograma do sistema proposto



Fonte: O autor (2019)

### 3.1 CONSUMIDORES

Foram gerados 100 consumidores residenciais, divididos em 5 faixas de consumo mensal: 101-200kWh, 201-300kWh, 301-400kWh, 401-500kWh e 501-1000kWh. A curva de carga de cada consumidor representa o consumo médio mensal, não representando um dia típico. Essa forma de representação foi escolhida em decorrência de que o uso de energia nos finais de semana difere do uso de energia durante a semana, além de que o uso de alguns equipamentos eletrodomésticos não é diário. Portanto, a escolha de um dia da semana não representaria adequadamente o impacto que cada eletrodoméstico implica no consumo mensal.

Cada equipamento cadastrado em um consumidor acompanha as informações necessárias para gerar seu consumo médio mensal, que são:

- a) Nome;
- b) Potência;
- c) Acesso;
- d) Continuidade;
- e) Tempo de uso diário (horas);
- f) Dias de uso por mês;
- g) Períodos ativo.

Após entrar com os dados, é calculado o consumo mensal do equipamento e esse é dividido por 30 dias para determinar o consumo diário médio, que por sua vez é dividido pelo número de períodos ativos para encontrar sua potência equivalente, que foi utilizada na curva de carga. Um exemplo desse método é mostrado na Tabela 11. O período ativo assume apenas valores inteiros, sendo 1 hora o menor período de uso e 24 horas o maior período de uso.

Tabela 11 - Dados de entrada para curva de carga de um consumidor

Equipamento	Potência (W)	Acesso	Contínua	Tempo (horas)	Dias por mês	Consumo mensal (kWh)	Períodos ativo (horas)
Geladeira	200			08:00	30	48	24
Boiler	1500	x		00:58	30	43,5	1
Aparelho de TV	200			02:00	30	12	2
Iluminação	50			05:00	30	7,5	5
Iluminação	100			01:00	30	3	1
Celular(es)	5			06:00	30	0,9	6
Máquina de lavar roupas	1500	x	x	01:00	13	19,5	1

Fonte: O autor

Por fim, são determinados quais os períodos do dia em que cada aparelho está ativo. O período recebe o valor de 1 para ativo e 0 para inativo, como mostram as Tabelas 12 e 13.

Tabela 12 - Períodos ativos para cada equipamento (0 a 12)

Equipamento	Período (hora)											
	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11	11-12
Geladeira	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Boiler	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Aparelho de TV	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Iluminação	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Iluminação	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Celular(es)	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0
Máquina de lavar roupas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: O autor

Tabela 13 - Períodos ativos para cada equipamento (12 a 24)

Equipamento	Período (hora)											
	12-13	13-14	14-15	15-16	16-17	17-18	18-19	19-20	20-21	21-22	22-23	23-24
Geladeira	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Boiler	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Aparelho de TV	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
Iluminação	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0
Iluminação	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Celular(es)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Máquina de lavar roupas	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0

Fonte: O autor

Os equipamentos de refrigeração, como freezers e geladeiras foram considerados com período ativo de 24 horas. A potência da iluminação foi considerada como um conjunto de lâmpadas e não por lâmpada.

Os equipamentos determinados acessíveis são equipamentos que podem ser programados para executar sua função em qualquer período do dia sem que haja perda de conforto por parte do consumidor, desde que respeite o tempo ativo e a continuidade de trabalho. Foram escolhidos 4 equipamentos como acessíveis: boiler de aquecimento para banho, máquina de lavar louças, máquina de lavar roupas e máquina lava e seca roupas. O boiler de aquecimento substitui o chuveiro elétrico, podendo armazenar a quantidade de água para os banhos diários e aquecê-la no

período em que a tarifa de energia é mais barata. Os demais equipamentos podem ser abastecidos e ter seu ciclo de limpeza pré-programado para operar a qualquer hora do dia. Assume-se que todos os equipamentos possuam sistemas de controle para aplicar a programação diária determinada pelo algoritmo.

A curva de carga de cada consumidor tem como base a curva de carga diária média do Brasil (mostrada na Figura 3), assim como a participação no consumo final de cada equipamento (ilustrado na Figura 4), a posse média de equipamentos (Tabela 1) e o consumo anual por equipamento (Tabela 3). Os consumidores abordados nesse trabalho, com consumo entre 101kW a 1000kW, representam cerca de 67,3% da quantidade de consumidores e 85,1% do consumo residencial no Brasil. Como grande parte do número de consumidores não foi abordado, os modelos gerados, embora se assemelhem com os dados de base, não são uma representação fiel desses dados pois esses representam valores médios. A seguir são apresentados a curva de carga e as estatísticas dos consumidores divididos por faixa de consumo.

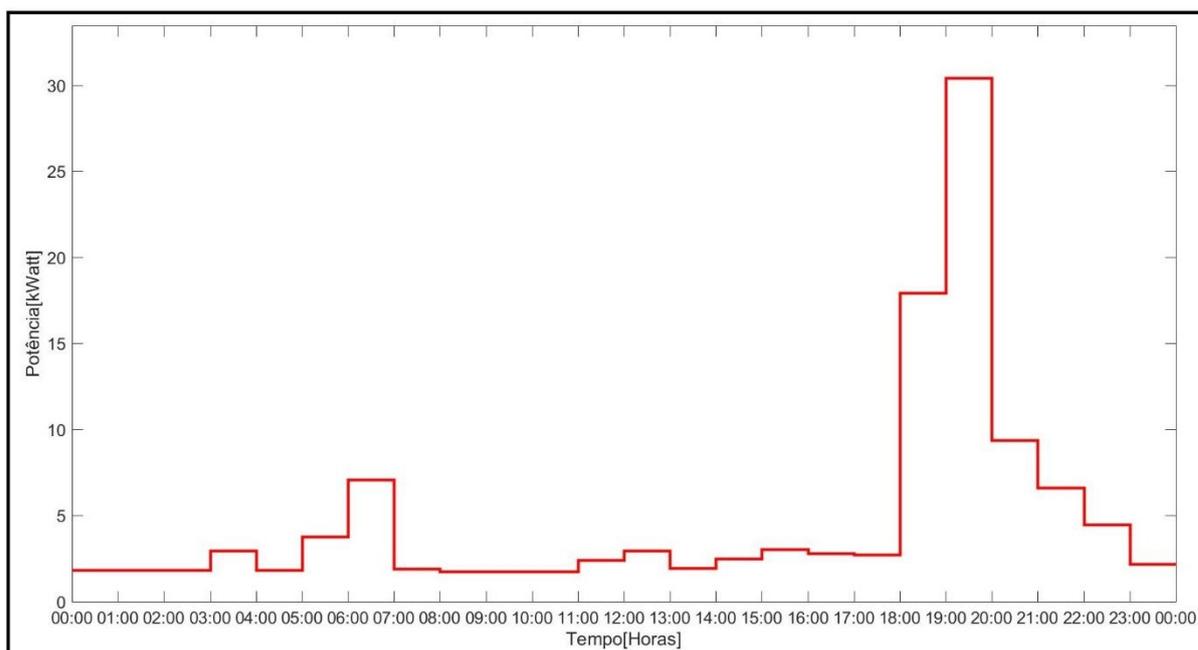
Na Tabela 14 são apresentadas as estatísticas pertencentes a faixa de 101-200kWh. A curva de consumo dessa faixa é mostrada na Figura 19.

Tabela 14 - Estatísticas da faixa de consumo de 101- 200kWh

<b>Equipamento</b>	<b>Participação final (%)</b>	<b>Quantidade de equipamentos</b>	<b>Consumo anual por equipamento (kW)</b>
Geladeira	35,71	1	576,00
Freezer	0,00	0	0,00
Aquecimento	32,37	1	522,00
Som	0,00	0	0,00
TV	8,93	1	144,00
Ar condicionado	0,00	0	0,00
Iluminação	7,81	2	63,00
Máq. Lavar louças	0,00	0	0,00
Máq. Lavar roupas	14,51	1	234,00
Outros	0,67	1	10,80

Fonte: o autor (2019)

Figura 19 - Curva de consumo da faixa de 101- 200kWh



Fonte: o autor (2019)

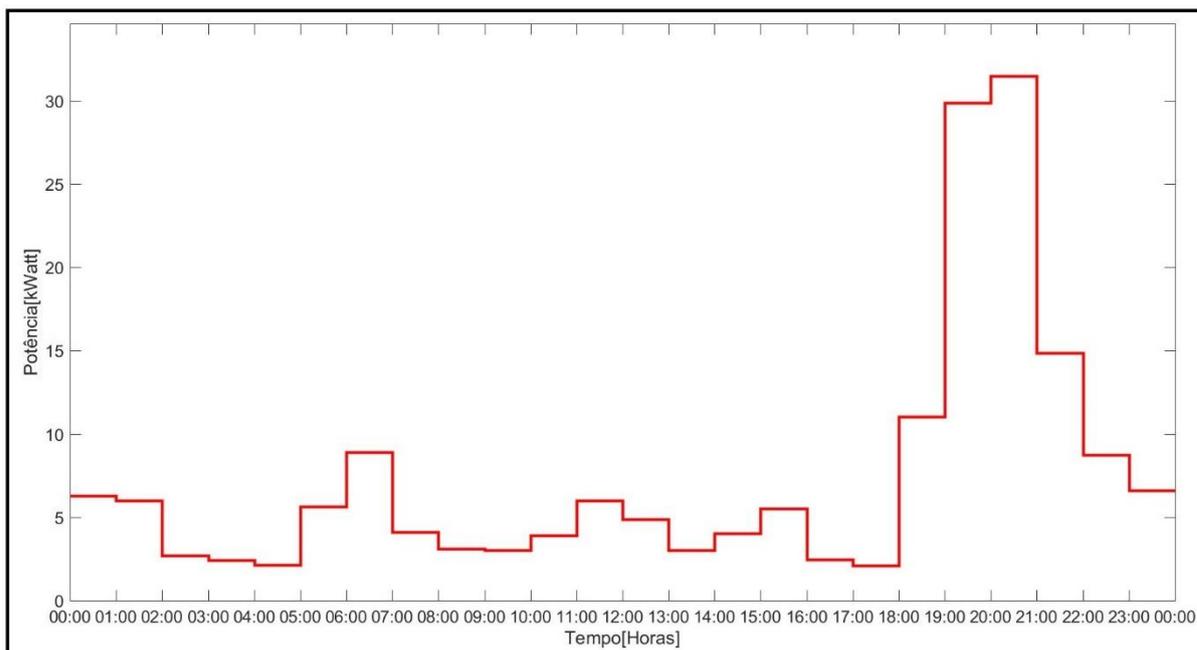
Na Tabela 15 são apresentadas as estatísticas pertencentes a faixa de 201-300kWh. A curva de consumo dessa faixa é mostrada na Figura 20.

Tabela 15 - Estatísticas da faixa de consumo de 201- 300kWh

Equipamento	Participação final (%)	Quantidade de equipamentos	Consumo anual por equipamento (kW)
Geladeira	23,22	20	741,6
Freezer	0	0	0
Aquecimento	29,43	20	959,25
Som	1,08	10	69,6
TV	6,56	18	236,53
Ar condicionado	8,04	16	320,4
Iluminação	6,37	40	50,63
Máq. Lavar louças	0	0	0
Máq. Lavar roupas	11,7	20	378
Outros	13,6	108	14,79

Fonte: o autor (2019)

Figura 20 - Curva de consumo da faixa de 201- 300kWh



Fonte: o autor (2019)

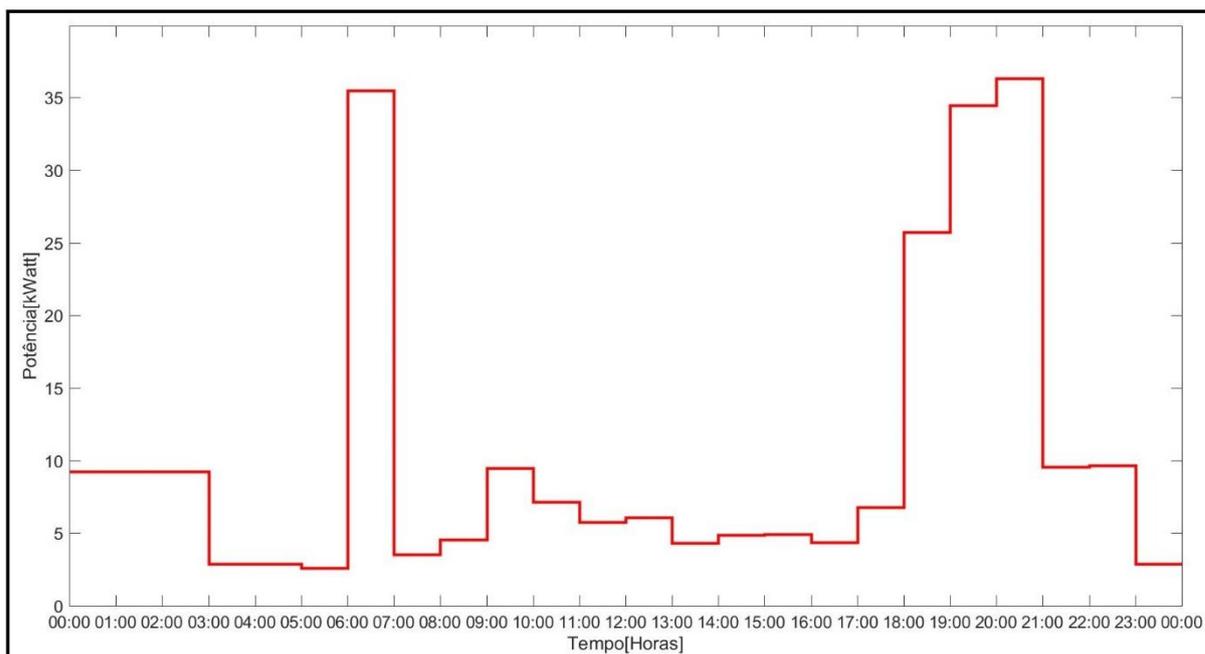
Na Tabela 16 são apresentadas as estatísticas pertencentes a faixa de 301-400kWh. A curva de consumo dessa faixa é mostrada na Figura 21.

Tabela 16 - Estatísticas da faixa de consumo de 301- 400kWh

Equipamento	Participação final (%)	Quantidade de equipamentos	Consumo anual por equipamento (kW)
Geladeira	19,49	20	882
Freezer	0	0	0
Aquecimento	28,18	20	1271,1
Som	1,56	19	74,53
TV	4,62	19	220,42
Ar condicionado	7,54	12	574,05
Iluminação	10,71	52	69,66
Máq. Lavar louças	0	0	0
Máq. Lavar roupas	11,03	20	501,3
Outros	16,88	167	12

Fonte: o autor (2019)

Figura 21 - Curva de consumo da faixa de 301- 400kWh



Fonte: o autor (2019)

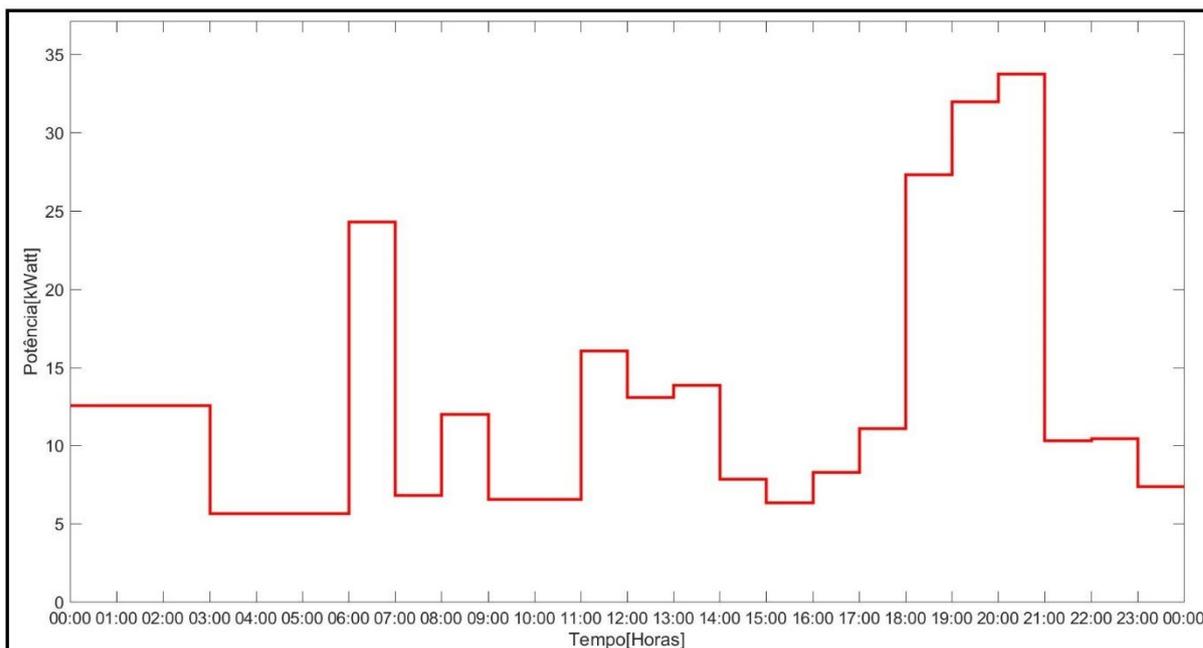
Na Tabela 17 são apresentadas as estatísticas de consumo de um cliente com consumo mensal de 430,15kWh, pertencente a faixa de 401-500kWh. Sua curva de carga é mostrada na Figura 22.

Tabela 17 - Estatísticas da faixa de consumo de 401- 500kWh

Equipamento	Participação final (%)	Quantidade de equipamentos	Consumo anual por equipamento (kW)
Geladeira	25,28	20	1404,9
Freezer	8,51	16	585,9
Aquecimento	17,72	20	992,55
Som	1,2	20	66,48
TV	1,82	39	25,97
Ar condicionado	8,02	31	177,22
Iluminação	9,4	76	36,95
Máq. Lavar louças	2,73	15	201,6
Máq. Lavar roupas	13,37	20	743,85
Outros	11,96	267	3,8

Fonte: o autor (2019)

Figura 22 - Curva de consumo da faixa de 401- 500kWh



Fonte: o autor (2019)

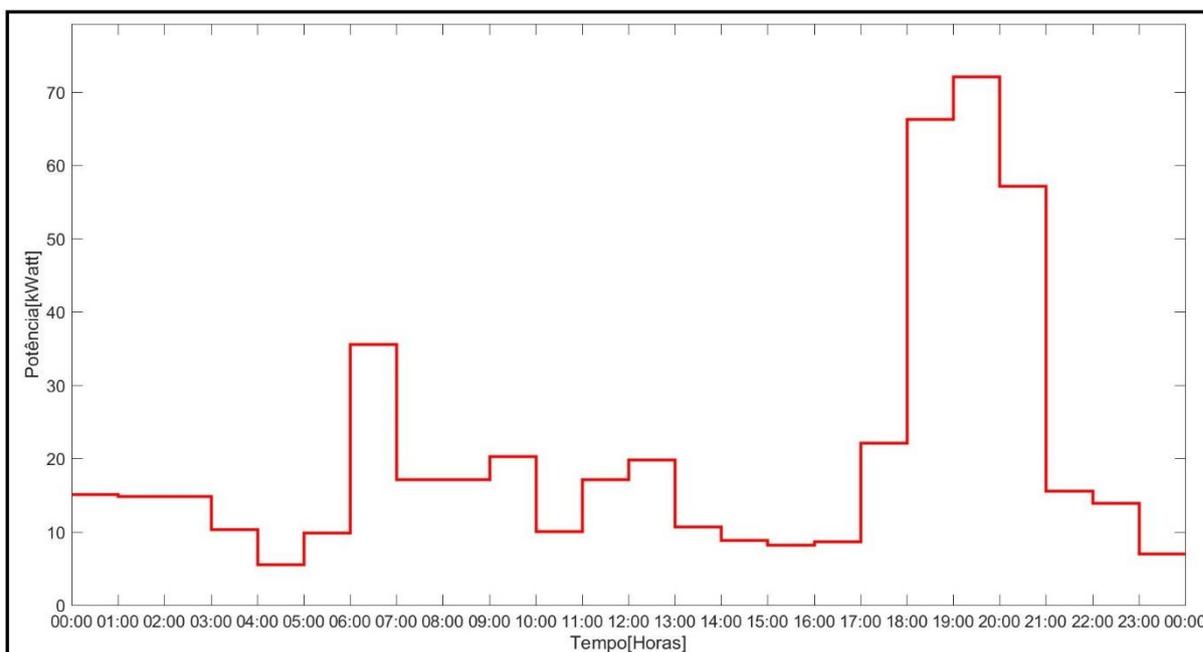
Na Tabela 18 são apresentadas as estatísticas de consumo de um cliente com consumo mensal de 696,775kWh, pertencente a faixa de 501-1000kWh. Sua curva de carga é mostrada na Figura 23.

Tabela 18 - Estatísticas da faixa de consumo de 501- 1000kWh

Equipamento	Participação final (%)	Quantidade de equipamentos	Consumo anual por equipamento (kW)
Geladeira	16,44	21	1354,11
Freezer	3,86	11	629,35
Aquecimento	30,36	20	2646,15
Som	0,71	23	46,75
TV	1,95	32	75,09
Ar condicionado	7,33	33	221,7
Iluminação	7,9	74	52,57
Máq. Lavar louças	3,65	9	814,2
Máq. Lavar roupas	15,34	20	1416,83
Outros	12,46	272	6,17

Fonte: o autor (2019)

Figura 23 - Curva de consumo da faixa de 501- 1000kWh



Fonte: o autor (2019)

### 3.1.1 Estatísticas totais dos consumidores

Os modelos de consumo foram baseados em dados estatísticos, apresentados no capítulo 2. A Tabela 19 apresenta os dados que serviram de base para montar os modelos de consumo. Os dados da participação final de cada equipamento no consumo, foram retirados de duas referências, onde a primeira referência (mostrada na Figura 2) representa dados de 2007 da ELETROBRÁS e a segunda referência (mostrada na Figura 4) representa uma estimativa de consumo para o ano de 2017, da EPE. A estimativa de consumo da EPE foi baseada no mesmo estudo de 2007 da ELETROBRÁS. Os dados sobre a quantidade de equipamentos por 100 consumidores (mostrados na Tabela 1) e consumo anual por equipamento (mostrado na Tabela 4) foram retirados da EPE, que também fazem parte de uma estimativa da empresa, ou seja, esses dados não foram coletados.

Na Tabela 20 são apresentadas as estatísticas totais dos modelos criados pelo autor. É possível ver algumas diferenças nos valores comparados com os dados de base.

Tabela 19 - Estatísticas de consumo base

Equipamento	Participação final (%) Ref. 1	Participação final (%) Ref. 2	Quantidade de equipamentos por 100 consumidores	Consumo anual por equipamento (kW)
Geladeira	22	18	103	320
Freezer	5	4	17	474
Chuveiro	24	14,5	62	502
Som	3	N/a	N/a	N/a
TV	9	15,5	192	171
Ar condicionado	20	14	26	631
Iluminação	14	12,5	885	21
Máq. Lavar louças	N/a	N/a	N/a	N/a
Máq. Lavar roupas	N/a	2,5	76	63
Outros	3	19	N/a	N/a

Fontes: ELETROBRÁS (2007), EPE (2018a), EPE (2016), adaptado.

Nos dados base, as estatísticas do chuveiro se referem unicamente a chuveiros elétricos, desconsiderando qualquer outra forma de aquecimento de água para banho. Diferentemente dos dados de base, neste trabalho a iluminação não foi considerada por lâmpada, mas por conjuntos de lâmpadas.

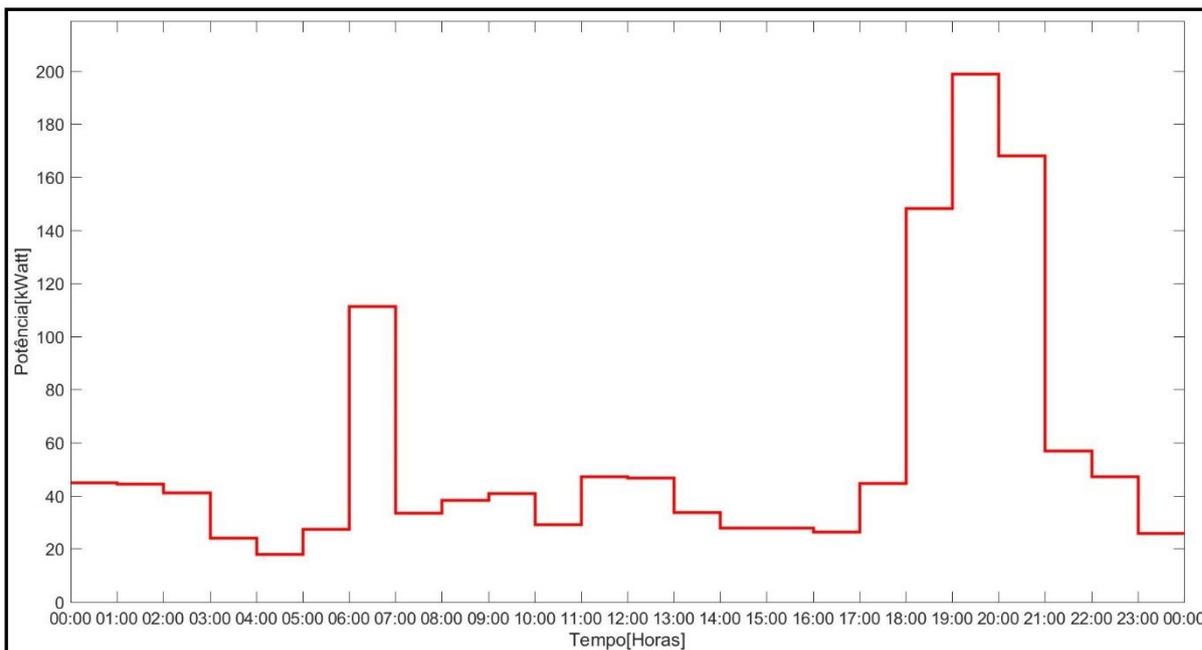
Tabela 20 - Estatísticas de consumo dos modelos criados

Equipamento	Participação final (%)	Quantidade de equipamentos por 100 consumidores	Consumo anual por equipamento (kW)
Geladeira	23,58	101	1020,97
Freezer	2,47	27	603,6
Aquecimento	26,66	100	1289,85
Som	1,07	78	62,52
TV	4,14	126	112,99
Ar condicionado	6,18	92	269,83
Iluminação	8,59	282	50,2
Máq. Lavar louças	1,28	24	431,32
Máq. Lavar roupas	12,72	100	659,12
Outros	13,31	877	8,79

Fonte: o autor (2019)

O consumo total dos clientes ficou em 40.661,54 kWh por mês. A curva de carga pode ser observada na Figura 24.

Figura 24 - Curva de carga dos consumidores



Fonte: o autor (2019)

### 3.1.2 Substituição do chuveiro por boiler

De acordo com a tabela disponível no Anexo A, um chuveiro elétrico possui potência de 5500W. A potência de um boiler comercial varia entre 1500W e 5000W, de acordo com a capacidade de armazenamento, como apresentado na Tabela 21. Mais detalhes sobre os boilers podem ser vistos no Anexo B.

Tabela 21 - Potência e capacidade para boilers comerciais

Capacidade (L)	Potência (W)
150	1500
200	2000
300	2500
600	3000
800	5000

Fonte: Broilo (2019), adaptado.

Devido a potência do chuveiro ser maior, ele aquece a água em menos tempo, desse modo, é necessário adaptar o tempo de funcionamento do boiler para aquecer a mesma quantidade de água, à mesma temperatura. Para encontrar essa relação, é

necessário primeiramente determinar o aquecimento da água. Parte-se da equação fundamental da calorimetria (1):

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta T \text{ [cal]} \quad (1)$$

Sendo:

$Q$ =calor (cal)

$m$ = massa (g)

$c$ = calor específico (cal/g. °C)

$\Delta T$ = variação da temperatura (°C)

O calor específico da água é de 1 cal/g. °C e sua massa é de aproximadamente 1g/mL.

Assim, chega-se a equação (2):

$$Q = 1000 \cdot L \cdot \Delta T \text{ [cal]} \quad (2)$$

A unidade de energia utilizada nesse trabalho é *KWh*, para determinar a relação entre *cal* e *KWh*, tem-se as equações (3) a (9):

$$1 \text{ cal} = 4,1868j \quad (3)$$

$$1j = 1 \frac{W}{s} \quad (4)$$

$$1 \text{ cal} = 4,1868Ws \quad (5)$$

Assim:

$$1 \text{ cal} = 0,000001163 \text{ kWh} \quad (6)$$

Logo:

$$Q = 1000 \cdot L \cdot \Delta T \cdot 0,000001163 \text{ [kWh]} \quad (7)$$

$$Q = 0,001163 \cdot L \cdot \Delta T \text{ [kWh]} \quad (8)$$

Ou aproximadamente:

$$Q = \frac{L \cdot \Delta T}{860} [kWh] \quad (9)$$

Para encontrar a potência basta dividir a energia pelo tempo. Como resultado é obtida a equação (10):

$$P = \frac{L \cdot \Delta T}{860 \cdot t} [kW] \quad (10)$$

Sendo:

$P$  = potência (kW)

$L$  = litros (L)

$\Delta T$  = variação da temperatura (°C)

$t$  = tempo (h)

Para o chuveiro os valores de  $P$  e  $\Delta T$  são constantes e a quantidade de água utilizada ( $L$ ) varia em função do tempo, como mostrado na equação 11:

$$L = \frac{P \cdot 860 \cdot t}{\Delta T} [litros] \quad (11)$$

Como apresentado na equação 12, para o acumulador mantém-se o valor de  $\Delta T$ , altera-se o valor de  $P$ , de acordo com o modelo, e o tempo ( $t$ ) varia de acordo com os valores de  $L$  encontrados na equação 11.

$$t = \frac{L \cdot \Delta T}{860 \cdot P} [horas] \quad (12)$$

Desse modo, um banho de 10 minutos em um chuveiro convencional com potência igual a 5500W utiliza aproximadamente 40 litros de água para um  $\Delta T=20$  °C. Para encontrar o tempo de funcionamento do boiler basta trocar o valor da potência, mantendo a quantidade de água e acrescentar 1 °C ao  $\Delta T$ , devido à perda térmica que pode ocorrer durante o dia. A quantidade de água utilizada determina a capacidade do boiler e conseqüentemente sua potência. É possível observar na

Tabela 22 os principais tempos de aquecimento para o boiler. Mais valores são apresentados no Apêndice A.

Tabela 22 - Tempos de aquecimento de água para boiler

Chuveiro convencional (5500W)		Boiler				
		150L 1500W	200L 2000W	300L 2500W	600L 3000W	800L 5000W
Tempo (horas)	Água utilizada (L)	Tempo (horas)				
0:10	39,42	0:38	0:28	0:23	0:19	0:11
0:15	59,13	0:57	0:43	0:34	0:28	0:17
0:20	78,83	1:17	0:57	0:46	0:38	0:23
0:25	98,54	1:36	1:12	0:57	0:48	0:28
0:30	118,25	1:55	1:26	1:09	0:57	0:34
0:35	137,96	2:14	1:41	1:20	1:07	0:40
0:40	157,67	2:34	1:55	1:32	1:17	0:46
0:45	177,38	2:53	2:09	1:43	1:26	0:51
1:00	236,50	3:51	2:53	2:18	1:55	1:09
1:30	354,75	5:46	4:19	3:27	2:53	1:43
2:00	473,00	7:42	5:46	4:37	3:51	2:18
2:30	591,25	9:37	7:13	5:46	4:48	2:53
3:00	709,50	11:33	8:39	6:55	5:46	3:27

Fonte: O autor

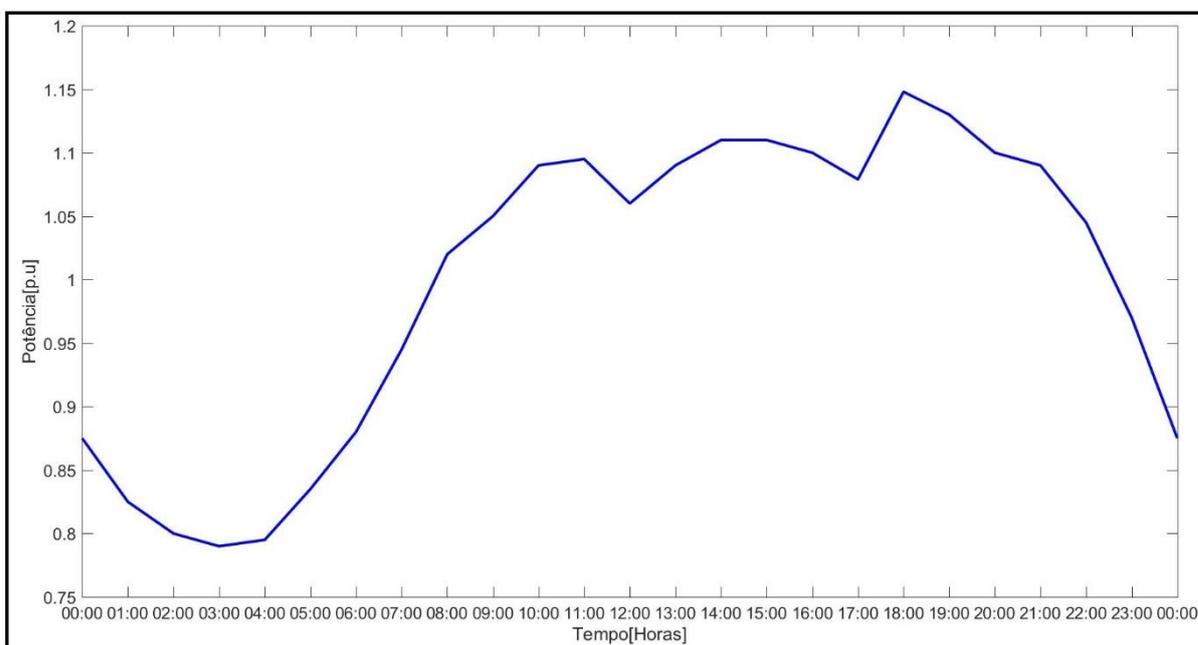
### 3.2 CONCESSIONÁRIA

Para os dados de entrada da concessionária, foi utilizada uma tarifa média de 0,60 R\$/kWh, que pode variar entre 0,30 R\$/kWh e 1,20 R\$/kWh. Os valores das tarifas são baseados nos valores da Tarifa Branca das concessionárias do Rio Grande do Sul, apresentados na Tabela 8. A variação das tarifas ocorre por meio de pesos por hora, uma abordagem semelhante é utilizada em Chen *et al* (2013). Os pesos são baseados na curva de carga nacional (mostrado na Figura 5), sendo que cada hora do dia possui um valor de tarifa próprio, diferentemente do que ocorre na Tarifa Branca.

A curva de carga varia de acordo com a estação do ano. Optou-se pela curva de carga do inverno (mostrada na Figura 25). Os pesos das tarifas são os valores em

p.u. da curva de carga elevado ao cubo. Os valores dos pesos e das tarifas são apresentados na Tabela 23 e a curva tarifária diária pode ser observada na Figura 26.

Figura 25 - Curva de carga nacional (inverno)



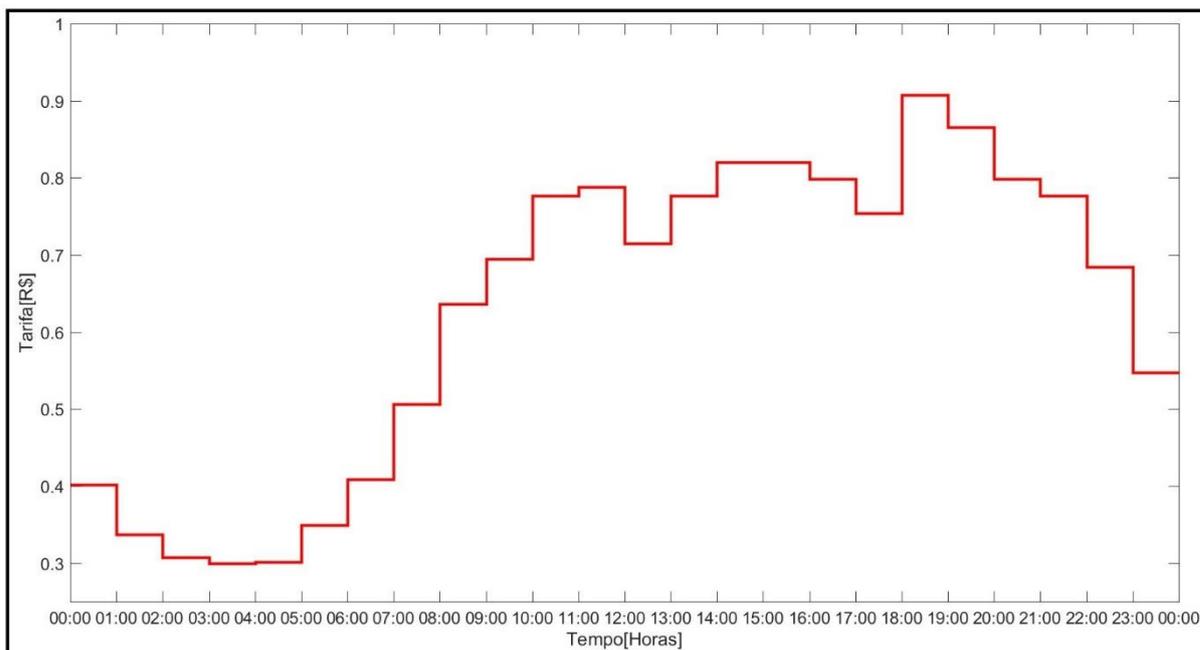
Fonte: EPE (2018a), adaptado.

Tabela 23 - Valores dos pesos e das tarifas por hora

Período	Demanda (p.u)	Peso (%)	Tarifa	Período	Demanda (p.u)	Peso (%)	Tarifa
<b>0</b>	0,875	0,669922	R\$ 0,402	<b>12</b>	1,06	1,191016	R\$ 0,715
<b>1</b>	0,825	0,561516	R\$ 0,337	<b>13</b>	1,09	1,295029	R\$ 0,777
<b>2</b>	0,8	0,512	R\$ 0,307	<b>14</b>	1,11	1,367631	R\$ 0,821
<b>3</b>	0,79	0,5	R\$ 0,300	<b>15</b>	1,11	1,367631	R\$ 0,821
<b>4</b>	0,795	0,50246	R\$ 0,301	<b>16</b>	1,1	1,331	R\$ 0,799
<b>5</b>	0,835	0,582183	R\$ 0,349	<b>17</b>	1,079	1,256216	R\$ 0,754
<b>6</b>	0,88	0,681472	R\$ 0,409	<b>18</b>	1,148	1,512954	R\$ 0,908
<b>7</b>	0,945	0,843909	R\$ 0,506	<b>19</b>	1,13	1,442897	R\$ 0,866
<b>8</b>	1,02	1,061208	R\$ 0,637	<b>20</b>	1,1	1,331	R\$ 0,799
<b>9</b>	1,05	1,157625	R\$ 0,695	<b>21</b>	1,09	1,295029	R\$ 0,777
<b>10</b>	1,09	1,295029	R\$ 0,777	<b>22</b>	1,045	1,141166	R\$ 0,685
<b>11</b>	1,095	1,312932	R\$ 0,788	<b>23</b>	0,97	0,912673	R\$ 0,548

Fonte: O autor

Figura 26 - Tarifas de energia por hora



Fonte: o autor (2019)

### 3.3 ESTRUTURA DE DADOS

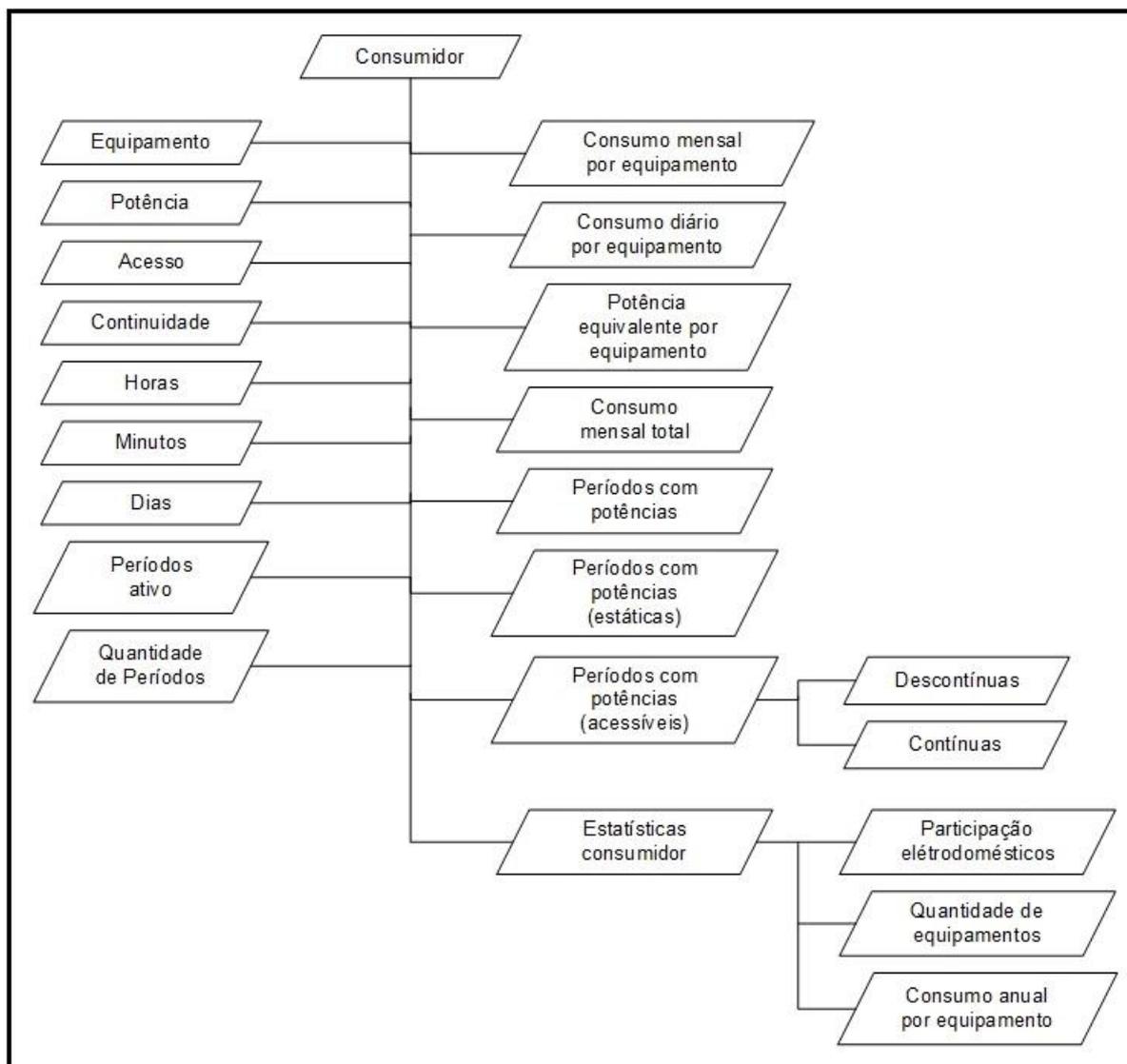
O cadastro de dados dos consumidores foi realizado no *software* Microsoft Office Excel e posteriormente esses dados foram importados para o *software* Matlab. Para facilitar a importação, as tabelas que representam cada consumidor seguem um padrão e estão dispostas sequencialmente respeitando as colunas da planilha. A diferença ocorre no número de linhas de cada tabela, que é determinado pela quantidade de cargas cadastradas no cliente. Portanto, no início e no final de cada tabela foram adicionadas as palavras “*Start*” e “*Stop*”, respectivamente, para que o algoritmo de importação de dados siga um protocolo de transferência entre o *software* Microsoft Office Excel e o *software* Matlab. Após a importação, os dados foram organizados em uma *struct* contendo todas as informações cadastradas.

A partir desses dados, foram calculadas as informações restantes para a execução desse trabalho, como consumo mensal por equipamento e consumo diário. Além disso, foram geradas as matrizes com as potências dos equipamentos nos períodos ativos, necessárias para gerar os gráficos de consumo.

Na Figura 27 é apresentada a estrutura de dados completa, onde a coluna esquerda representa os dados importados e a coluna direita os dados gerados.

As estatísticas do consumidor são utilizadas apenas a nível de comparação com os dados apresentados no capítulo 2, referentes a participação dos eletrodomésticos no consumo residencial, posse média de equipamentos e consumo anual por equipamento.

Figura 27 - Estrutura de dados



Fonte: O autor

### 3.4 OTIMIZAÇÃO DO PROBLEMA

O primeiro passo para construir um algoritmo genético é determinar sua representação cromossomial. Assim como nos trabalhos de Chen *et al* (2013) e Polaki, Reza e Roy (2015), a representação é binária, representando os estados

ligado e desligado da carga no instante de tempo. Para o estado ligado a representação é 1, para desligado é 0. Cada instante de tempo pode alocar uma carga ou parte dela. Sendo assim, o cromossomo é representado por uma matriz de  $N$  cargas por  $T$  períodos, conforme apresentado na Equação 13. O cromossomo é composto apenas pelas cargas acessíveis.

$$Cromossomo = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & \dots & C_{1T} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} & \dots & C_{2T} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ C_{N1} & C_{N2} & C_{N3} & \dots & C_{NT} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Uma matriz com as cargas estáticas (não acessíveis) também é gerada e pode ser observada na Equação 14.

$$E = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} & \dots & E_{1T} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} & \dots & E_{2T} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ E_{N1} & E_{N2} & E_{N3} & \dots & E_{NT} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Onde:

$E$  é a matriz que representa as cargas estáticas.

O consumo de energia por período dos consumidores é obtido por meio da soma das cargas acessíveis e não acessíveis (Equação 15).

$$CE_T = \left( \sum_{N=1}^{Na} C_{NT} + \sum_{N=1}^{Ne} E_{NT} \right) [kWh] \quad (15)$$

Onde:

$CE_T$  representa o consumo de energia por hora;

$T$  é o período;

$Na$  é o número total de cargas acessíveis;

$Ne$  é o número total de cargas estáticas;

$C$  é a carga acessível ( $kW$ );

$E$  é a carga estática ( $kW$ );

$N$  é a posição da carga.

A tarifa de energia sofre uma variação ao longo do dia, por meio de pesos por hora que podem variar de acordo com a concessionária. O valor de uma tarifa média, juntamente com os pesos por hora podem ser fornecidos diariamente. Neste trabalho, as tarifas e os pesos foram pré-determinados como descrito na seção 3.2. Os pesos podem ser representados por um vetor  $P$  de 24 posições, como apresentado na Equação 16.

$$P = [P_1 \quad P_2 \quad \dots \quad P_{24}] \quad (16)$$

Assim o valor da tarifa no período pode ser representado pela equação 17:

$$V_T = Tm * P_i \quad [R\$/kWh] \quad (17)$$

Onde:

$V_T$  é o valor da tarifa no instante de tempo  $T$  em  $(R\$/kWh)$ ;

$Tm$  é a tarifa média em  $(R\$/kWh)$ ;

$P_i$  é o valor do peso no instante de tempo  $T$ .

Desse modo a função objetivo (Equação 18) do problema busca minimizar o custo total da energia no período de 24 horas:

$$\text{Minimizar } f\{V_T, CE_T\} = \sum_{T=1}^{24} V_T * CE_T \quad [R\$] \quad (18)$$

As cargas são divididas em operação contínua e descontínua. Um exemplo de carga contínua é uma máquina de lavar, onde o processo pode levar 2 horas, mas não pode ser interrompido. Já uma carga descontínua pode ser exemplificada por um aquecedor elétrico de água de um boiler, que precisa manter a água aquecida, mas devido a isolação do reservatório, a água perde pouca temperatura ao longo do dia, fazendo com que não seja necessário que o processo de aquecimento seja contínuo.

Ambos tipos de carga impõem restrições ao problema. O tempo de funcionamento das cargas deve ser respeitado, além disso, cargas contínuas precisam que seu processo não seja dividido.

### 3.4.1 Restrições

Foram utilizadas duas restrições,  $R_1$  e  $R_2$ , que são classificadas como *Hard Constraints*, ou seja, devem ser obrigatoriamente obedecidas, pois, se não forem, fazem com que a solução se torne infactível.

Para lidar com as restrições, foi utilizado o método de penalização de cromossomos estática. De acordo com Linden (2012) em problemas de minimização o valor da restrição é somado ao valor da função de avaliação. Como o resultado de uma função de avaliação deve ser sempre positiva e as restrições podem resultar em números negativos, o valor da restrição é elevado ao quadrado.

Para a restrição de tempo de funcionamento ( $R_1$ ), se faz necessário somar o número de vezes que a carga aparece no período de um dia e subtrair esse valor do tempo ativo da carga. A diferença é elevada ao quadrado para que não resulte em valores negativos. Por fim a potência é multiplicada por uma constante de ajuste específica que varia por carga. O resultado deve ser obrigatoriamente zero, caso contrário a restrição não é atendida, conforme apresentado na Equação 19. A restrição  $R_1$  é aplicada em todas as cargas acessíveis.

$$R_1 = \sum_N^{Na} \left( \left( \sum_{t=1}^{24} C_t \right) - Ta \right)_N^2 \cdot Kr_N = 0 \quad (19)$$

Onde:

$R_1$  é o valor da primeira restrição;

$Na$  é o número total de cargas acessíveis;

$N$  é a posição da carga;

$C_t$  é o estado carga no instante  $t$ ;

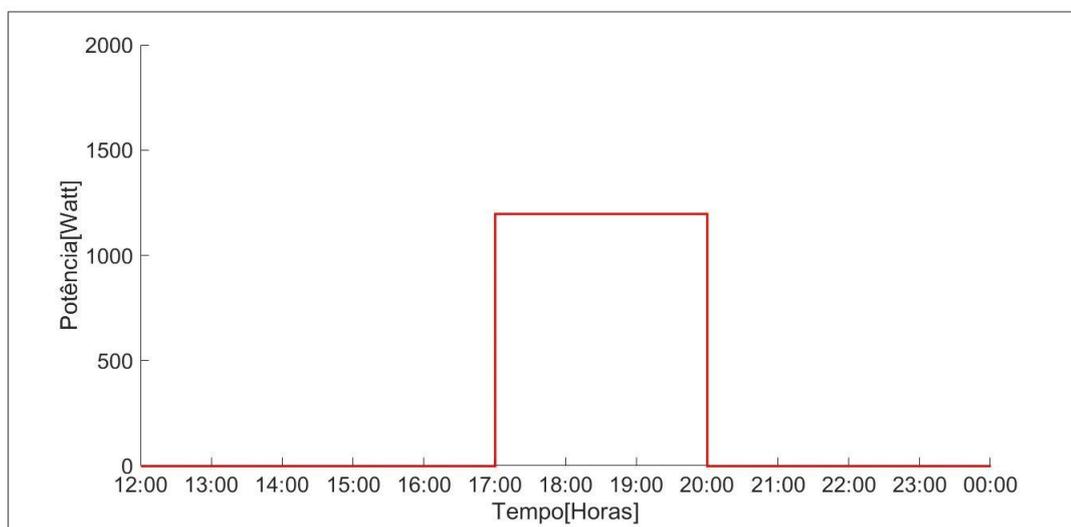
$Ta$  é o tempo ativo da carga em horas;

$Kr_N$  é a constante de penalização para a carga  $N$ .

Como exemplo deste tipo de carga pode-se citar o caso de um aquecedor para um boiler de 80 litros com 1200 Watts de potência, com um tempo ativo de 3 horas, ilustrado na Figura 28. O aquecedor não é uma carga de uso contínuo, desse

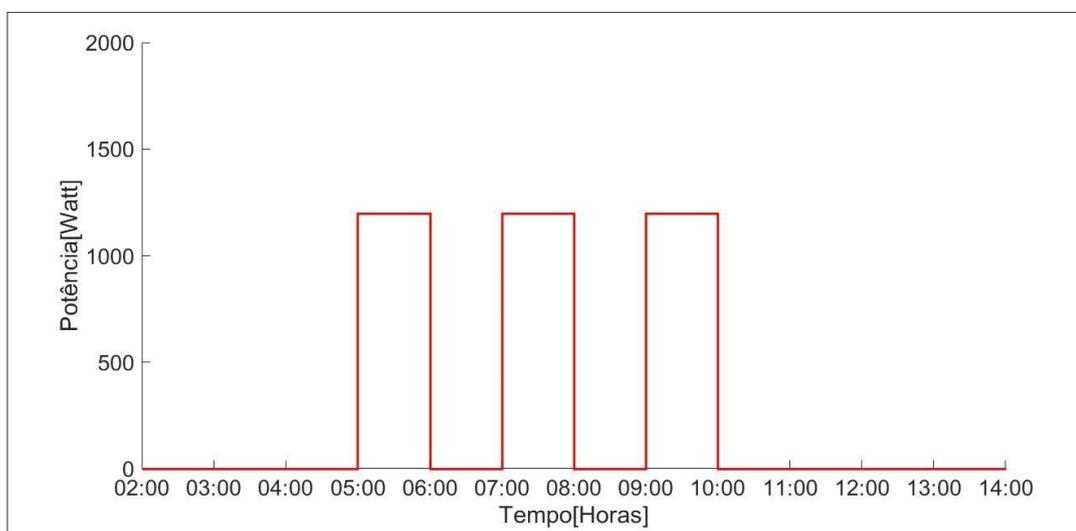
modo seu tempo ativo pode ser dividido em até 3 períodos, como apresentado na Figura 29.

Figura 28 - Carga de consumo inicial de um aquecedor.



Fonte: o autor (2019)

Figura 29 - Carga de consumo alterada do aquecedor.



Fonte: o autor (2019)

Para restrição de continuidade ( $R_2$ ) é necessário que o valor do último período em que o estado da carga é 1 seja subtraído do primeiro período em que a carga está no mesmo estado. Esse valor deve ser subtraído ainda por  $Ta-1$ , onde  $Ta$  é o tempo de funcionamento da carga (Equação 20). Do mesmo modo que ocorre na primeira restrição, a diferença é elevada ao quadrado e posteriormente multiplicada pela

constante de ajuste. O valor da restrição  $R_2$  também deve ser obrigatoriamente zero. Essa restrição é aplicada unicamente nas cargas contínuas.

$$R_2 = \sum_{N=1}^{Nac} \left( T_f - T_i - (Ta - 1) \right)_N^2 \cdot Kr_N = 0 \quad (20)$$

Onde:

$R_2$  é o valor da segunda restrição;

$Nac$  é o número total de cargas acessíveis contínuas;

$T_f$  é o último período ativo;

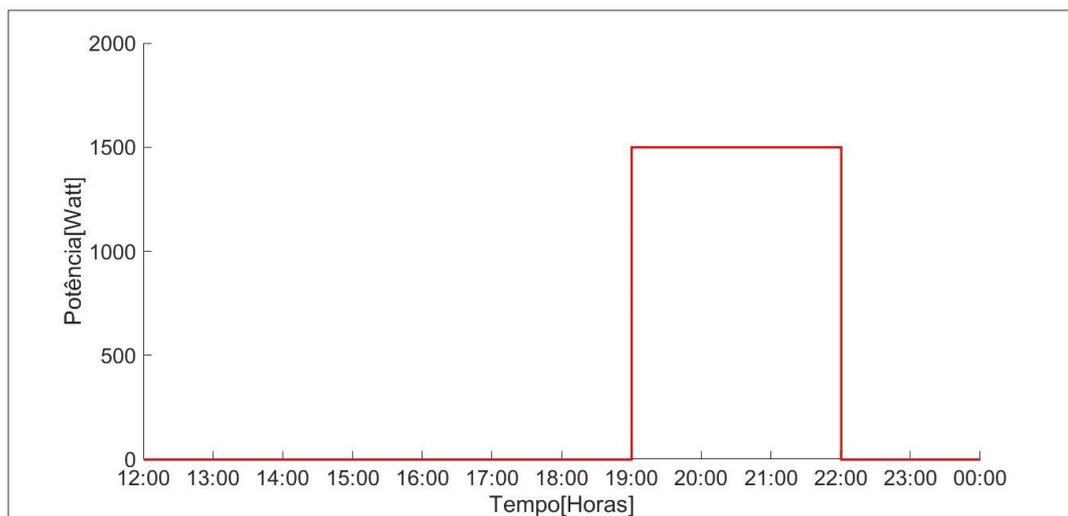
$T_i$  é o primeiro período ativo;

$Ta$  é o tempo ativo da carga;

$Kr_N$  é a constante de penalização para a carga  $N$ .

Como exemplo deste tipo de comportamento pode-se citar uma máquina de lavar roupas programável de 1500 W, com um tempo ativo de 3 horas (mostrada na Figura 30), do período das 19:00 a 21:00. A sua realocação deve respeitar o mesmo tempo ativo.

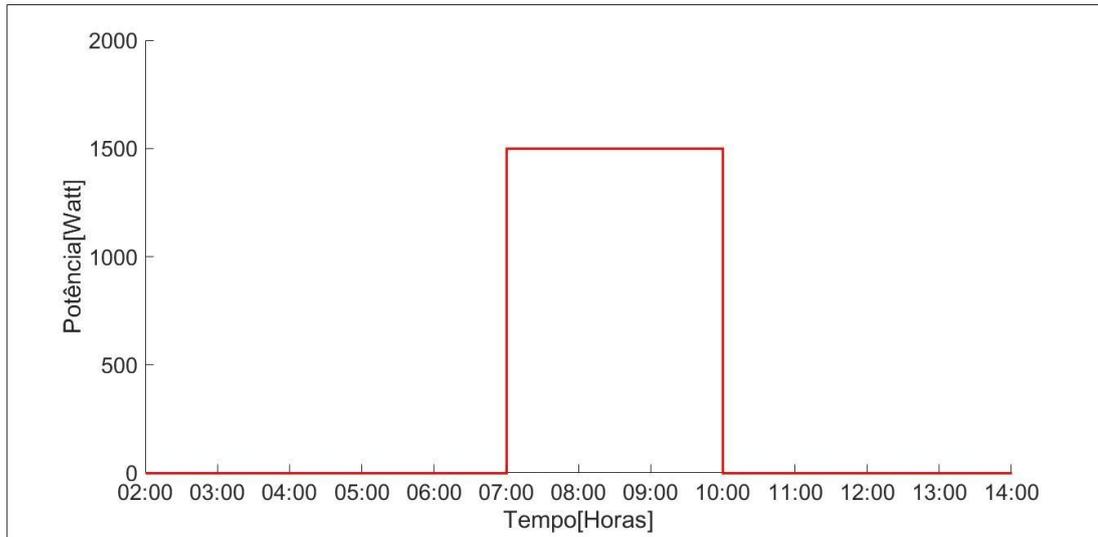
Figura 30 - Carga de consumo inicial de uma máquina de lavar roupas.



Fonte: o autor (2019)

Na Figura 31, a nova curva de carga é apresentada, respeitando a continuidade de funcionamento do equipamento, sendo  $T_f = 9$ ,  $T_i = 7$  e  $Ta = 3$ .

Figura 31 - Carga de consumo final da máquina de lavar roupas.



Fonte: o autor (2019)

A função de avaliação final do problema é apresentada na Equação 21.

$$\text{Minimizar } f\{V_T, CE_T\} = f\{V_T, CE_T\} + R_1 + R_2 \quad (21)$$

Onde:

$R_1$  é o valor da primeira restrição;

$R_2$  é o valor da segunda restrição;

#### 3.4.1.1 Penalização de cromossomos

Para realizar a penalização dos cromossomos, utilizou-se inicialmente duas variáveis  $Kr1$  e  $Kr2$  aplicadas as restrições  $R1$  e  $R2$  respectivamente. O valor dessas variáveis foi determinado empiricamente por meio de testes. Quando o valor de  $Kr1$  e  $Kr2$  era muito alto as restrições eram respeitadas, porém o consumo continuava alto. Quando o valor era baixo o consumo diminuía, mas as restrições não eram totalmente respeitadas.

Esse comportamento ocorre porque as cargas possuem valores de potência diferentes. Para um aparelho com alto consumo e com uma constante de penalização baixa, o algoritmo o desliga totalmente, pois o seu consumo acaba sendo maior que a penalização. Para contornar esse problema, cada carga recebeu um valor de

penalização próprio baseado na potência do eletrodoméstico, para que desse modo houvesse equilíbrio entre o consumo da carga e suas restrições.

### 3.4.2 Métodos e parâmetros de otimização

A definição dos parâmetros finais do algoritmo genético, foi determinada empiricamente após realizar uma série de testes. Os primeiros parâmetros foram definidos com uma quantidade pequena de cargas, devido ao tempo de execução do algoritmo. Entretanto, ao adicionar mais cargas os mesmos parâmetros não obtinham a mesma resposta. Portanto, foi necessário testar parâmetros no cromossomo completo, o que demandou muito tempo até defini-los.

Para reduzir o tempo de processamento foram testados métodos de evolução alternativos. Os métodos que foram utilizados estão descritos a seguir:

- a) inicialização: primeiramente o método de inicialização do cromossomo era aleatório, ou seja, a primeira população recebia valores aleatórios (0 ou 1) para todos os genes. Posteriormente optou-se por iniciar a população com o valor 0 em todas as posições.
- b) seleção de pais: foram testados dois métodos para a seleção de pais. Inicialmente foi utilizado o método da roleta, mesmo método utilizado em Chen *et al* (2013), onde cada indivíduo recebe uma nota na função de avaliação, quanto maior o valor da avaliação, menor a nota. Indivíduos com as notas mais altas vão ocupar mais espaço na roleta, aumentando assim a chance de serem selecionados para gerar a nova população. O segundo método testado foi o método do torneio, utilizado em AWAIS, M. *et al* (2015), onde uma quantidade de indivíduos da população é aleatoriamente selecionada para competir entre si e os dois melhores são selecionados para o cruzamento. Optou-se pelo método do torneio.
- c) módulo de população: em algoritmos mais simples geralmente a população da geração anterior é completamente destruída. Assim como em AWAIS, M. *et al* (2015), foi utilizado o método de elitismo, que seleciona os melhores indivíduos da geração anterior para passar para a próxima geração. Foi testado também a substituição total da

população, mas a mesma obteve resultados inferiores comparado ao elitismo.

- d) operador de cruzamento: foram testados dois operadores de cruzamento. Inicialmente foi utilizado o operador de cruzamento uniforme e em seguida foi utilizado o cruzamento de  $N$  pontos apresentados na seção 2.5.6. Optou-se pelo operador de cruzamento uniforme.
- e) operador de mutação: o operador de mutação foi testado de três formas. Como o cromossomo é uma matriz, inicialmente a mutação foi aplicada a cada gene (posição), em seguida foi aplicado a cada período (coluna), onde a carga (linha) selecionada para receber a mutação era sorteada. Por fim foi testado aplicar a mutação apenas uma vez ao indivíduo, sorteando o período e a carga em que a mutação ocorrera, sendo esse o método utilizado.

O indivíduo selecionado no fim da evolução é o melhor indivíduo de todas as gerações. O melhor indivíduo da primeira geração é armazenado e se na próxima geração houver um indivíduo com uma função de avaliação melhor, este é substituído. Isso se repete até que não haja outro indivíduo com melhor desempenho e o critério de parada seja alcançado. Na Figura 32 é apresentado o fluxograma do algoritmo genético, onde a condição de parada é o número de gerações pré-estabelecido.

Figura 32 - Fluxograma do algoritmo genético



Fonte: o autor (2019)

Após obter as novas curvas de carga, foi calculado o custo da fatura de energia total dos clientes. Esse valor foi comparado com a curva de carga inicial utilizando a tarifa convencional de energia, estabelecida em 0,60 R\$/kWh, a partir dos dados da Tabela 8.

### 3.4.3 Estratégia de evolução

Inicialmente, o cromossomo recebeu a forma de uma matriz, como apresentado na equação 13, que devido a sua complexidade demandava muito tempo de processamento, já que nessa representação o AG evoluía todas as cargas de uma só vez. Foi então testado aplicar o AG a uma carga por vez, diminuindo o cromossomo para um vetor de 24 posições. Desse modo, como o problema possui  $N$  cargas, o AG é rodado  $N$  vezes, sendo uma vez por carga. Os resultados de cada evolução foram reunidos em uma matriz, que por sua vez representa a resposta do problema.

A partir dessa estratégia foi possível delimitar o consumo por hora, diminuindo assim os picos de consumo. Como essa estratégia faz com que a nova curva de consumo seja construída por etapas, é possível somar o consumo total de cada período e comparar com o consumo limite. Quando o período da nova curva extrapola o limite, uma penalização é aplicada para o restante das cargas para aquele período.

Quando o limite é ultrapassado no período  $T$ , o vetor das tarifas (Equação 17) recebe naquele mesmo período o maior valor de tarifa, fazendo com que as cargas evitem este período. Essa penalização é caracterizada como uma *Soft Constraint*, ou seja, é preferível que seja respeitada mas caso necessário ela pode ser desobedecida.

## 3.5 NOVAS CURVAS DE CONSUMO

Os resultados gerados pelo AG foram comparados com o uso da tarifa convencional, sendo separados por:

- a) Curvas de consumo total: foram geradas para comparar o consumo original com as curvas propostas pelo AG, com e sem delimitação de consumo;

- b) Curvas de consumo por faixa: utilizadas para comparar o consumo original com as curvas propostas pelo AG sem delimitação de consumo;
- c) Curvas de consumo por consumidor: utilizadas para comparar o consumo original com as curvas propostas pelo AG sem delimitação de consumo.

Já que para o lado do cliente o fator mais importante é a redução da fatura de energia, a comparação com as curvas com delimitação de consumo não foi feita por consumidor, pois esse método aumenta o valor final do consumo.

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da metodologia proposta. Inicialmente, são apresentados os resultados referentes aos testes dos diferentes métodos utilizados na construção do algoritmo genético seguido dos resultados de sua aplicação.

### 4.1 PROCESSAMENTO DOS DADOS

No total foram geradas 1807 cargas divididas em 1584 cargas estáticas e 223 cargas acessíveis. As cargas acessíveis estão divididas em 99 cargas descontínuas e 124 cargas contínuas. Portanto, o cromossomo é uma matriz de 223 linhas por 24 colunas, totalizando 5352 genes.

Inicialmente, foi utilizado o método de seleção da roleta, porém após vários testes este método não foi capaz de alcançar os resultados esperados com um tempo de processamento aceitável. Com o método da roleta, foram testados os métodos de cruzamento uniforme e de N pontos. Após uma série de testes, nenhum dos métodos de cruzamento foi eficaz. A partir desses resultados, o método de seleção da roleta foi substituído pela seleção por torneio. Já nos primeiros testes o algoritmo apresentou melhoras, alcançando resultados superiores em menos tempo. Os resultados dos testes com a seleção pela roleta podem ser observados na Tabela 24.

Mesmo com melhores resultados o algoritmo ainda demandava muito tempo de processamento. Observou-se que o problema estava na mutação, pois como sua aplicação era por gene, para cada indivíduo eram sorteados 5352 valores aleatórios entre 0 e 1 e esses ainda eram comparados com a taxa de mutação. Optou-se por aplicar a mutação por carga e aumentar a taxa de mutação proporcionalmente, diminuindo para 224 números sorteados, onde 223 desses eram para comparação e 1 para determinar a posição dentre as 24 posições que a mutação poderia ocorrer. O tempo de processamento diminuiu consideravelmente. Após observar que os resultados eram os mesmos, mas com o mesmo tempo de processamento, decidiu-se aplicar a mutação uma vez apenas em todo o indivíduo e aumentar ainda mais a taxa de mutação. O tempo de processamento diminuiu novamente alcançando os mesmos resultados. Com essa mutação eram sorteados apenas 3 números, sendo 1

número para comparação e outros 2 para determinar a posição que a mutação poderia ocorrer no cromossomo. Os resultados dos testes com a seleção por torneio podem ser observados na Tabela 25.

Tabela 24 - Parâmetros do algoritmo genético com a seleção por roleta

<b>Seleção</b>	<b>Roleta</b>					
<b>Cruzamento</b>	Uniforme			N pontos		
<b>Mutação</b>	Gene	Carga	Indivíduo	Gene	Carga	Indivíduo
<b>Tamanho da população</b>	60	60	60	60	60	60
<b>Gerações</b>	8000	8000	7000	8000	7000	7000
<b>Taxa de mutação</b>	0,0001	0,0035	0,5	0,0001	0,004	0,6
<b>Taxa de substituição</b>	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
<b>Pontos de cruzamento</b>	N/a	N/a	N/a	6	6	4
<b>Tempo de processamento aproximado (hh:mm:ss)</b>	01:25:40	00:14:45	00:10:00	01:18:45	00:13:15	00:10:00

Fonte: o autor (2019)

Tabela 25 - Parâmetros do algoritmo genético com a seleção por torneio

<b>Seleção</b>	<b>Torneio</b>					
<b>Cruzamento</b>	Uniforme			N pontos		
<b>Mutação</b>	Gene	Carga	Indivíduo	Gene	Carga	Indivíduo
<b>Tamanho da população</b>	60	60	60	60	60	60
<b>Gerações</b>	8000	4500	4500	6500	6000	5000
<b>Taxa de mutação</b>	0,0001	0,003	0,45	0,0001	0,003	0,45
<b>Taxa de substituição</b>	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
<b>Participantes do torneio</b>	8	8	8	8	8	8
<b>Pontos de cruzamento</b>	N/a	N/a	N/a	6	6	4
<b>Tempo de processamento aproximado (hh:mm:ss)</b>	00:53:20	00:08:05	00:06:50	01:04:00	00:15:40	00:07:15

Fonte: o autor (2019)

Desse modo, ao utilizar o método do torneio combinado com a seleção uniforme e com a aplicação da mutação por indivíduo, o algoritmo obteve o menor tempo de processamento.

Porém, para melhorar a eficiência do algoritmo, utilizando os métodos com o menor tempo de processamento, o AG foi aplicado por carga, como descrito na seção 3.4.3. Os parâmetros dessa estratégia são apresentados na Tabela 26.

Como o tempo de processamento de cada evolução era muito curto, foi medido apenas o tempo total do algoritmo, somando todas as 223 evoluções, sendo uma por carga. Os códigos utilizados na última versão do algoritmo encontram-se no Apêndice D.

Tabela 26 - Parâmetros do algoritmo genético com aplicação por carga

<b>Seleção</b>	<b>Torneio</b>
<b>Cruzamento</b>	Uniforme
<b>Mutação</b>	Indivíduo
<b>Tamanho da população</b>	100
<b>Gerações</b>	25
<b>Taxa de mutação</b>	0,75
<b>Taxa de substituição</b>	0,9
<b>Participantes do torneio</b>	3
<b>Tempo de processamento aproximado (hh:mm:ss)</b>	00:00:25

Fonte: o autor (2019)

## 4.2 RESULTADO DO ALGORITMO GENÉTICO

### 4.2.1 Resultados sem delimitação de consumo

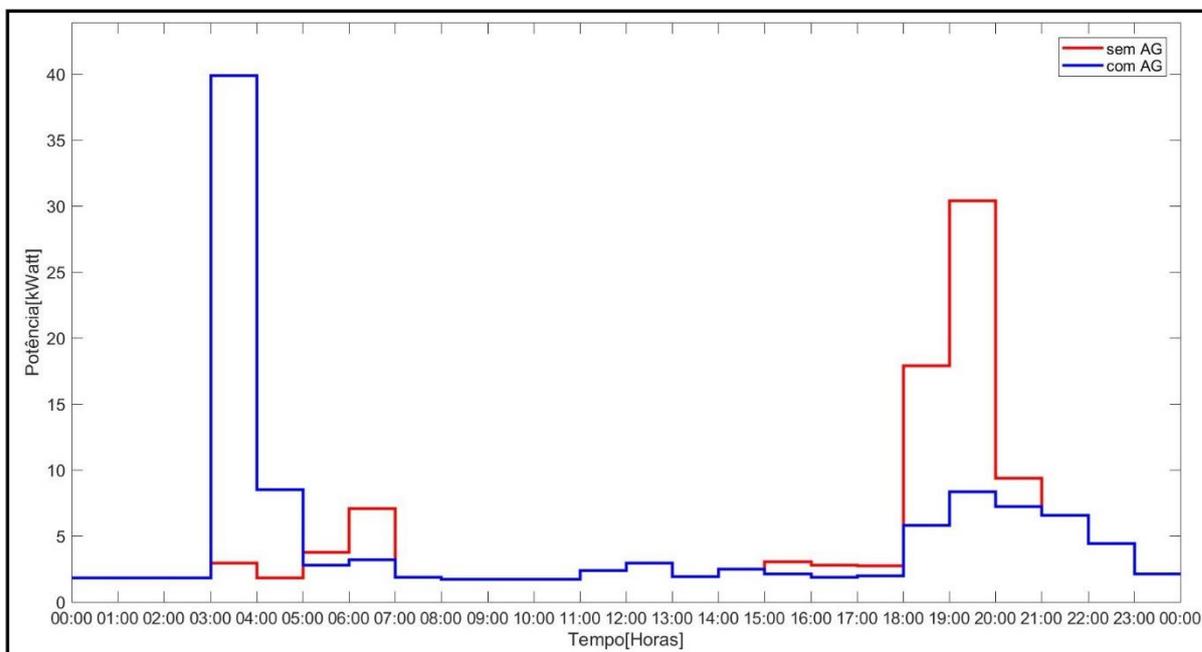
Para o problema proposto, o algoritmo conseguiu reduzir cerca de 16,40% do custo mensal total de energia. Reduzindo de R\$ 24.396,92 de custo com a tarifa convencional para R\$ 20.395,66 com o uso da tarifa dinâmica combinada com o AG. A Tabela 27 apresenta os resultados detalhados por faixa de consumo e total. O melhor indivíduo selecionado pelo algoritmo encontra-se no Apêndice B. Nas Figuras 33 até 38, são representadas as curvas de consumo das 5 faixas e do consumo total.

Tabela 27 - Comparação de custos por faixa e total

Faixa de consumo	Consumo mensal (kWh)	Custos mensais			
		Tarifa Convencional (R\$)	Tarifa Dinâmica com AG (R\$)	Diferença percentual (%)	Diferença monetária (R\$)
101-200kWh	3524,43	2114,66	1900,88	10,11	213,78
201-300kWh	5359,33	3215,60	2700,89	16,01	514,71
301-400kWh	7558,78	4535,27	3900,30	14,00	634,97
401-500kWh	9262,60	5557,56	1804,28	13,55	753,28
501-1000kWh	14956,39	8973,83	7089,32	21,00	1884,52
Total	40661,54	24396,92	20395,66	16,40	4001,26

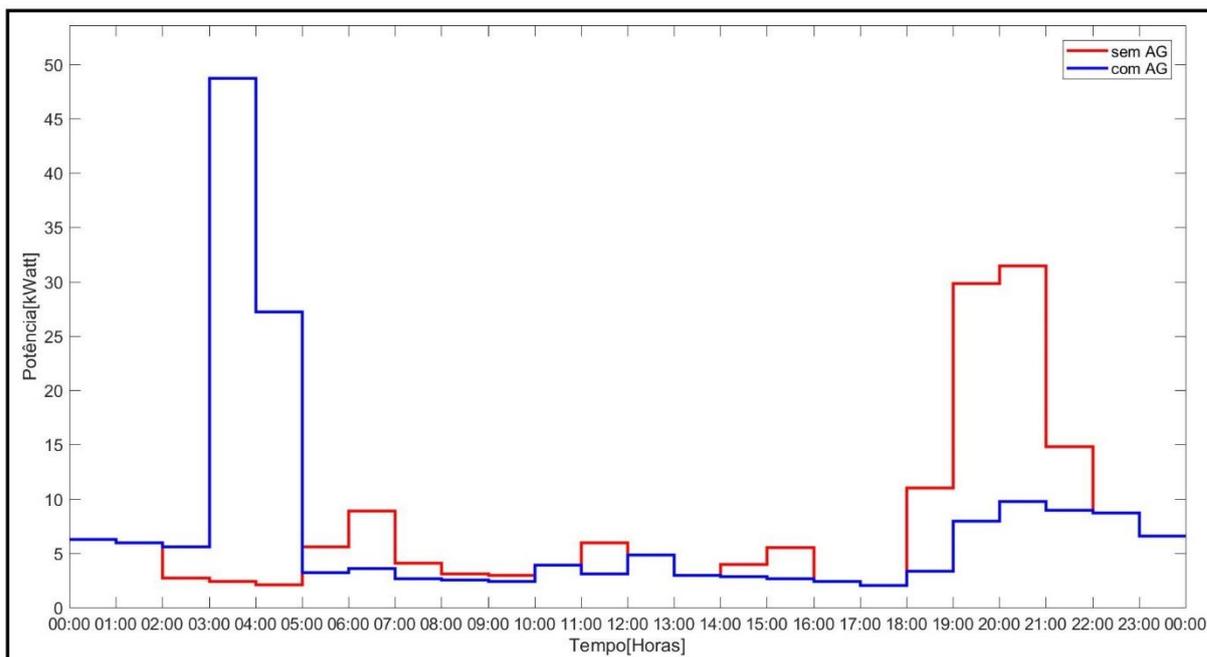
Fonte: o autor (2019)

Figura 33 - Comparação curva de consumo faixa 101-200kWh



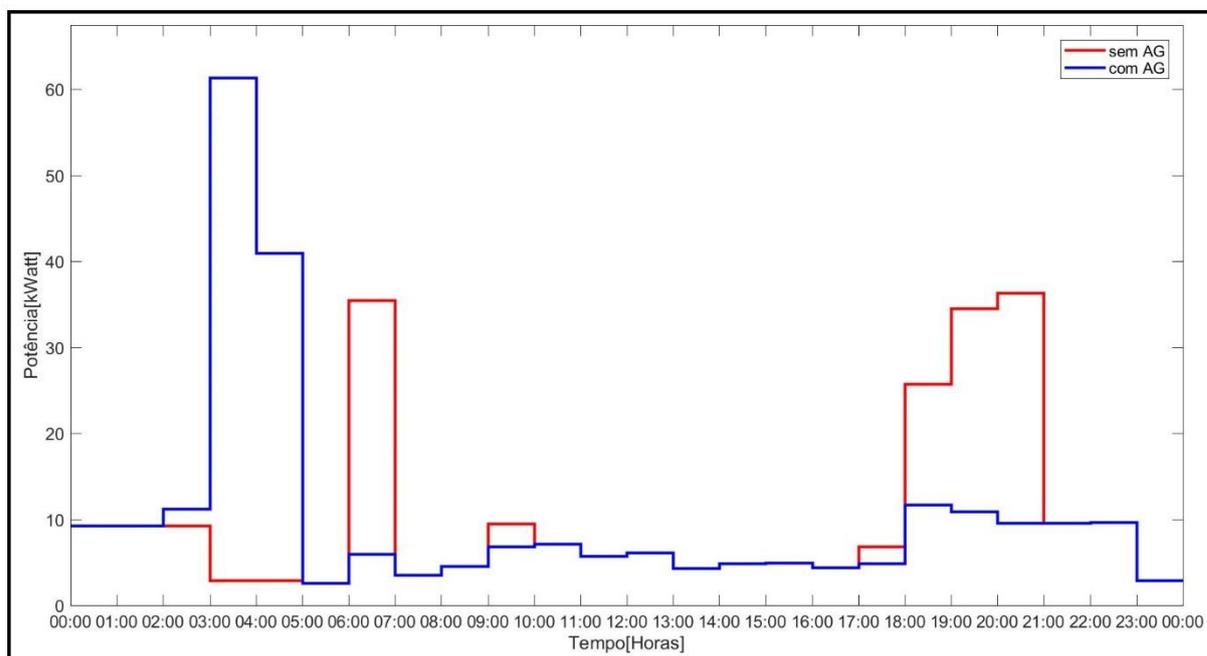
Fonte: o autor (2019)

Figura 34 - Comparação curva de consumo faixa 201-300kWh



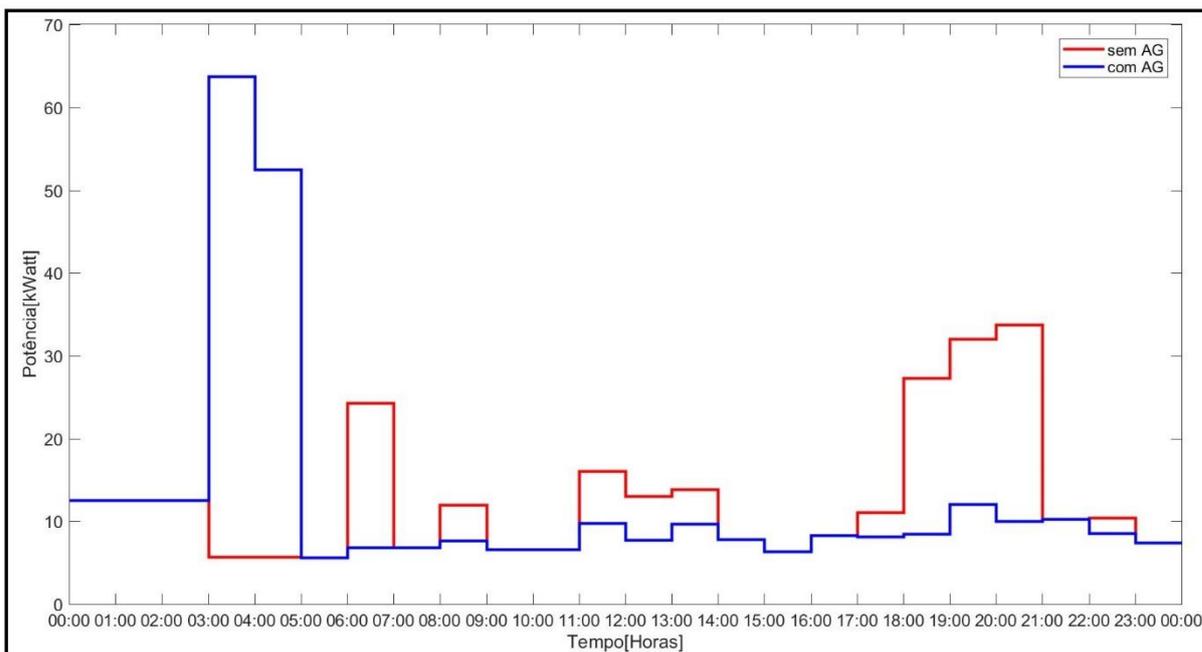
Fonte: o autor (2019)

Figura 35 - Comparação curva de consumo faixa 301-400kWh



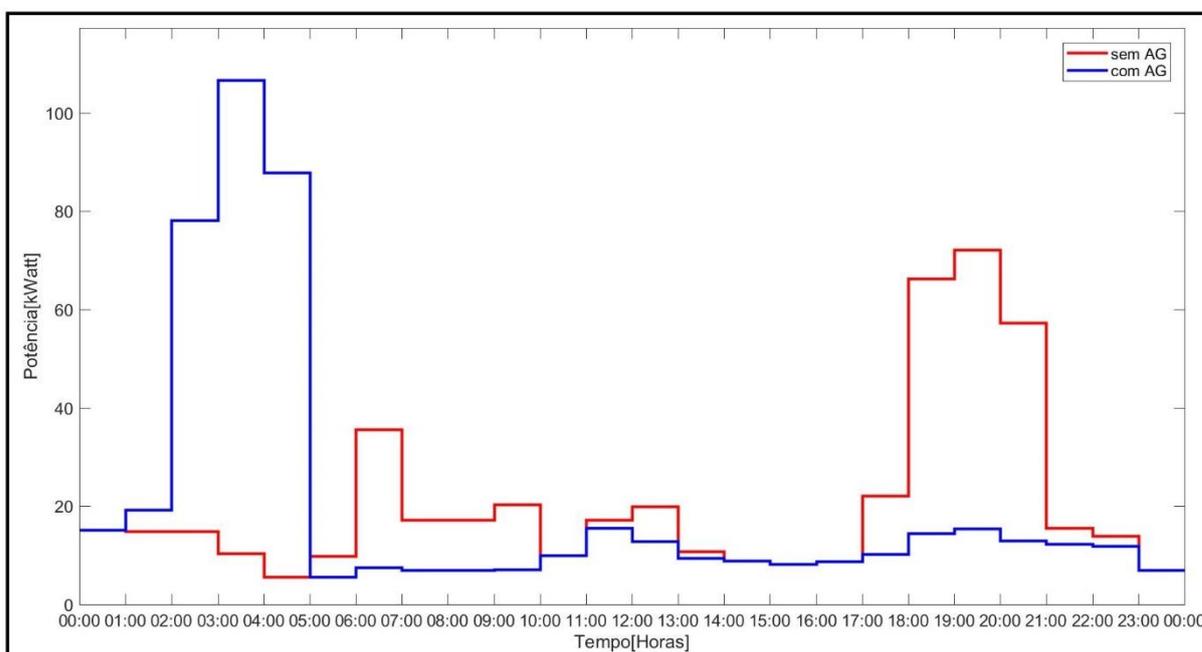
Fonte: o autor (2019)

Figura 36 - Comparação curva de consumo faixa 401-500kWh



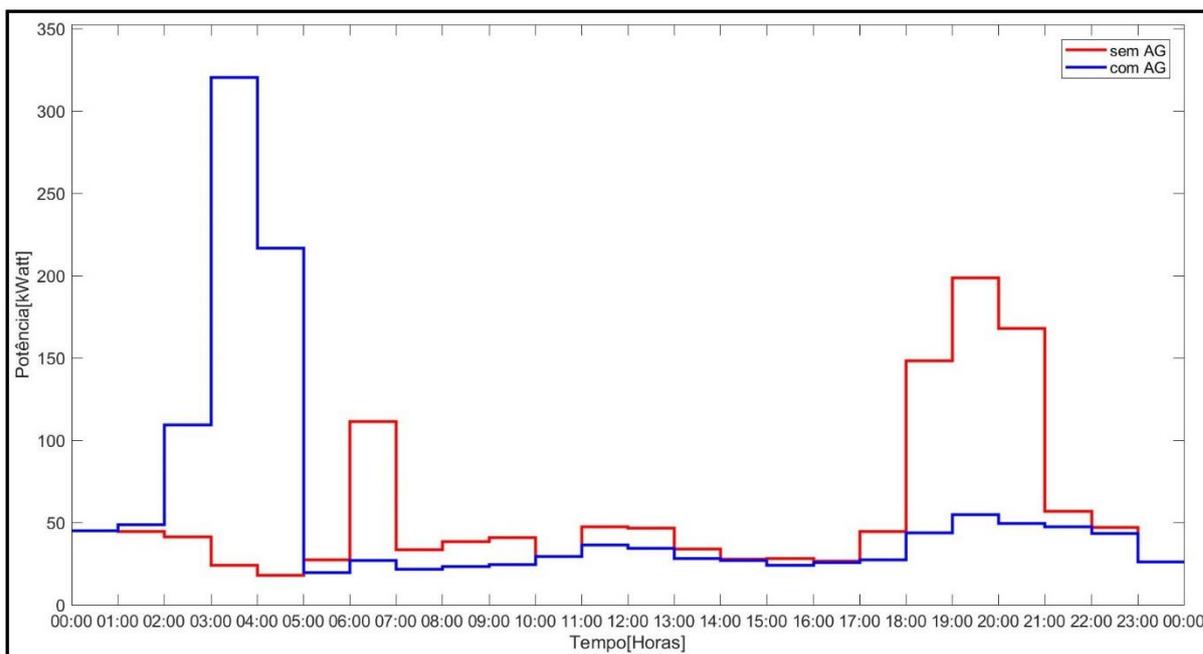
Fonte: o autor (2019)

Figura 37 - Comparação curva de consumo faixa 501-1000kWh



Fonte: o autor (2019)

Figura 38 - Comparação curva de consumo total



Fonte: o autor (2019)

Como pode ser observado nas curvas de consumo, o algoritmo deslocou as cargas para os períodos entre 01:00 e 04:00 da manhã, que como é mostrado na Tabela 23, são os períodos em que as tarifas são as mais baixas. O período das 03:00 ficou ativo para todas as cargas, sendo esse o período com o menor valor de tarifa.

Dos 100 consumidores gerados, apenas o primeiro foi cadastrado com o uso de um chuveiro elétrico ao invés do acumulador, sendo este o único consumidor em que o custo mensal de energia aumentou com a utilização da tarifa dinâmica. Dentre os restantes, a menor diferença se constatou no consumidor 34 da faixa de 201-300 KWh, com uma redução de 5,83%. Já o maior índice ficou com o consumidor 98 da faixa de 501-1000 KWh, que reduziu o consumo em 32,36%. Os dados detalhados dos 100 consumidores são apresentados na Tabela 28. As comparações das curvas de consumo de cada consumidor encontram-se no Apêndice C.

Tabela 28 - Comparação de custos por cliente

(continua)

Consumidor	Consumo mensal (kWh)	Custos mensais			
		Tarifa Convencional (R\$)	Tarifa Dinâmica com AG (R\$)	Diferença percentual (%)	Diferença monetária (R\$)
1	186,92	112,15	117,71	-4,96	-5,56
2	189,67	113,80	100,03	12,10	13,77
3	197,92	118,75	104,54	11,96	14,21

(continuação)

Consumidor	Consumo mensal (kWh)	Custos mensais			
		Tarifa Convencional (R\$)	Tarifa Dinâmica com AG (R\$)	Diferença percentual (%)	Diferença monetária (R\$)
4	193,90	116,34	101,61	12,66	14,73
5	192,10	115,26	103,18	10,48	12,08
6	172,35	103,41	86,80	16,07	16,61
7	157,80	94,68	80,03	15,48	14,65
8	137,55	82,53	70,52	14,56	12,01
9	156,90	94,14	81,67	13,24	12,47
10	134,40	80,64	67,04	16,87	13,60
11	168,35	101,01	94,97	5,98	6,04
12	185,75	111,45	103,50	7,13	7,95
13	176,25	105,75	95,73	9,47	10,02
14	173,72	104,23	94,52	9,32	9,71
15	160,22	96,13	82,75	13,92	13,38
16	172,45	103,47	94,97	8,21	8,50
17	191,60	114,96	107,38	6,59	7,58
18	188,25	112,95	103,07	8,74	9,88
19	194,25	116,55	105,26	9,69	11,29
20	194,10	116,46	105,60	9,33	10,86
21	297,27	178,36	151,98	14,79	26,38
22	258,75	155,25	131,17	15,51	24,08
23	280,87	168,52	141,87	15,82	26,65
24	275,67	165,40	135,15	18,29	30,25
25	237,78	142,67	125,04	12,36	17,63
26	274,00	164,40	141,06	14,20	23,34
27	280,20	168,12	139,92	16,78	28,20
28	293,63	176,18	148,26	15,85	27,92
29	284,42	170,65	153,74	9,91	16,91
30	220,58	132,35	121,38	8,29	10,97
31	267,87	160,72	132,71	17,43	28,01
32	254,67	152,80	134,10	12,24	18,70
33	278,25	166,95	133,49	20,04	33,46
34	241,48	144,89	136,44	5,83	8,45
35	212,53	127,52	109,76	13,93	17,76
36	261,13	156,68	126,29	19,39	30,39
37	273,27	163,96	133,25	18,73	30,71
38	276,62	165,97	135,95	18,09	30,02
39	291,25	174,75	132,00	24,46	42,75
40	299,10	179,46	137,32	23,48	42,14
41	396,30	237,78	194,45	18,22	43,33
42	315,37	189,22	161,68	14,56	27,54
43	387,07	232,24	216,90	6,61	15,34
44	391,20	234,72	214,23	8,73	20,49
45	398,45	239,07	210,53	11,94	28,54
46	396,25	237,75	211,19	11,17	26,56
47	391,75	235,05	210,05	10,64	25,00
48	356,95	214,17	186,20	13,06	27,97
49	399,90	239,94	212,76	11,33	27,18
50	389,40	233,64	208,94	10,57	24,70

(continuação)

Consumidor	Consumo mensal (kWh)	Custos mensais			
		Tarifa Convencional (R\$)	Tarifa Dinâmica com AG (R\$)	Diferença percentual (%)	Diferença monetária (R\$)
51	387,12	232,27	209,04	10,00	23,23
52	369,40	221,64	193,90	12,51	27,74
53	319,00	191,40	157,35	17,79	34,05
54	385,50	231,30	170,66	26,22	60,64
55	372,85	223,71	191,13	14,56	32,58
56	382,45	229,47	197,16	14,08	32,31
57	356,90	214,14	182,09	14,97	32,05
58	391,62	234,97	200,56	14,65	34,41
59	399,45	239,67	188,23	21,46	51,44
60	371,87	223,12	183,25	17,87	39,87
61	435,27	261,16	238,60	8,64	22,56
62	467,32	280,39	250,62	10,62	29,77
63	472,62	283,57	254,35	10,30	29,22
64	429,55	257,73	234,10	9,17	23,64
65	489,80	293,88	261,10	11,15	32,78
66	497,60	298,56	256,11	14,22	42,45
67	463,50	278,10	241,22	13,26	36,88
68	469,40	281,64	239,34	15,02	42,30
69	493,15	295,89	252,55	14,65	43,34
70	430,15	258,09	217,98	15,54	40,11
71	407,83	244,70	224,05	8,44	20,65
72	437,55	262,53	237,80	9,42	24,73
73	497,37	298,42	259,78	12,95	38,64
74	417,89	250,73	229,06	8,64	21,67
75	494,02	296,41	259,59	12,42	36,82
76	478,37	287,02	242,63	15,47	44,40
77	496,80	298,08	236,22	20,75	61,86
78	441,72	265,03	212,55	19,80	52,49
79	470,99	282,59	242,07	14,34	40,52
80	471,69	283,01	214,55	24,19	68,47
81	994,38	596,63	561,64	5,86	34,99
82	924,83	554,90	449,98	18,91	104,92
83	942,68	565,61	460,72	18,54	104,89
84	976,80	586,08	438,78	25,13	147,30
85	822,17	493,30	368,59	25,28	124,71
86	763,92	458,35	358,04	21,88	100,31
87	789,67	473,80	369,26	22,07	104,54
88	842,17	505,30	385,16	23,78	120,14
89	766,17	459,70	357,42	22,25	102,28
90	696,77	418,07	368,47	11,86	49,60
91	630,37	378,22	300,26	20,61	77,97
92	613,97	368,38	296,67	19,47	71,71
93	687,57	412,54	319,58	22,53	92,97
94	575,80	345,48	272,82	21,03	72,66
95	519,97	311,98	238,35	23,60	73,63
96	671,15	402,69	308,92	23,29	93,77
97	606,87	364,12	300,79	17,39	63,33

(conclusão)

Consumidor	Consumo mensal (kWh)	Custos mensais			
		Tarifa Convencional (R\$)	Tarifa Dinâmica com AG (R\$)	Diferença percentual (%)	Diferença monetária (R\$)
98	805,95	483,57	327,11	32,36	156,46
99	735,75	441,45	328,12	25,67	113,33
100	589,45	353,67	278,67	21,21	75,00

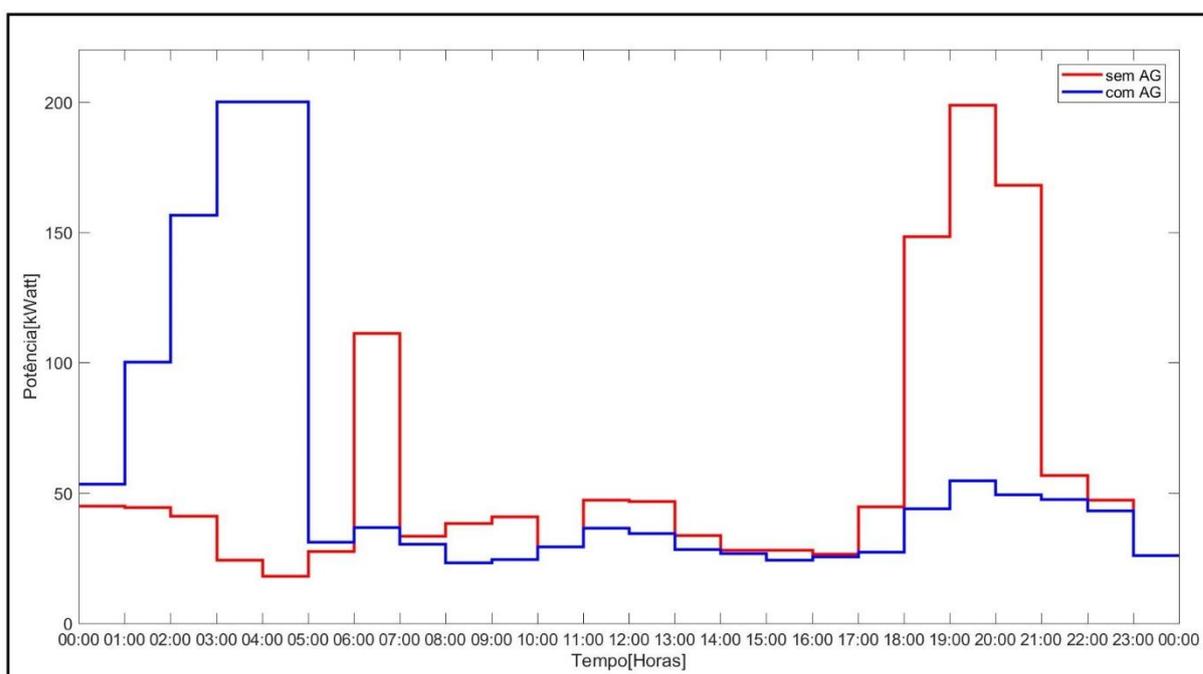
Fonte: o autor (2019)

#### 4.2.2 Resultados com delimitação de consumo

Com a delimitação de consumo, o algoritmo reduziu o custo total em 15,6% em relação ao custo com a tarifa convencional. Já em comparação com o custo sem delimitação de consumo, o valor final ficou 0,8% maior.

Para a potência máxima por hora, foi definido o valor de 200kW. A nova curva de consumo pode ser observada na Figura 39, sendo comparada com a curva de consumo original.

Figura 39 - Comparação curva de consumo total com delimitação

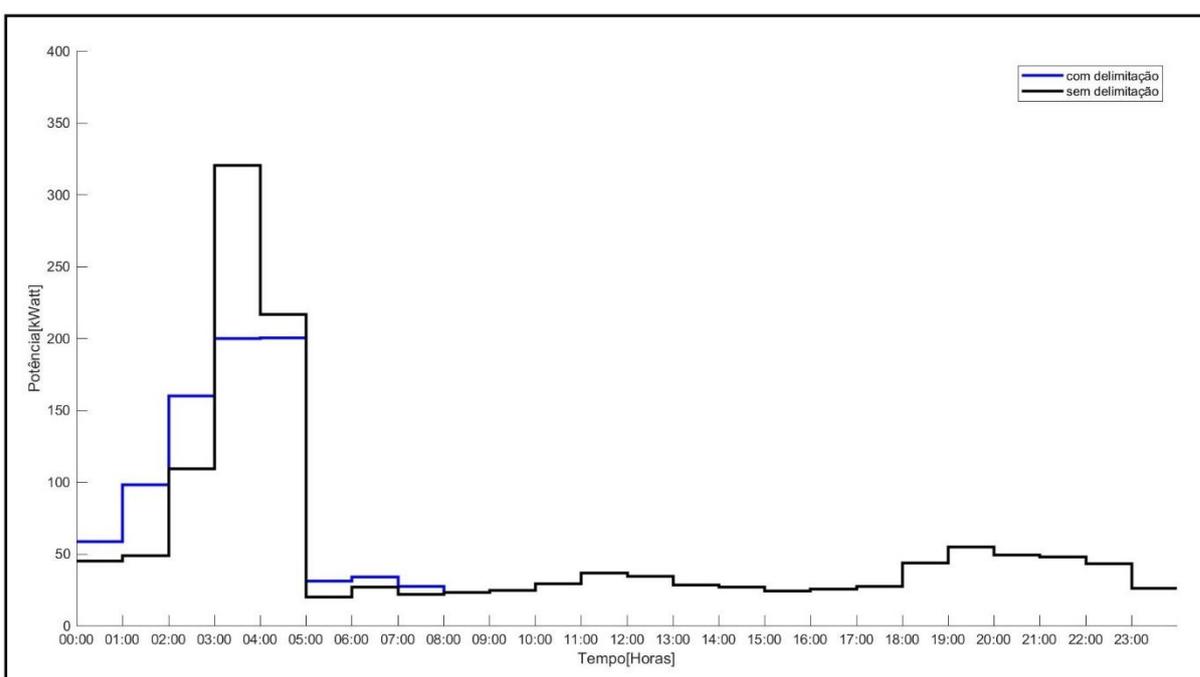


Fonte: o autor (2019)

Da mesma forma que ocorreu na curva sem delimitação de carga, o deslocamento das cargas acessíveis se manteve no período da 01:00 as 04:00 da

manhã, porém com uma distribuição mais equilibrada. Na curva sem delimitação, todas as cargas, ou parte delas, foi alocada no período das 03:00, já com a delimitação, após alcançar o limite de 200kW as cargas passaram a ser realocadas no período das 04:00, que possui a segunda menor tarifa. Os períodos 02:00 e 01:00 possuem a terceira e quarta menor tarifa respectivamente, sendo os dois períodos nessa mesma ordem que receberam mais cargas. A Figura 40 mostra a comparação entre a curva com delimitação de consumo com a curva sem delimitação de consumo.

Figura 40 - Comparação curva de consumo total com delimitação e sem delimitação



Fonte: o autor (2019)

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho consistiu no desenvolvimento de um algoritmo genético capaz de gerenciar um sistema de resposta a demanda residencial. Para isso, foram utilizados dados de pesquisas de âmbito nacional para criar modelos de consumidores no qual o sistema de resposta a demanda foi aplicado. Para a tarifação de energia foi utilizado um sistema de tarifação dinâmica, onde os valores foram variados com base na curva de carga nacional. Como estratégia de resposta a demanda foi utilizada a realocação de cargas com um horizonte de 24 horas.

Os modelos de consumo gerados aproximaram-se das estatísticas de base, porém com algumas diferenças. Os dados de base utilizados nesse trabalho foram recolhidos entre 2004 e 2006, porém uma série de equipamentos eletrodomésticos presentes nos modelos gerados sequer foram citados nessa pesquisa. A indisponibilidade de dados atualizados e detalhados foram fatores determinantes para as diferenças apresentadas, sendo esta a maior dificuldade do trabalho. O ideal seria possuir dados de consumo detalhados, sem a necessidade de criar modelos de consumo.

A aplicação do sistema de resposta a demanda teve um impacto positivo na redução do custo de energia para os clientes. A substituição do chuveiro por um acumulador de água foi um ponto determinante para essa redução, pois desse modo, um dos equipamentos com maior participação no consumo pôde ser realocado para períodos com valor de tarifa menor. A estratégia de deslocamento de cargas combinada com a precificação dinâmica mostrou-se adequada para o problema proposto, alcançando uma redução no custo de 16,40%.

A codificação dos indivíduos como variáveis binárias e a inicialização da população com as cargas desligadas mostraram-se apropriadas para o desenvolvimento desse trabalho. A combinação dos operadores genéticos de seleção por torneio, cruzamento uniforme e mutação por indivíduo, utilizando a estratégia de evolução por carga, apresentou o menor tempo de processamento.

O ajuste dos parâmetros do algoritmo genético foi um processo lento. O fato de ter iniciado com a combinação dos operadores genéticos de seleção por roleta, cruzamento uniforme e mutação por gene foi determinante, levando em conta que essa combinação apresentou o maior tempo de processamento.

O ajuste dos parâmetros também era afetado de acordo com os dados de entrada, quando utilizada a estratégia de evolução de todas as cargas simultaneamente. A variação da quantidade de cargas no cromossomo ou a variação da tarifação era suficiente para que os parâmetros necessitassem de alterações. Esse problema foi resolvido com a utilização da estratégia de evolução por carga, pois uma vez ajustados os parâmetros, a quantidade de cargas adicionadas influenciava apenas no tempo de processamento.

A função de avaliação proposta, incluindo as restrições, cumpriu de forma perfeita sua finalidade. Embora o AG final possua a quantidade de 25 gerações, algumas cargas alcançavam o resultado já na segunda geração.

## 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros recomenda-se:

- a) utilização de um algoritmo híbrido: somar ao AG a utilização de redes neurais, para definir os parâmetros com mais eficiência e em menos tempo;
- b) ampliar a aplicação do algoritmo: estender a aplicação do algoritmo para as áreas comercial e industrial;
- c) maior quantidade de consumidores: adicionar mais consumidores e observar o comportamento do algoritmo;
- d) dados de entrada mais precisos: utilizar, se possível, dados de entrada que representem com mais detalhamento e fidelidade os padrões de consumo de energia elétrica brasileiros atuais.

## REFERÊNCIAS

- ALBADI, M. H.; EL-SAADANY, E. F. **Demand response in electricity markets: An overview**, Power Engineering Society General Meeting. 2007. IEEE Power Engineering Society General Meeting, pp. 1-5
- ANEEL. **Saiba mais sobre a Tarifa Branca**. Disponível em: <[http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca?p\\_p\\_id=101&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=maximized&p\\_p\\_col\\_id=column-2&p\\_p\\_col\\_count=2&\\_101\\_struts\\_action=%2Fasset\\_publisher%2Fview\\_content&\\_101\\_assetEntryId=14788022&\\_101\\_type=content&\\_101\\_groupId=654800&\\_101\\_urlTitle=tarifa-branca-perguntas&inheritRedirect=true](http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca?p_p_id=101&p_p_lifecycle=0&p_p_state=maximized&p_p_col_id=column-2&p_p_col_count=2&_101_struts_action=%2Fasset_publisher%2Fview_content&_101_assetEntryId=14788022&_101_type=content&_101_groupId=654800&_101_urlTitle=tarifa-branca-perguntas&inheritRedirect=true)>. Acesso em: 26 mar. 2019a.
- ANEEL. **Tarifa Branca**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=781&idPerfil=2>>. Acesso em: 26 mar. 2019b.
- ANEEL. **Postos Tarifários**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/postos-tarifarios>>. Acesso em: 26 mar. 2019c.
- ANEEL. **Ranking das Tarifas**. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>>. Acesso em: 26 mar. 2019d.
- AWAIS, M. *et al.* **An Efficient Genetic Algorithm Based Demand Side Management Scheme for Smart Grid**. 2015. 18th International Conference on Network-Based Information Systems. Taipei, 2015, pp. 351-356.
- BOECHEL, Tiago. **Algoritmo de otimização: uma abordagem híbrida utilizando o algoritmo das formigas e genético**. 2003. 70p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Santa Catarina, Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. Florianópolis, 2003.
- BROILO. **Acumulador solar**. Disponível em: <<http://broilo.com.br/produtos/acumulador-solar/>>. Acesso em: 15 ago. 2019.
- CARRIJO, Arthur da Silva. **Estudo das interações do lado da demanda com o mercado de energia elétrica no contexto das redes elétricas inteligentes**. 2013. 67p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos., 2013.
- CHEN, Chao-Rong *et al.* **Demand Response Optimization for Smart Home Scheduling Using Genetic Algorithm**. 2013. IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics. Manchester, 2013, pp. 1461-1465.
- ELETROBRÁS; PROCEL. **Avaliação do mercado de eficiência energética do Brasil: Classe residencial, relatório Brasil**. Rio de Janeiro, 2007.
- EPE. **Anuário estatístico de energia elétrica 2018**. Rio de Janeiro, 2018b.

EPE. **Avaliação da eficiência energética e geração distribuída para os próximos 10 anos (2015-2024)**. Nota Técnica DEA 12/16. Rio de Janeiro, 2016.

EPE. **Projeção da demanda de energia elétrica para os próximos 10 anos (2017-2026)**. Nota Técnica DEA 001/17. Rio de Janeiro, 2017.

EPE. **Consumo Anual de Energia Elétrica por classe (nacional)**. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Consumo-Anual-de-Energia-Eletrica-por-classe-nacional>>. Acesso em: 20 mar. 2019.

EPE. **Uso do ar condicionado no setor residencial brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética**. Nota Técnica EPE 030/2018. Rio de Janeiro, 2018a.

FECOERGS. **Regulação de Instalações Consumidoras: Fornecimento em Baixa Tensão**. 2019. V. 2.1.

FERRAZ, Bibiana M. P. **Programa de resposta a demanda baseado em preços aplicado a consumidores de baixa tensão**. 2016. 124p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Porto Alegre, 2016.

GELLINGS, C. W. The concept of demand-side management for electric utilities. 1985. **IEEE**, vol. 73, no. 10, pp. 1468-1470.

GOLDBARG, Mauro Cesar; LUNA, Henrique Pacca. **Otimização combinatória e programação linear: modelos e algoritmos**. 2005. -2.ed. – Rio de Janeiro: Elsevier, 2005 – 10a reimpressão.

HALLIDAY, David.; RESNICK, Robert.; WALKER, Jearl. **Fundamentos de física, volume 2: gravitação, ondas e termodinâmica**. 1945. 10ª Edição. Rio de Janeiro: LTC, 2016.

HARISH, V.S.K.V.; KUMAR, A. **Demand side management in India: Action plan, policies and regulations**. 2014. Alternate Hydro Energy Centre, Indian Institute of Technology Roorkee, Roorkee, Uttarakhand 247667, India. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114001324>>. Acesso em: 7 abr. 2019.

HU, Xiao-Min *et al.* **Multiobjective Genetic Algorithm for Demand Side Management of Smart Grid**. 2013. IEEE Symposium on Computational Intelligence in Scheduling (CISched). Singapore, 2013, pp. 14-21.

JALALI, M. M. **Demand side management in a smart grid with multiple electricity suppliers**. Department of Electrical Engineering, Iran University of Science and Technology, P. O. Box: 1684613114, Tehran, Iran. 2015

LINDEN, Ricardo. **Algoritmos Genéticos**. 3ª Edição. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2012.

MOREIRA SILVA, Angelo José. **Implementação de um Algoritmo Genético utilizando o Modelo de Ilhas**. 2005. 73p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia., 2013.

NOGUEIRA, Heber Valdo. **Algoritmo Genético Compacto com Dominância para Seleção de Variáveis**. 2017. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Goiás, Instituto de Informática (INF), Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação, Goiânia, 2017.

NALDI, Murilo Coelho. **Agrupamento híbrido de dados utilizando algoritmos genéticos**. 2006. 156p. Dissertação (Mestrado). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Dinâmicos e Energéticos., 2013

PAVITHRA, N.; ESTHER, B. P. **Residential Demand Response Using Genetic Algorithm**. 2017. Innovations in Power and Advanced Computing Technologies (i-PACT). Vellore, 2017, pp. 1-4.

POLAKI, Shyam Kumar; REZA, Motahar; ROY, Diptendu Sinha. **A Genetic Algorithm for Optimal Power Scheduling for Residential Energy Management**. 2015. IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC). Rome, 2015. pp. 2061-2065.

PROCEL. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo de Energia (PPHs)**. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View={4A5E324F-A3B0-482A-B1CD-F75A2A150480}>>. Acesso em: 20 mar. 2019.

SALAMI, Abolfazl; FARSI, Mohammad Mehdi. **Demand side management using direct load control for residential and industrial areas**. 2015. International Congress on Electric Industry Automation (ICEIA 2015). Shiraz, 2015, pp. 11-16.

SANTANA, L. E. A. DOS S. **Otimização em comitês de classificadores: Uma abordagem baseada em filtro para seleção de subconjuntos de atributos**. 2012.

SIEBERT, Luciano C. **Sistema de otimização de resposta a demanda para redes elétricas inteligentes**. 2013. 135p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Curitiba, 2013.

SHINGLE, S.; VIJAYA, M. **Application of demand response programs for residential loads to minimize energy cost**. 2016. International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT). Nagercoil, 2016, pp. 1-4.

XU, Zhixiang *et al.* **A new customer-side demand response strategy in block bidding markets**. 2017. IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing, 2017, pp. 1-6.

## APÊNDICE A – TABELA COM OS TEMPOS DE AQUECIMENTO DE ÁGUA PARA BOILER

Tempos de aquecimento de água

Chuveiro convencional (5500W)		Boiler				
		150L 1500W	200L 2000W	300L 2500W	600L 3000W	800L 5000W
Tempo (horas)	Água utilizada (L)	Tempo (horas)				
0:10	39,42	0:38	0:28	0:23	0:19	0:11
0:15	59,13	0:57	0:43	0:34	0:28	0:17
0:20	78,83	1:17	0:57	0:46	0:38	0:23
0:25	98,54	1:36	1:12	0:57	0:48	0:28
0:30	118,25	1:55	1:26	1:09	0:57	0:34
0:35	137,96	2:14	1:41	1:20	1:07	0:40
0:40	157,67	2:34	1:55	1:32	1:17	0:46
0:45	177,38	2:53	2:09	1:43	1:26	0:51
1:00	236,50	3:51	2:53	2:18	1:55	1:09
1:05	256,21	4:10	3:07	2:30	2:05	1:15
1:10	275,92	4:29	3:22	2:41	2:14	1:20
1:25	335,04	5:27	4:05	3:16	2:43	1:38
1:30	354,75	5:46	4:19	3:27	2:53	1:43
1:35	374,46	6:05	4:34	3:39	3:02	1:49
1:40	394,17	6:25	4:48	3:51	3:12	1:55
1:45	413,88	6:44	5:03	4:02	3:22	2:01
1:50	433,58	7:03	5:17	4:14	3:31	2:07
1:55	453,29	7:22	5:32	4:25	3:41	2:12
2:00	473,00	7:42	5:46	4:37	3:51	2:18
2:05	492,71	8:01	6:00	4:48	4:00	2:24
2:10	512,42	8:20	6:15	5:00	4:10	2:30
2:15	532,13	8:39	6:29	5:11	4:19	2:35
2:20	551,83	8:59	6:44	5:23	4:29	2:41
2:25	571,54	9:18	6:58	5:34	4:39	2:47
2:30	591,25	9:37	7:13	5:46	4:48	2:53
2:35	610,96	9:56	7:27	5:58	4:58	2:59
2:40	630,67	10:16	7:42	6:09	5:08	3:04
2:45	650,38	10:35	7:56	6:21	5:17	3:10
2:50	670,08	10:54	8:10	6:32	5:27	3:16
2:55	689,79	11:13	8:25	6:44	5:36	3:22
3:00	709,50	11:33	8:39	6:55	5:46	3:27
3:05	729,21	11:52	8:54	7:07	5:56	3:33
3:10	748,92	12:11	9:08	7:18	6:05	3:39
3:15	768,63	12:30	9:23	7:30	6:15	3:45
3:20	788,33	12:50	9:37	7:42	6:25	3:51

Fonte: o autor (2019)









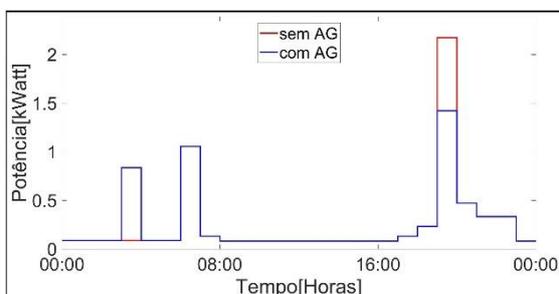
(conclusão)

Carga	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
198	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
199	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
200	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
201	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
202	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
203	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
204	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
205	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
206	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
207	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
208	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
209	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
210	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
211	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
212	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
213	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
214	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
215	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
216	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
217	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
218	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
219	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
220	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
221	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
222	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
223	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: O autor

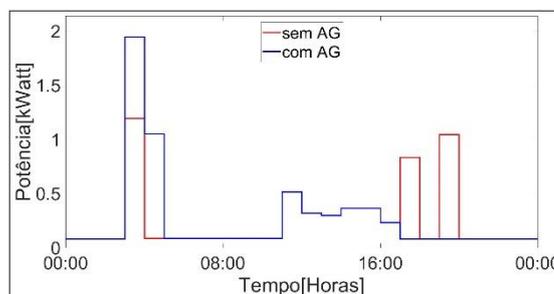
## APÊNDICE C – COMPARAÇÃO DAS CURVAS DE CONSUMO POR CONSUMIDOR

### Consumidor 1



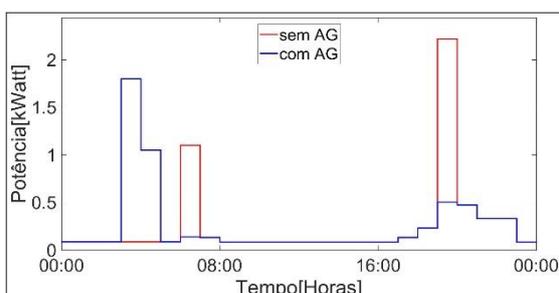
Fonte: o autor (2019)

### Consumidor 4



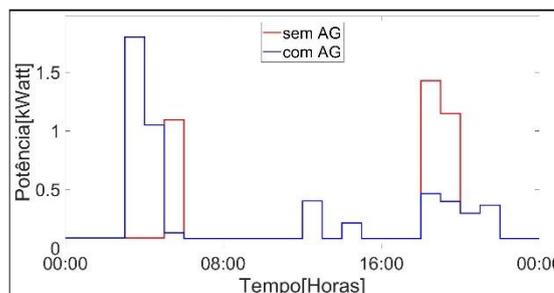
Fonte: o autor (2019)

### Consumidor 2



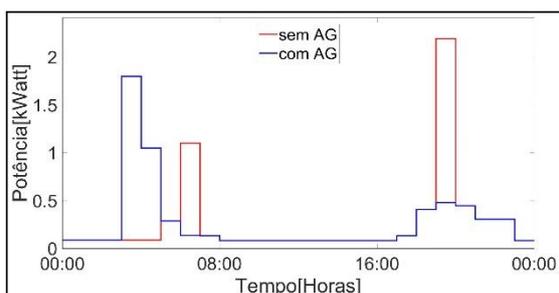
Fonte: o autor (2019)

### Consumidor 5



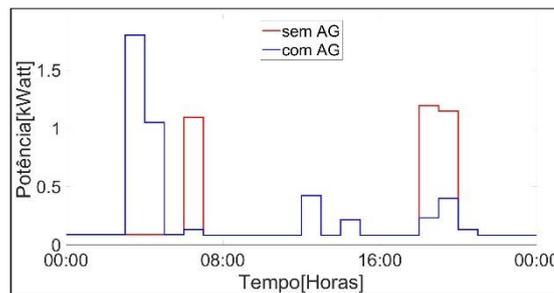
Fonte: o autor (2019)

### Consumidor 3



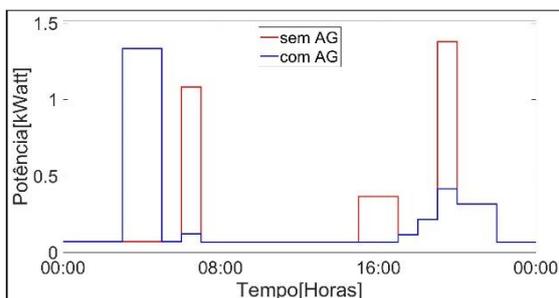
Fonte: o autor (2019)

### Consumidor 6



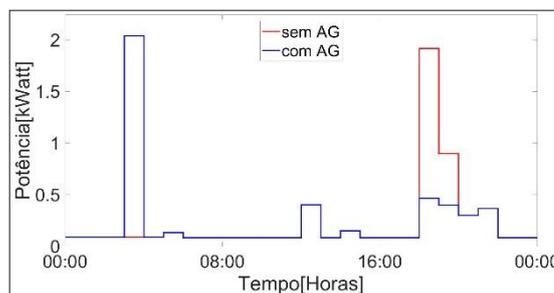
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 7



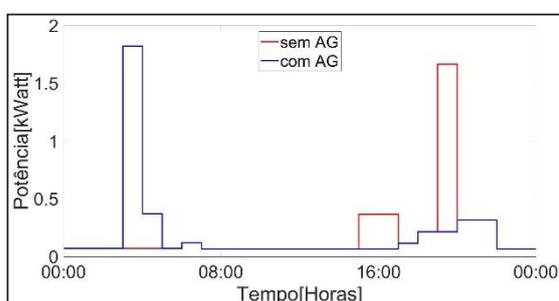
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 11



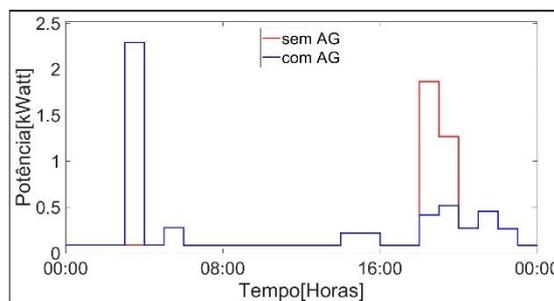
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 8



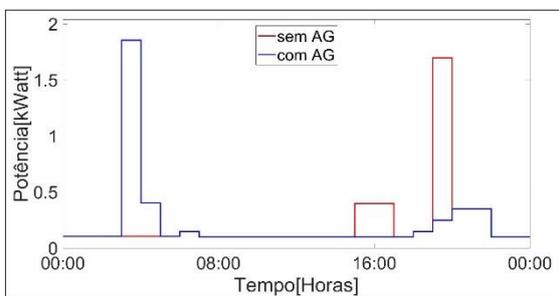
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 12



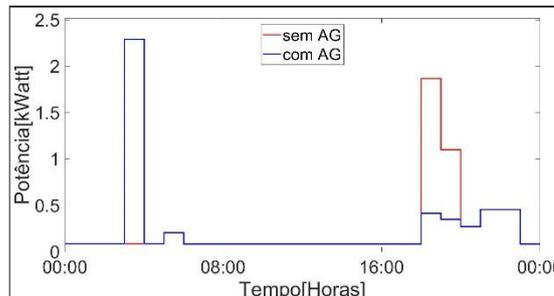
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 9



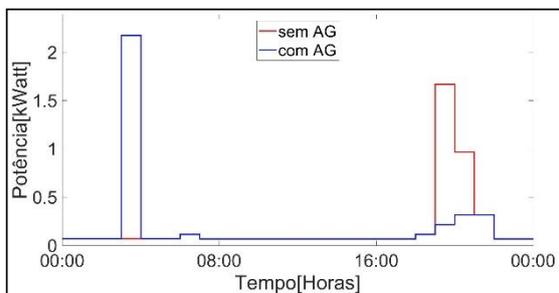
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 13



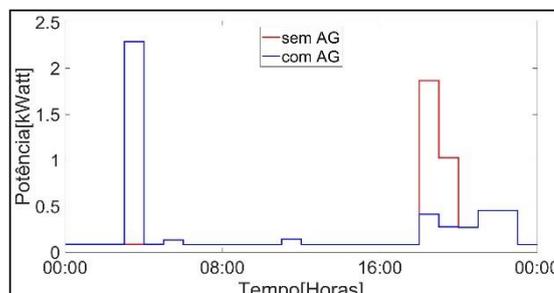
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 10



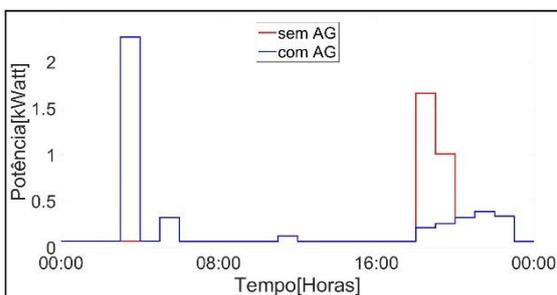
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 14



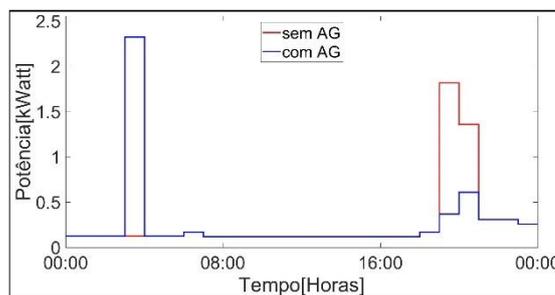
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 15



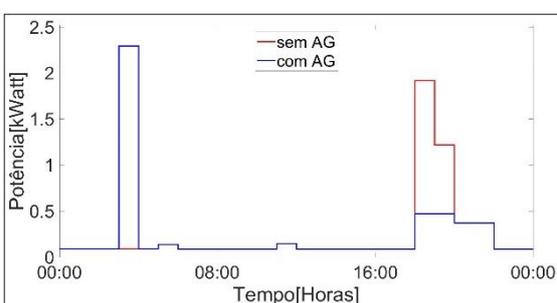
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 19



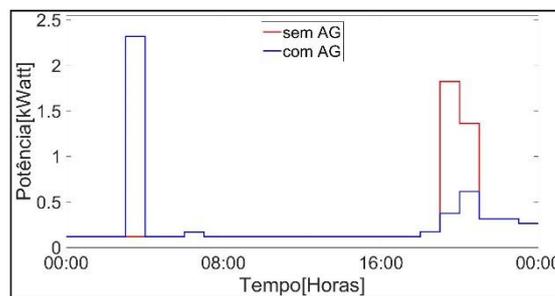
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 16



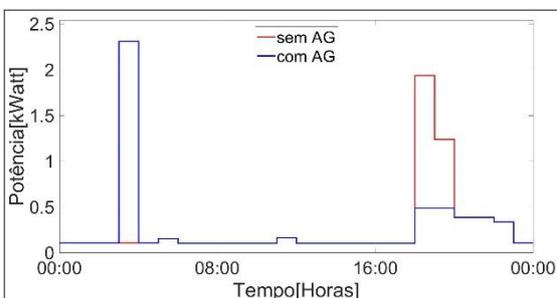
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 20



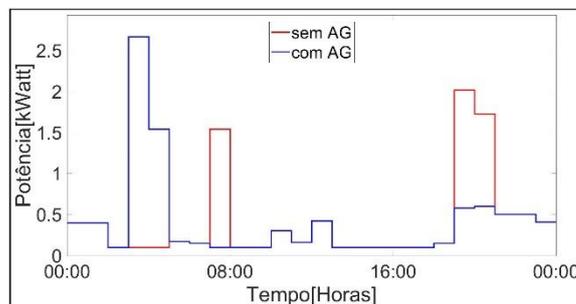
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 17



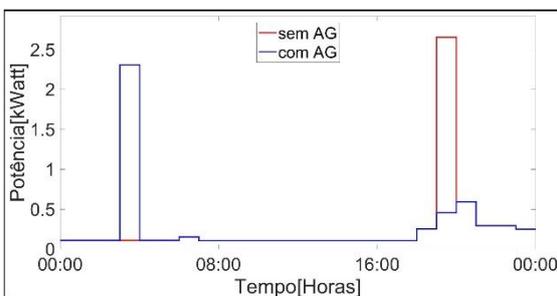
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 21



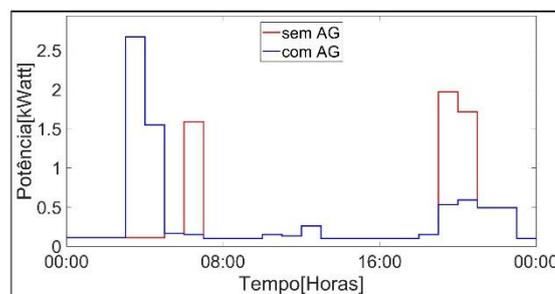
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 18



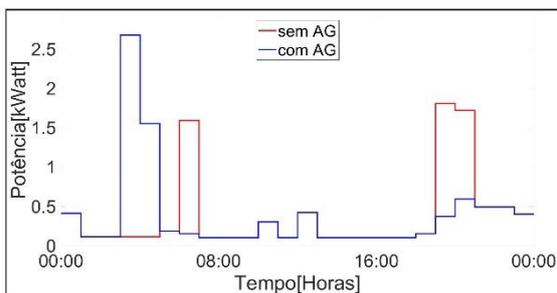
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 22



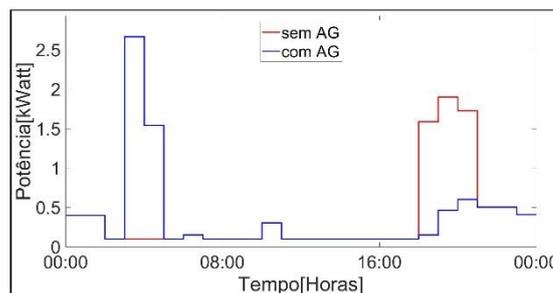
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 23



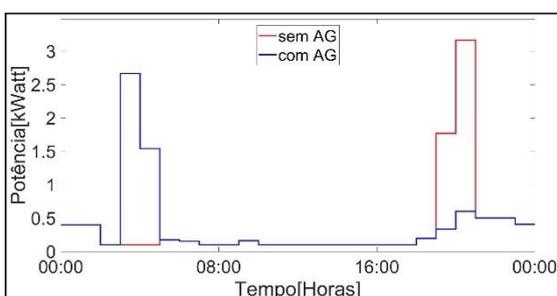
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 27



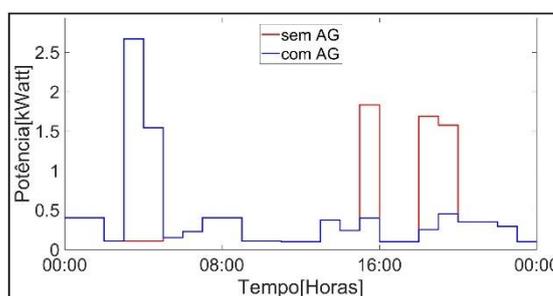
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 24



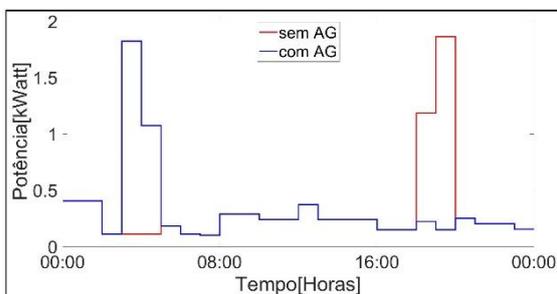
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 28



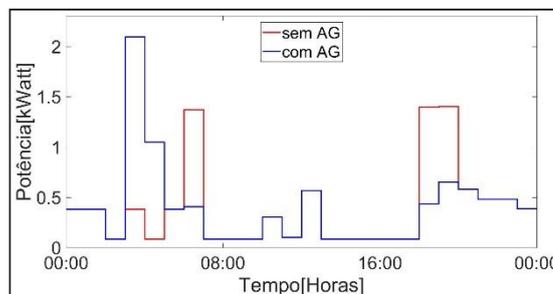
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 25



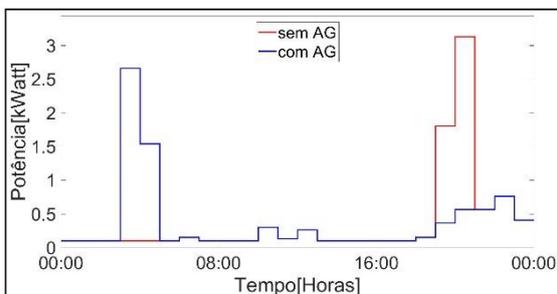
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 29



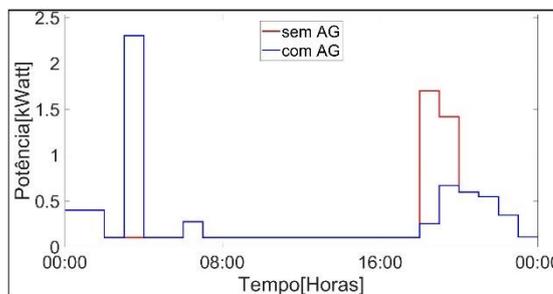
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 26



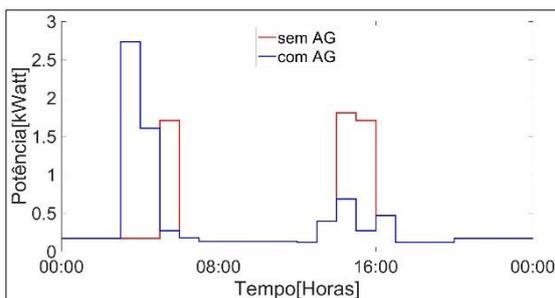
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 30



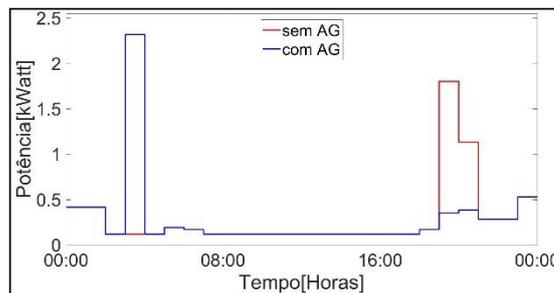
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 31



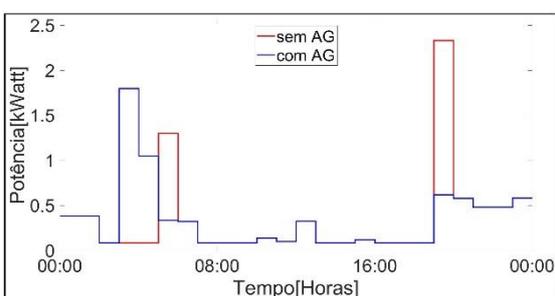
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 35



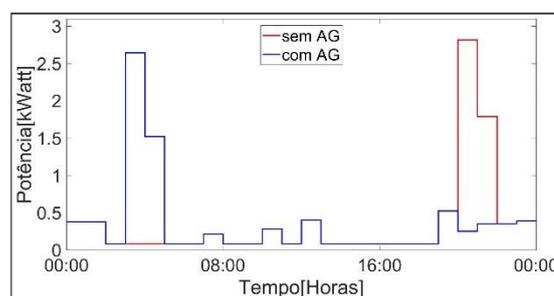
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 32



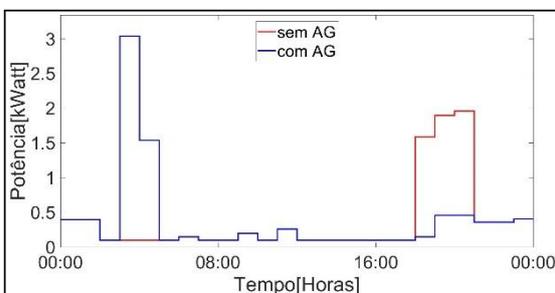
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 36



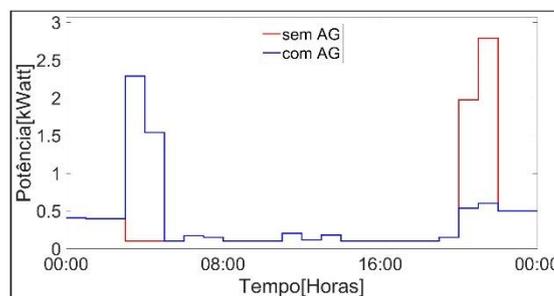
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 33



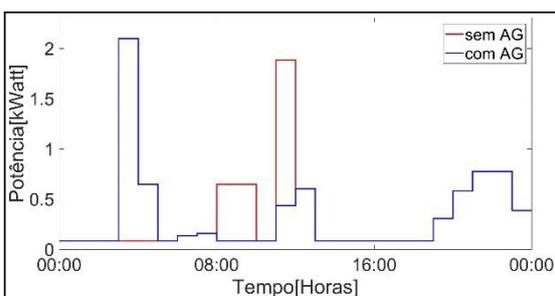
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 37



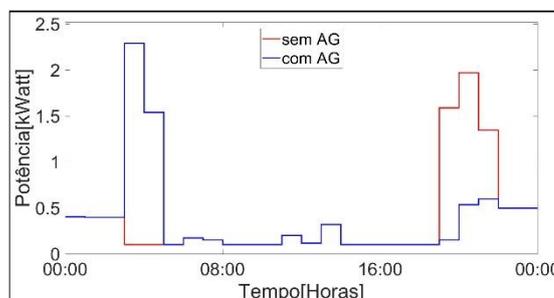
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 34



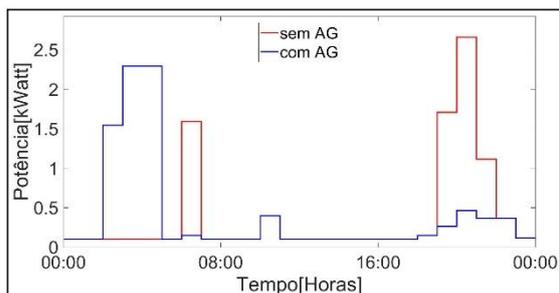
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 38



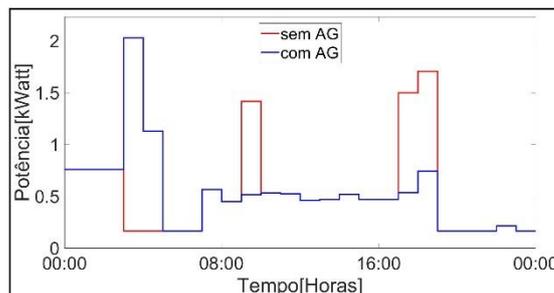
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 39



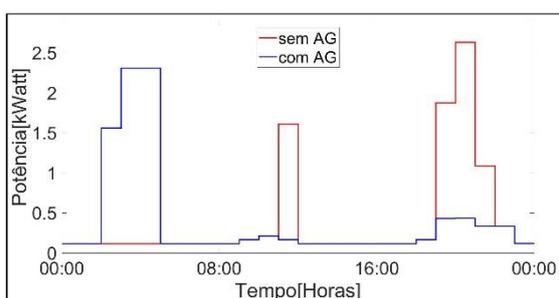
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 43



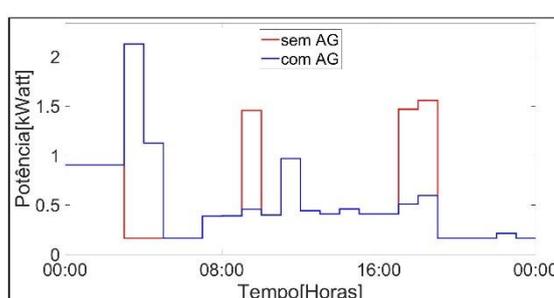
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 40



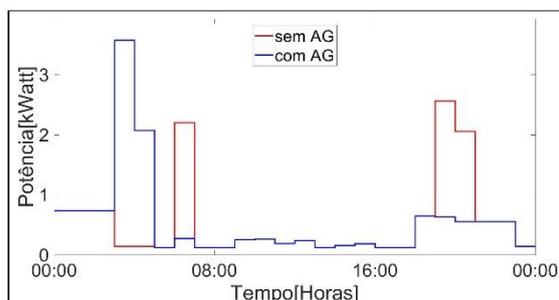
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 44



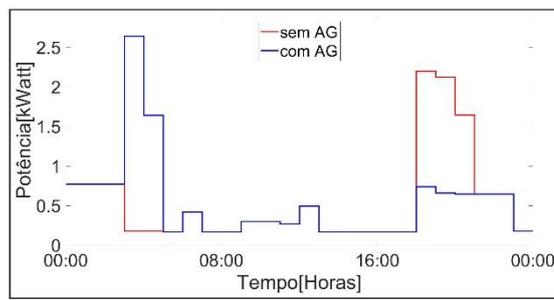
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 41



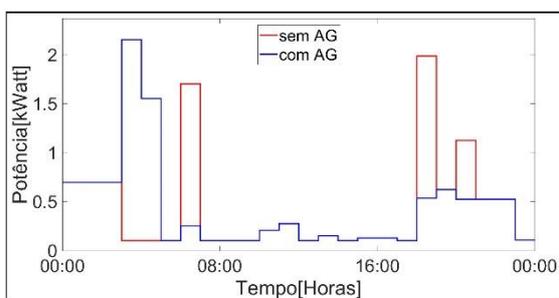
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 45



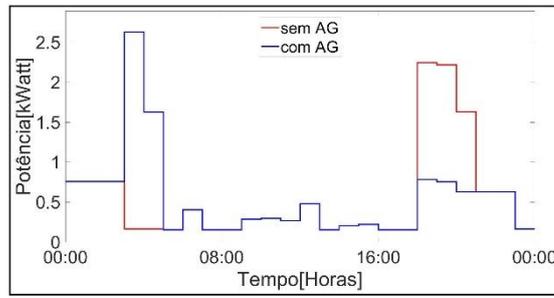
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 42



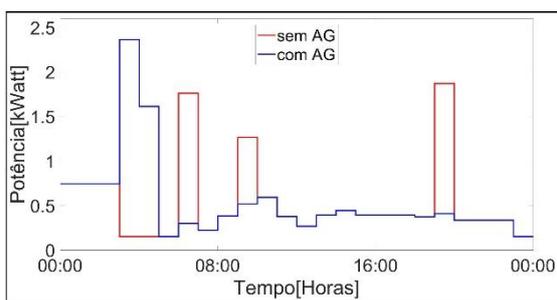
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 46



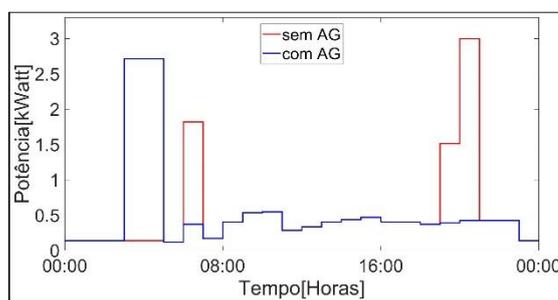
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 47



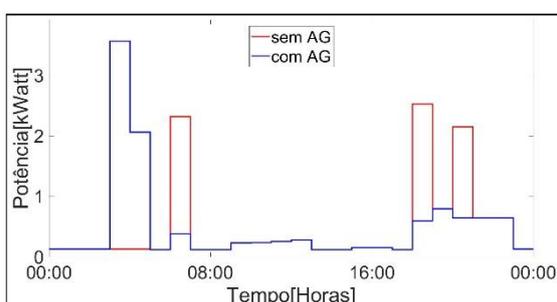
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 51



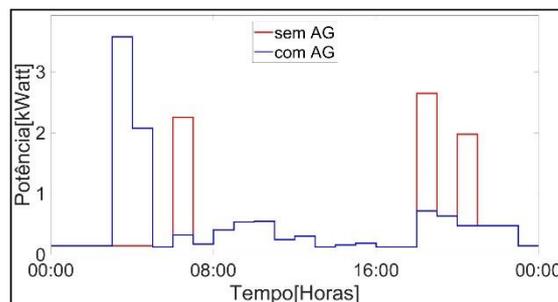
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 48



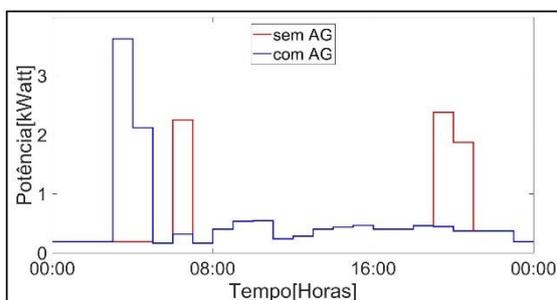
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 52



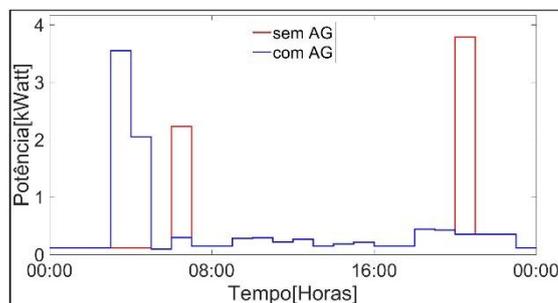
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 49



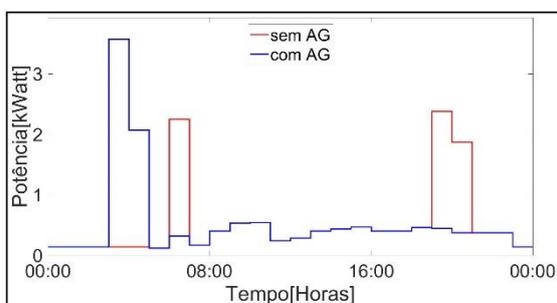
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 53



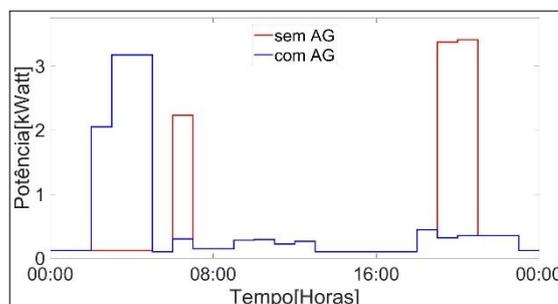
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 50



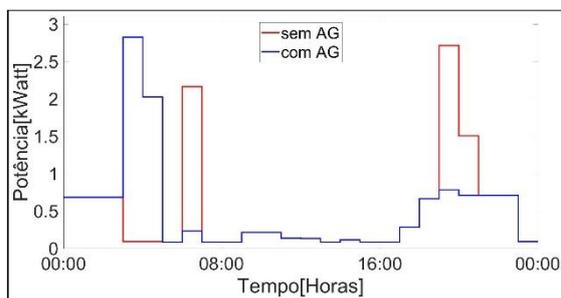
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 54



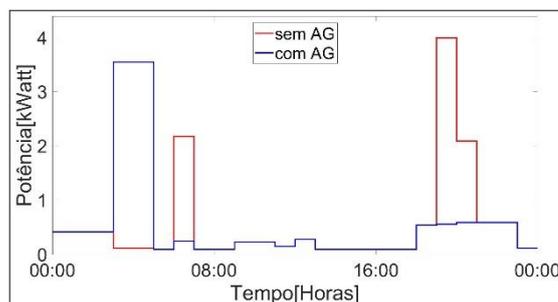
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 55



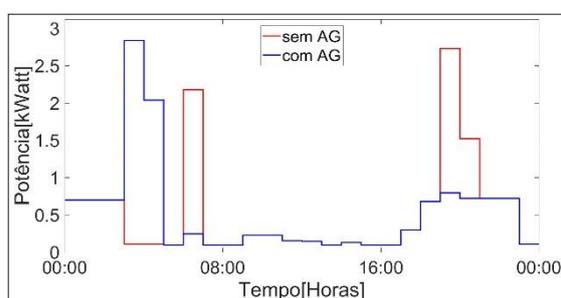
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 59



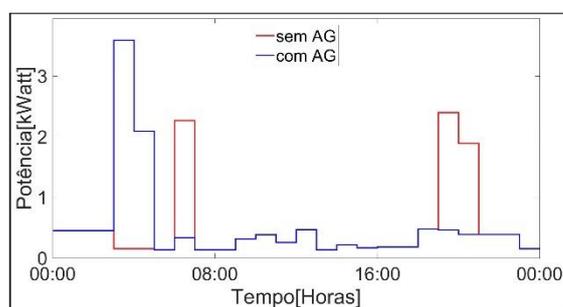
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 56



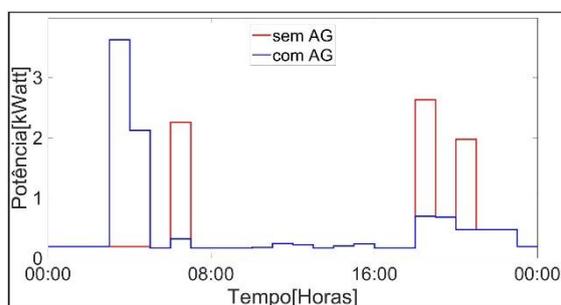
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 60



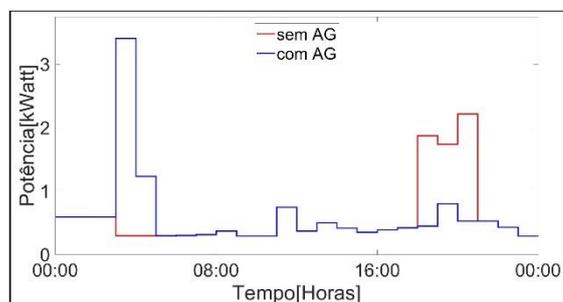
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 57



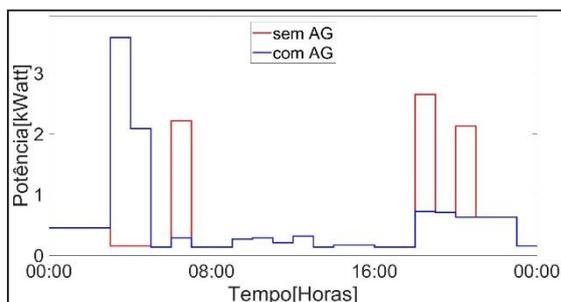
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 61



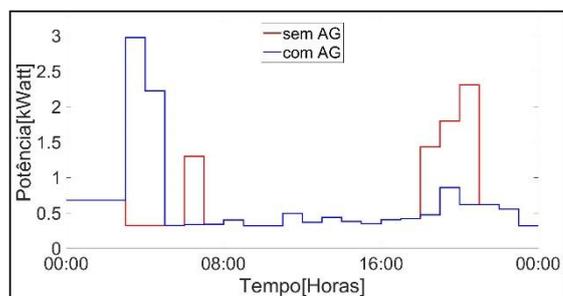
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 58



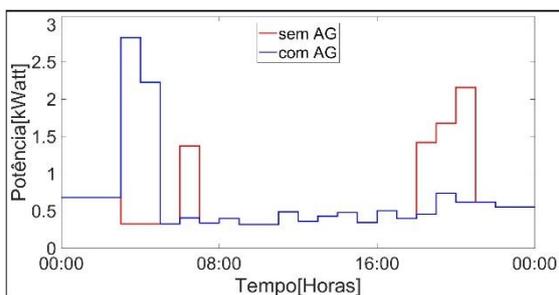
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 62



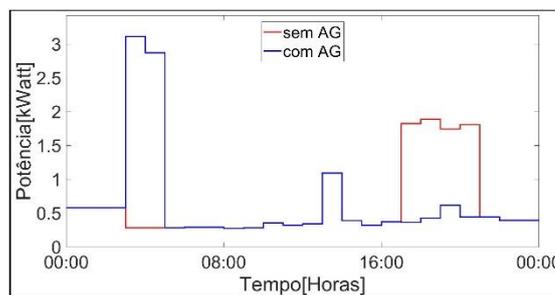
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 63



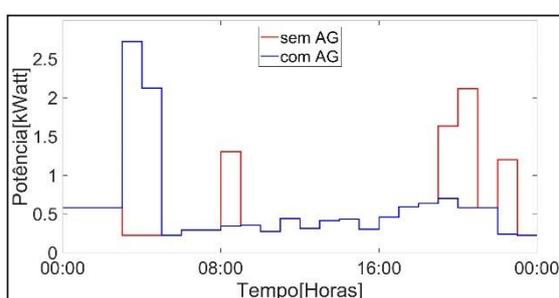
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 67



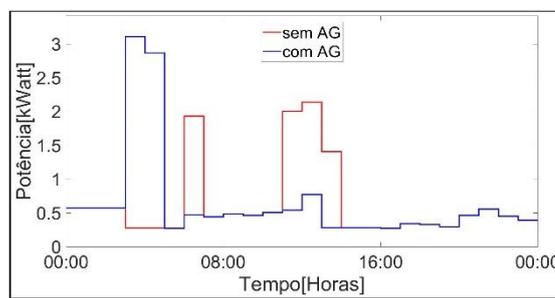
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 64



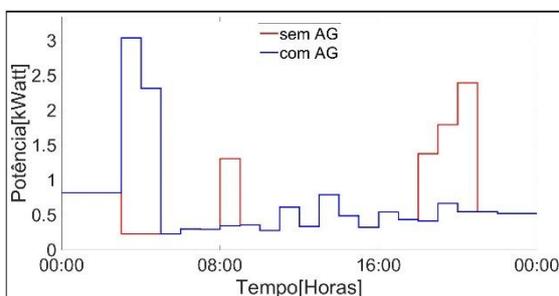
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 68



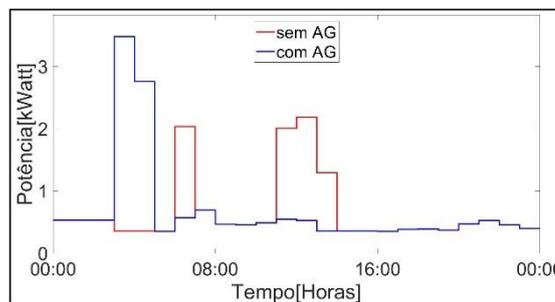
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 65



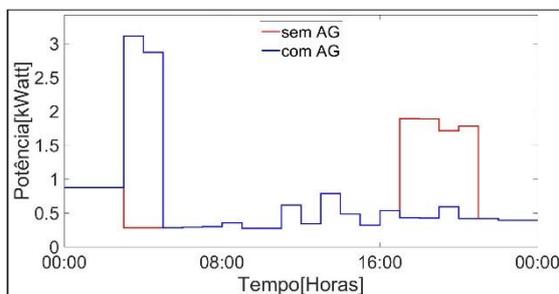
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 69



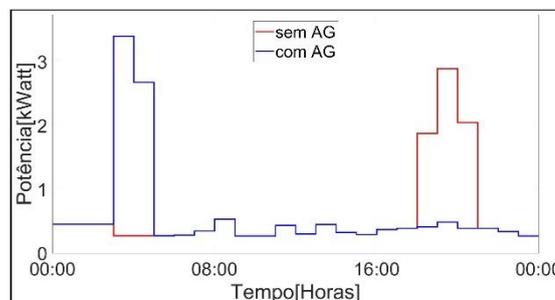
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 66



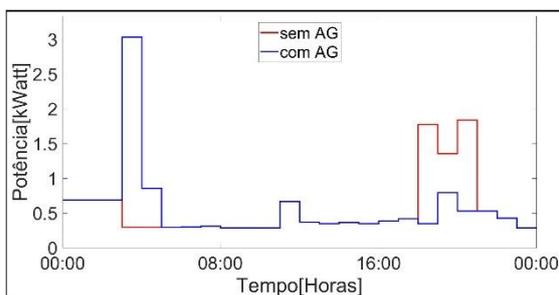
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 70



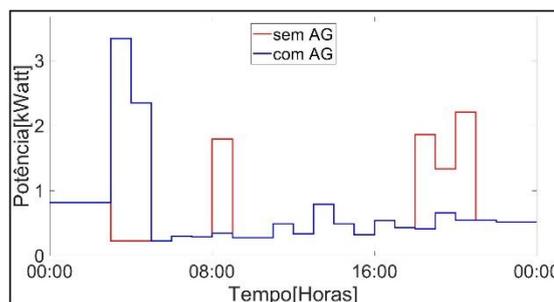
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 71



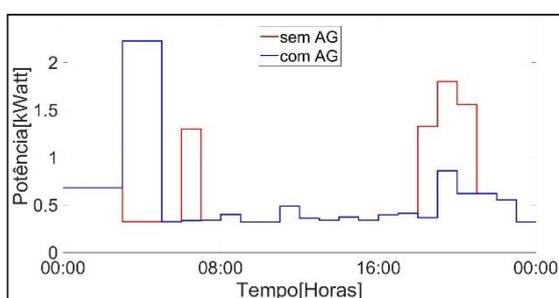
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 75



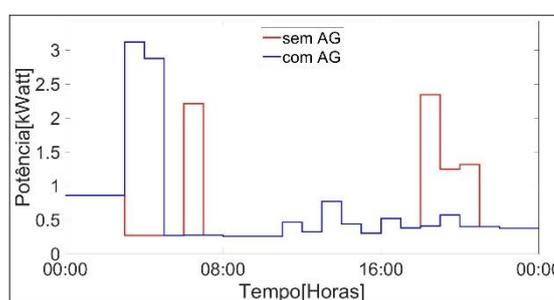
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 72



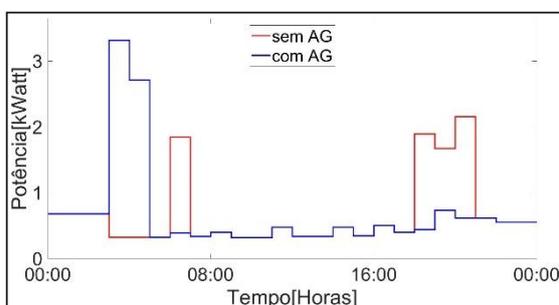
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 76



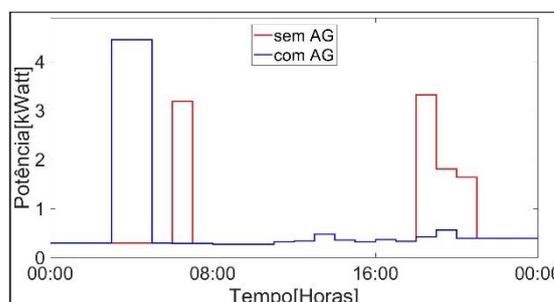
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 73



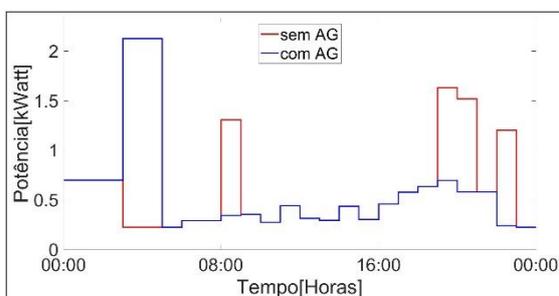
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 77



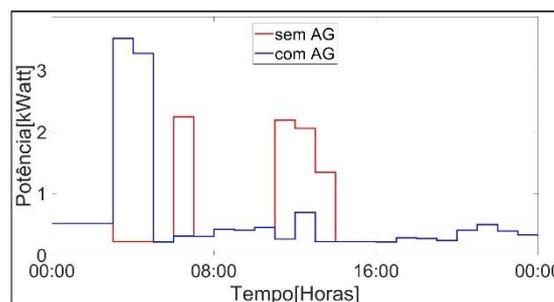
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 74



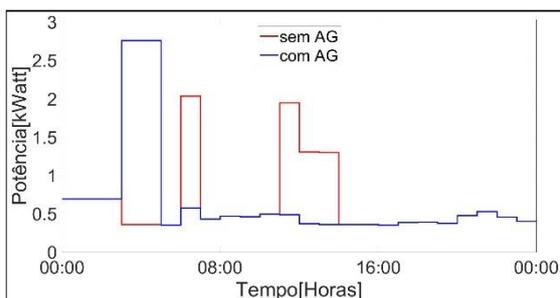
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 78



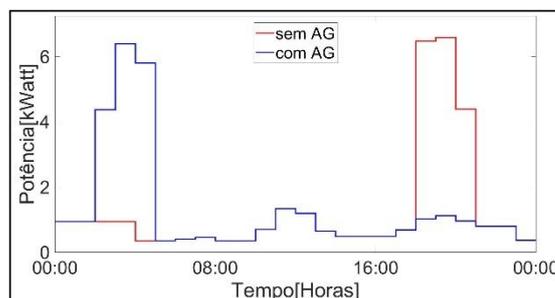
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 79



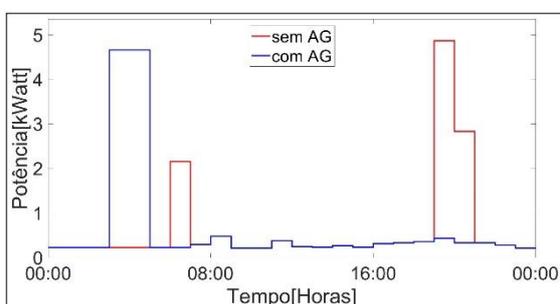
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 83



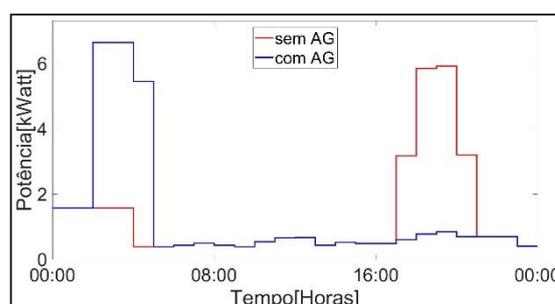
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 80



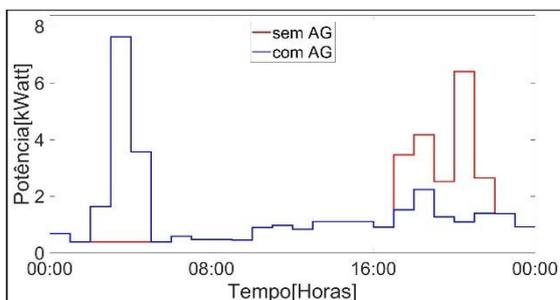
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 84



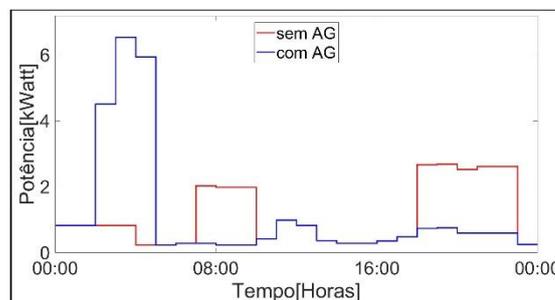
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 81



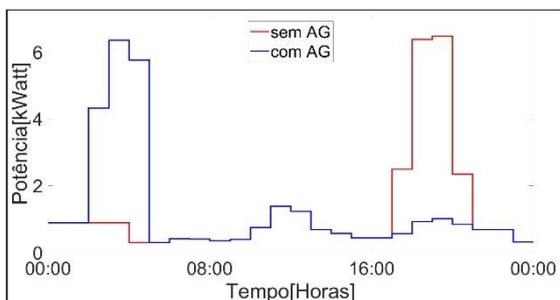
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 85



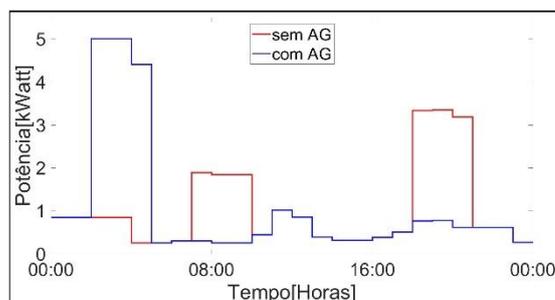
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 82



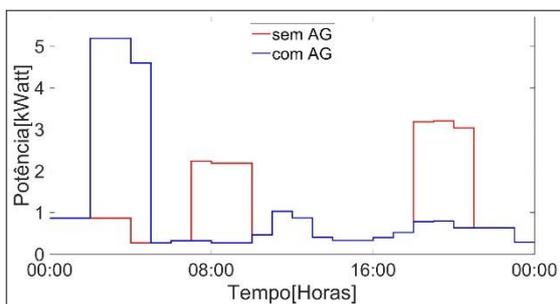
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 86



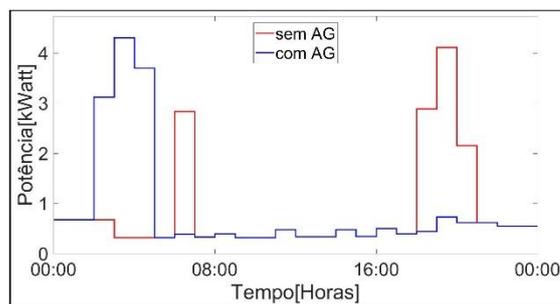
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 87



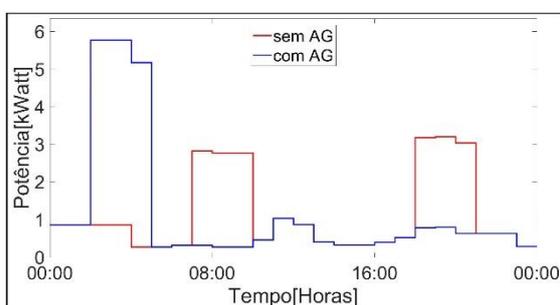
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 91



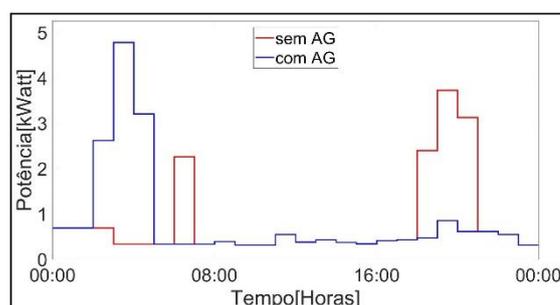
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 88



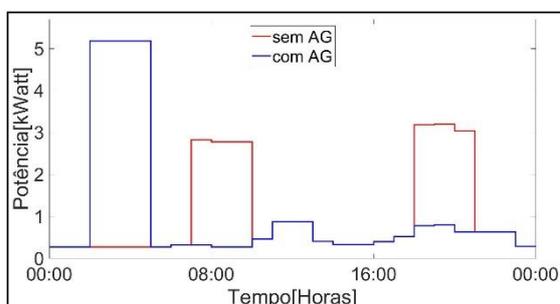
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 92



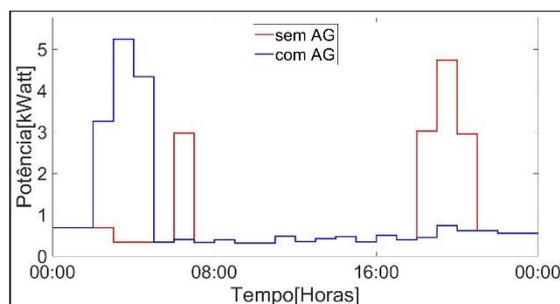
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 89



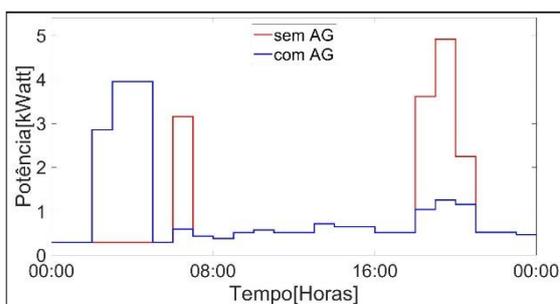
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 93



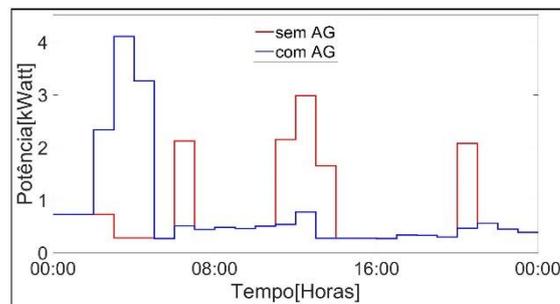
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 90



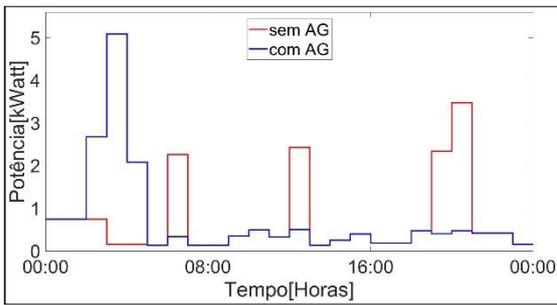
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 94



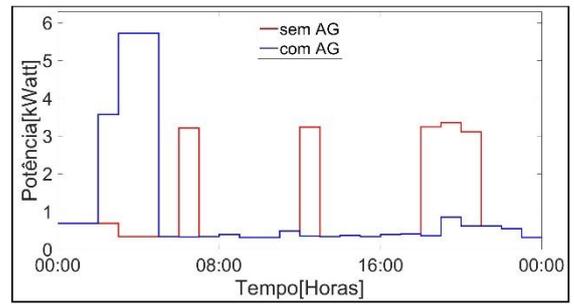
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 95



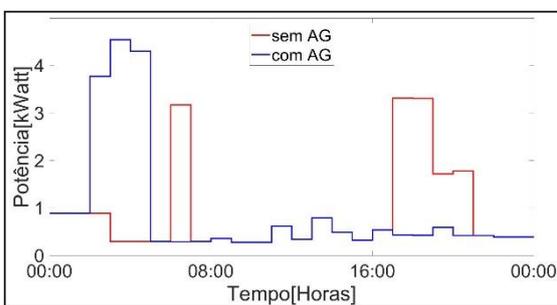
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 99



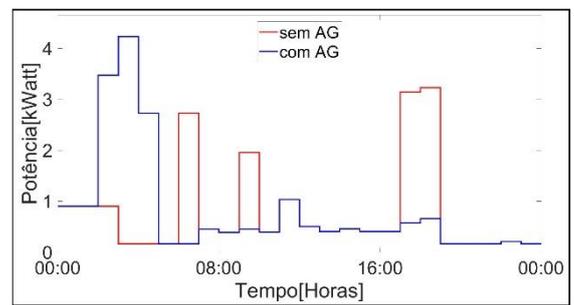
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 96



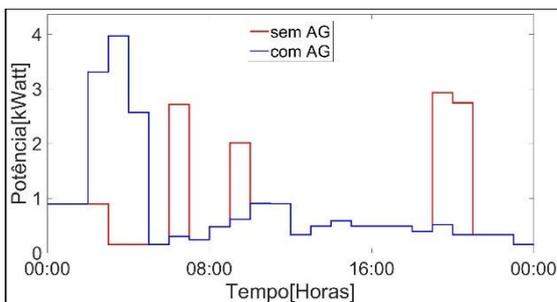
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 100



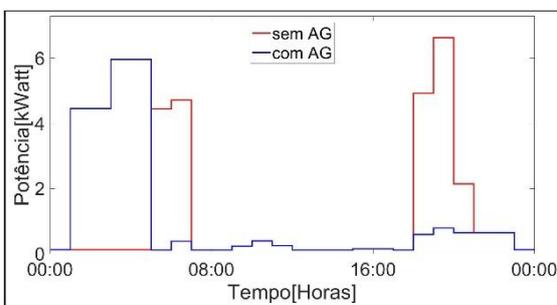
Fonte: o autor (2019)

Consumidor 97



Fonte: o autor (2019)

Consumidor 98



Fonte: o autor (2019)

## APENDICE D – PRINCIPAIS CÓDIGOS UTILIZADOS

Código utilizado para a importação dos dados:

```

%Carregamento dos dados
%Inicio do algoritmo
% Etapa 1: Carregamento de dados das residências
filename=dir; %Nome e local do arquivo dos consumidores
%D:\Documents\Faculdade\2019-2\TCC 2\Consumidores.xlsx
xlRange='E1:AQ2308'; %Células que serão carregadas
dados = table2cell(readtable(filename,'Range', xlRange)); %Carrega tabela
dados(:,2)=[]; %Elimina coluna vazias
dados(:,2)=[];
dados(:,2)=[];
N_cons=0;
Linhas=length(dados);
for f = 1:1:Linhas %Conta o numero de consumidores
    if(dados(f,1)=="Start")
        N_cons=N_cons+1;
    end
end
end
%%Ref_cargas: Matriz de referencia aos dados importados
%%Coluna 1: Quantidade de equipamentos
%%Coluna 2: Linha inicial dos equipamentos
%%Coluna 3: Linha final dos equipamentos
%%Coluna 4: Quantidade de cargas acessíveis
%%Coluna 5: Quantidade de cargas acessíveis contínuas
Ref_cargas=zeros(N_cons,5);
Lin=1;
L_fin=1;
for f = 1:1:N_cons %Conta a quantidade de cargas de um consumidor
    if(dados(Lin,1)=="Start")
        Lin=Lin+4;
        L_ini=Lin;
        n_cargas=0;
        while(dados(Lin,1)~="Stop")
            L_fin=Lin;
            Lin=Lin+1;
            n_cargas=n_cargas+1;
        end
        Ref_cargas(f,1)=n_cargas; %Armazena o numero de cargas por
consumidor
        Ref_cargas(f,2)=L_ini; %Linha inicial do consumidor
        Ref_cargas(f,3)=L_fin; %Linha final do consumidor
        Lin=Lin+1;
    end
end
end
%Acessibilidade e continuidade
for f=1:1:N_cons
    for m=Ref_cargas(f,2):1:Ref_cargas(f,3)
        if(dados(m,3)=="x")
            Ref_cargas(f,4)=Ref_cargas(f,4)+1;
            if(dados(m,4)=="x")
                Ref_cargas(f,5)=Ref_cargas(f,5)+1;
            end
        end
    end
end
end
end
end

```

```

%Organização dos dados em Struct
%Coluna dos Equipamentos: 1
%Coluna das Potências: 2
%Coluna acessibilidade: 3
%Coluna continuidade: 4
%Coluna horas: 5
%Coluna minutos: 6
%Coluna dias: 7
%Coluna períodos: 12-35
for f=1:1:N_cons
    Consumidor(f).equipamentos=string.empty(Ref_cargas(f,1),0); %Nome do
equipamento
    Consumidor(f).pot=zeros(Ref_cargas(f,1),1); %Potência do equipamento
    Consumidor(f).aces=string.empty(Ref_cargas(f,1),0); %Acessibilidade do
equipamento
    Consumidor(f).cont=string.empty(Ref_cargas(f,1),0); %Continuidade do
equipamento
    Consumidor(f).hor=zeros(Ref_cargas(f,1),1); %Horas utilizadas do
equipamento
    Consumidor(f).min=zeros(Ref_cargas(f,1),1); %Minutos de funcionamento
do equipamento
    Consumidor(f).dias=zeros(Ref_cargas(f,1),1); %Quantidade de dias em que
é utilizado
    Consumidor(f).per=zeros(Ref_cargas(f,1),24); %Matriz com períodos dos
equipamentos (0 ou 1)
    Consumidor(f).per_ati=zeros(Ref_cargas(f,1),1); %Quantidade de períodos
ativos do equipamento
    Consumidor(f).cons_mes_equi=zeros(Ref_cargas(f,1),1); %Consumo mensal
do equipamento
    Consumidor(f).cons_dia_equi=zeros(Ref_cargas(f,1),1); %Consumo diário
equipamento
    Consumidor(f).pot_equi_equi=zeros(Ref_cargas(f,1),1); %Potência média
equivalente, utilizada no gráfico de consumo
    Consumidor(f).cons_mes_tot=zeros(1); %Consumo mensal total do
equipamento
    Consumidor(f).part equip.classe=zeros(10,1); %Participação no consumo
total do equipamento por classe
    Consumidor(f).part equip.quant=zeros(10,1); %Quantidade de equipamentos
por classe
    Consumidor(f).part equip.cons=zeros(10,1); %Consumo anual do
equipamento por classe
    Consumidor(f).per_c_pot=zeros(Ref_cargas(f,1),24); %Matriz períodos com
as potências equivalentes
    Consumidor(f).estaticas=zeros((Ref_cargas(f,1))-
(Ref_cargas(f,4))),24); %Matriz períodos com as potências equivalentes das
cargas estáticas
    Consumidor(f).acessiveis.descontínuas=zeros((Ref_cargas(f,4))-
(Ref_cargas(f,5))),24); %Matriz períodos com as potências equivalentes das
cargas acessíveis descontínuas
    Consumidor(f).acessiveis.contínuas=zeros((Ref_cargas(f,5)),24); %Matriz
períodos com as potências equivalentes das cargas acessíveis contínuas
    Consumidor;
    pos=1;
    Lin=1;
    for m=Ref_cargas(f,2):1:Ref_cargas(f,3)
        Consumidor(f).equipamentos(pos,1)=string(dados(m,1));
        Consumidor(f).pot(pos)=str2double(dados(m,2));
        Consumidor(f).aces(pos,1)=string(dados(m,3));
        Consumidor(f).cont(pos,1)=string(dados(m,4));
        Consumidor(f).hor(pos)=str2double(dados(m,5));
        Consumidor(f).min(pos)=str2double(dados(m,6));
    end
end

```

```

        Consumidor(f).dias(pos)=str2double(dados(m,7));
    for n=12:1:35
        Consumidor(f).per(pos, Lin)=str2double(dados(m,n));
        Lin=Lin+1;
    end
    Lin=1;
    pos=pos+1;
end
end
%Etapa 2: Cálculos de consumo dos clientes
for f=1:1:N_cons
    per=sum(Consumidor(f).per,2);
    for m=1:1:Ref_cargas(f,1)

cons_mes=(((Consumidor(f).hor(m))+((Consumidor(f).min(m))/60))*(Consumidor
(f).pot(m)))*(Consumidor(f).dias(m)));
        cons_dia=cons_mes/30;
        pot_equi=cons_dia/per(m);
        Consumidor(f).per_ati(m)=per(m);
        Consumidor(f).cons_mes_equi(m)=cons_mes;
        Consumidor(f).cons_dia_equi(m)=cons_dia;
        Consumidor(f).pot_equi_equi(m)=pot_equi;
    end

Consumidor(f).cons_mes_tot=((sum(Consumidor(f).cons_dia_equi))*30)/1000;
end
% Etapa 3: participação final dos eletrodomésticos
% Geladeira %Classe 1
% Freezer %Classe 2
% Aquecimento %Classe 3
% Som %Classe 4
% TV %Classe 5
% Condicionamento ambiental %Classe 6
% Iluminação %Classe 7
% Máquina de lavar louças %Classe 8
% Máquina de lavar roupas %Classe 9
% Outros %Classe 10
Part_equipamentos = zeros(10,1);
Quant_equipamentos = zeros(10,1);
Cons_equipamentos = zeros(10,1);
for f=1:1:N_cons
    for m=1:1:Ref_cargas(f,1)
        if (Consumidor(f).equipamentos(m)=="Geladeira")

Part_equipamentos(1)=Part_equipamentos(1)+(((Consumidor(f).cons_dia_equi(m)
)/(sum(Consumidor(f).cons_dia_equi))*100);
            Quant_equipamentos(1)=Quant_equipamentos(1)+1;

Cons_equipamentos(1)=Cons_equipamentos(1)+(Consumidor(f).cons_mes_equi(m)*1
2);
                elseif (Consumidor(f).equipamentos(m)=="Freezer")

Part_equipamentos(2)=Part_equipamentos(2)+(((Consumidor(f).cons_dia_equi(m)
)/(sum(Consumidor(f).cons_dia_equi))*100);
            Quant_equipamentos(2)=Quant_equipamentos(2)+1;

Cons_equipamentos(2)=Cons_equipamentos(2)+(Consumidor(f).cons_mes_equi(m)*1
2);
                elseif
((Consumidor(f).equipamentos(m)=="Boiler") || (Consumidor(f).equipamentos(m)=
="Chuveiro"))

```

```

Part_equipamentos(3)=Part_equipamentos(3)+(((Consumidor(f).cons_dia_equi(m)
)/(sum(Consumidor(f).cons_dia_equi))*100);
    Quant_equipamentos(3)=Quant_equipamentos(3)+1;

Cons_equipamentos(3)=Cons_equipamentos(3)+(Consumidor(f).cons_mes_equi(m)*1
2);
    elseif (Consumidor(f).equipamentos(m)=="Aparelho de som")

Part_equipamentos(4)=Part_equipamentos(4)+(((Consumidor(f).cons_dia_equi(m)
)/(sum(Consumidor(f).cons_dia_equi))*100);
    Quant_equipamentos(4)=Quant_equipamentos(4)+1;

Cons_equipamentos(4)=Cons_equipamentos(4)+(Consumidor(f).cons_mes_equi(m)*1
2);
    elseif (Consumidor(f).equipamentos(m)=="Aparelho de TV")

Part_equipamentos(5)=Part_equipamentos(5)+(((Consumidor(f).cons_dia_equi(m)
)/(sum(Consumidor(f).cons_dia_equi))*100);
    Quant_equipamentos(5)=Quant_equipamentos(5)+1;

Cons_equipamentos(5)=Cons_equipamentos(5)+(Consumidor(f).cons_mes_equi(m)*1
2);
    elseif (Consumidor(f).equipamentos(m)=="Ar condicionado")

Part_equipamentos(6)=Part_equipamentos(6)+(((Consumidor(f).cons_dia_equi(m)
)/(sum(Consumidor(f).cons_dia_equi))*100);
    Quant_equipamentos(6)=Quant_equipamentos(6)+1;

Cons_equipamentos(6)=Cons_equipamentos(6)+(Consumidor(f).cons_mes_equi(m)*1
2);
    elseif (Consumidor(f).equipamentos(m)=="Iluminação")

Part_equipamentos(7)=Part_equipamentos(7)+(((Consumidor(f).cons_dia_equi(m)
)/(sum(Consumidor(f).cons_dia_equi))*100);
    Quant_equipamentos(7)=Quant_equipamentos(7)+1;

Cons_equipamentos(7)=Cons_equipamentos(7)+(Consumidor(f).cons_mes_equi(m)*1
2);
    elseif (Consumidor(f).equipamentos(m)=="Máquina de lavar louças")

Part_equipamentos(8)=Part_equipamentos(8)+(((Consumidor(f).cons_dia_equi(m)
)/(sum(Consumidor(f).cons_dia_equi))*100);
    Quant_equipamentos(8)=Quant_equipamentos(8)+1;

Cons_equipamentos(8)=Cons_equipamentos(8)+(Consumidor(f).cons_mes_equi(m)*1
2);
    elseif ((Consumidor(f).equipamentos(m)=="Máquina de lavar
roupas") || (Consumidor(f).equipamentos(m)=="Máquina lava e seca"))

Part_equipamentos(9)=Part_equipamentos(9)+(((Consumidor(f).cons_dia_equi(m)
)/(sum(Consumidor(f).cons_dia_equi))*100);
    Quant_equipamentos(9)=Quant_equipamentos(9)+1;

Cons_equipamentos(9)=Cons_equipamentos(9)+(Consumidor(f).cons_mes_equi(m)*1
2);
    else

Part_equipamentos(10)=Part_equipamentos(10)+(((Consumidor(f).cons_dia_equi(
m))/(sum(Consumidor(f).cons_dia_equi))*100);
    Quant_equipamentos(10)=Quant_equipamentos(10)+1;

```

```

Cons_equipamentos(10)=Cons_equipamentos(10)+(Consumidor(f).cons_mes_equi(m)
*12);
    end
end
for n=1:1:10
    Consumidor(f).part_equip.classe(n)=Part_equipamentos(n);
    Consumidor(f).part_equip.quant(n)=Quant_equipamentos(n);
    if(Quant_equipamentos(n)>0)

Consumidor(f).part_equip.cons(n)=(Cons_equipamentos(n)/Quant_equipamentos(n)
));
    end
end
Part_equipamentos = zeros(10,1);
Quant_equipamentos = zeros(10,1);
Cons_equipamentos = zeros(10,1);
end
for f=1:1:N_cons
    for m=1:1:Ref_cargas(f,1)
        for n=1:1:24

Consumidor(f).per_c_pot(m,n)=Consumidor(f).pot_equi_equi(m).*Consumidor(f).
per(m,n);
            end
        end
end
%Matriz referência Ref_cla: armazena informações das cargas acessíveis
%Coluna 1: Cliente
%Coluna 2: Linha de que a carga foi copiada
%Coluna 3: Potência equivalente da carga
%Coluna 4: Períodos ativos da carga
%A Matriz é dividida em duas partes:
%Ref_cla_desc: Informações das cargas descontínuas
%Ref_cla_cont: Informações das cargas contínuas
%Esse método foi escolhido para facilitar a aplicação das restrições
Ref_cla_cont=zeros(sum(Ref_cargas(:,5)),4);
Ref_cla_desc=zeros((sum(Ref_cargas(:,4))-sum(Ref_cargas(:,5))),4);
pos_ref_cont=1;
pos_ref_desc=1;
%Classificação das cargas contínuas, descontínuas e estáticas
for f=1:1:N_cons
    pos_e=1;
    pos_ac=1;
    pos_ad=1;
    for m=1:1:Ref_cargas(f,1)
        if ((Consumidor(f).aces(m)=="x") && (Consumidor(f).cont(m)=="x"))
            Ref_cla_cont(pos_ref_cont,1)=f;
            Ref_cla_cont(pos_ref_cont,2)=m;
            Ref_cla_cont(pos_ref_cont,3)=Consumidor(f).pot_equi_equi(m);
            Ref_cla_cont(pos_ref_cont,4)=Consumidor(f).per_ati(m);
            pos_ref_cont=pos_ref_cont+1;
            for n=1:1:24

Consumidor(f).acessiveis.continuas(pos_ac,n)=Consumidor(f).per_c_pot(m,n);
                end
                pos_ac=pos_ac+1;
            elseif (Consumidor(f).aces(m)=="x")
                Ref_cla_desc(pos_ref_desc,1)=f;
                Ref_cla_desc(pos_ref_desc,2)=m;
                Ref_cla_desc(pos_ref_desc,3)=Consumidor(f).pot_equi_equi(m);
            end
        end
    end
end

```

```

Ref_cla_desc(pos_ref_desc,4)=Consumidor(f).per_ati(m);
pos_ref_desc=pos_ref_desc+1;
for n=1:1:24

Consumidor(f).acessiveis.descontínuas(pos_ad,n)=Consumidor(f).per_c_pot(m,n);
end
pos_ad=pos_ad+1;
else
for n=1:1:24

Consumidor(f).estaticas(pos_e,n)=Consumidor(f).per_c_pot(m,n);
end
pos_e=pos_e+1;
end
end
end
Ref_cla=[Ref_cla_desc;Ref_cla_cont];
%Ref_ma: Matriz de referencia dos equipamentos das matrizes E, Desc, Cont
%%Coluna 1: Linha inicial das cargas estáticas na matriz E
%%Coluna 2: Linha final das cargas estáticas na matriz E
%%Coluna 3: Linha inicial das cargas acessíveis descontínuas na matriz Desc
%%Coluna 4: Linha final das cargas acessíveis descontínuas na matriz Desc
%%Coluna 5: Linha inicial das cargas acessíveis contínuas na matriz Cont
%%Coluna 6: Linha final das cargas acessíveis contínuas na matriz Cont
Ref_ma=zeros(N_cons,6);
%Matriz cargas não acessíveis
Linhas=((sum(Ref_cargas(:,1))-sum(Ref_cargas(:,4))));
E=zeros(Linhas,24);
pos=1;
for f=1:1:N_cons
Ref_ma(f,1)=pos;
for m=1:1:length(Consumidor(f).estaticas(:,1))
for n=1:1:24
E(pos,n)=Consumidor(f).estaticas(m,n);
end
pos=pos+1;
end
Ref_ma(f,2)=pos-1;
end
%Matriz cargas acessíveis descontínuas
Linhas=(sum(Ref_cargas(:,4))-sum(Ref_cargas(:,5)));
Desc=zeros(Linhas,24);
pos=1;
for f=1:1:N_cons
if(isempty(Consumidor(f).acessiveis.descontínuas)==0)
Ref_ma(f,3)=pos;
for m=1:1:length(Consumidor(f).acessiveis.descontínuas(:,1))
for n=1:1:24
Desc(pos,n)=Consumidor(f).acessiveis.descontínuas(m,n);
end
pos=pos+1;
end
Ref_ma(f,4)=pos-1;
end
end
end
%Matriz cargas acessíveis contínuas
Linhas=sum(Ref_cargas(:,5));
Cont=zeros(Linhas,24);
pos=1;
for f=1:1:N_cons

```

```

if (isempty(Consumidor(f).acessiveis.continuas)==0)
    Ref_ma(f,5)=pos;
    for m=1:1:length(Consumidor(f).acessiveis.continuas(:,1))
        for n=1:1:24
            Cont(pos,n)=Consumidor(f).acessiveis.continuas(m,n);
        end
        pos=pos+1;
    end
    Ref_ma(f,6)=pos-1;
end
end
A=[Desc;Cont];
%Curva de carga nacional
Curva_nacional=[0.875 0.825 0.8 0.79 0.795 0.835 0.88 0.945 1.02 1.05 1.09
1.095 1.06 1.09 1.11 1.11 1.1 1.079 1.148 1.13 1.1 1.09 1.045 0.97 0.875];
clear Ref_cla_cont Ref_cla_desc Linhas f m n Cons Equipamentos
Quant Equipamentos Part Equipamentos dados Nomes Equip pos_ref_cont
pos_ref_desc pos_ac pos_ad pos_e cons_dia cons_mes pot_equi per xlRange Lin
pos L_fin L_ini n_cargas;
save Dados_consumidor.mat;
Gera_graficos_dados_entrada

```

### Código para cálculo dos custos iniciais:

```

%Gera o vetor das tarifas e calcula os custos totais dos clientes.
%Tarifas
Vt=zeros(1,25);
if(tipo_tarifa==1)
    Pmin=Tmin/Tmed;
    Pmax=Tmax/Tmed;
    nivel=3;
    Pesos=Curva_nacional.^nivel;
    for f=1:1:24
        if (Pesos(f)<Pmin)
            Pesos(f)=Pmin;
        elseif (Pesos(f)>Pmax)
            Pesos(f)=Pmax;
        end
    end
    Vt=Tmed*Pesos;
elseif(tipo_tarifa==2)
    Tfp=0.448;
    Tp=0.958;
    Tint=0.618;
    Tconv=0.547;
    for t=1:1:17
        Vt(t)=Tfp;
    end
    for t=23:1:24
        Vt(t)=Tfp;
    end
    for t=19:1:21
        Vt(t)=Tp;
    end
    Vt(18)=Tint;
    Vt(22)=Tint;
end
%Custos
Ref_custos=zeros(N_cons,2);
%Cálculo custo cliente com tarifa convencional
Soma=zeros(1,24);

```

```

for f=1:1:N_cons
    aux=sum(Consumidor(f).per_c_pot);
    for m=1:1:24
        Soma(m) = ((aux(m)/1000)*Tconv*30);
    end
    Ref_custos(f,1)=sum(Soma(1,:));
end
%Cálculo custo cliente com tarifa dinâmica
Soma=zeros(1,24);
for f=1:1:N_cons
    aux=sum(Consumidor(f).per_c_pot);
    for m=1:1:24
        Soma(m) = ((aux(m)/1000)*Vt(m)*30);
    end
    Ref_custos(f,2)=sum(Soma(1,:));
end
Total_tmed=sum(Ref_custos(:,1));
Total_tdin=sum(Ref_custos(:,2));
clear f m n pos aux Soma Linhas nivel Pmax Pmin;
Custos_por_faixa
save Dados_custos.mat;

```

### Código da última versão do algoritmo genético:

```

%AG: Torneio, Uniforme, individuo - aplicação por carga
%Define parâmetros
tam_popu=100;
Num_ger=25;
taxa_mut=0.75;
taxa_subst=0.9;
N_p_torneio=3;
Lim_pot=200;
%Alocação de memória
N_cruzamentos=int32((taxa_subst*tam_popu)/2);
N_sobrevi=int32((1-taxa_subst)*tam_popu);
ini_c=N_sobrevi;
Tot_aux=zeros(tam_popu,1);
torneio=zeros(N_p_torneio,2);
Linhas=length(A);
Cromos_pot_tot=zeros(Linhas,24);
Cromos_pot_c=zeros(1,24);
fitness=zeros(tam_popu,1);
tot_restr=zeros(tam_popu,1);
pais=zeros(1,2);
filhos=zeros(1,24,2);
best_pos=zeros(N_sobrevi,2);
melhor=zeros(Linhas,24);
fit_me=10000;
num_G_I=zeros(Linhas,5);
Vta=Vt;
%Define o valor das penalizações
kr=zeros(Linhas,1);
Vtm=max(Vta);
for m=1:1:Linhas
    kr(m)=Ref_cla(m,3)*Vtm*1.1;
end
%Inicio do laço
ger=1;
tot_ger=Linhas+(Linhas*Num_ger);
soma_ger=0;
C_lim=0;

```

```

for m=1:1:Linhas
    %Limite de consumo
    for p=1:1:m
        for n=1:1:24
            Cromos_pot_tot(p,n)=Ref_cla(p,3)*melhor(p,n);
        end
    end
    CE=[E;Cromos_pot_tot];
    CEt=(sum(CE)/1000);
    for n=1:1:24
        if(CEt(n)>Lim_pot)
            Vta(n)=max(Vta);
        end
    end
    %Fim limite de consumo
    %Inicia população
    Cromoss_aux=zeros(1,24,tam_popu);
    populacao=zeros(1,24,tam_popu);
    %Inicio da evolução
    while (ger<=Num_ger)
        %Função de avaliação
        for f=1:1:tam_popu
            %Restrição 1
            R1=(((sum(populacao(1,:,f))-Ref_cla(m,4))^2)*kr(m);
            if(m>99)
                %Restrição 2
                if(sum(populacao(1,:,f))>0)
                    R2=(((find(populacao(1,:,f),1,'last')-
find(populacao(1,:,f),1))- (Ref_cla(m,4)-1))^2)*kr(m);
                else
                    R2=(((-(Ref_cla(m,4)-1))^2)*kr(m);
                end
            else
                R2=0;
            end
            %Cromossomo com potências
            for n=1:1:24
                Cromos_pot_c(1,n)=Ref_cla(m,3)*populacao(1,n,f);
            end
            Consumo=zeros(1,24);
            %Nota do cromossomo
            for n=1:1:24
                Consumo(n)=(Cromos_pot_c(1,n)/1000)*Vta(n));
            end
            Total=sum(Consumo(1,:));
            Tot_aux(f,1)=(Total);
            tot_restr(f)=R1+R2;
            fitness(f)=Total+tot_restr(f);
        end
        %Fim função de avaliação
        %Armazena melhor individuo
        [M,I]=min(fitness);
        if(M<fit_me)
            fit_me=M;
            num_G_I(m,1)=ger;
            num_G_I(m,2)=I;
            num_G_I(m,3)=Tot_aux(I);
            num_G_I(m,4)=tot_restr(I);
            num_G_I(m,5)=fitness(I);
            melhor(m,:)=populacao(1,:,I);
        end
    end
end

```

```

%Fim armazenamento
if(ger~=Num_ger)
    %Nova população
    %Inicio seleção, cruzamento e mutação
    pos_f1=ini_c-1;
    pos_f2=ini_c;
    for c=1:1:N_cruzamentos
        pos_f1=pos_f1+2;
        pos_f2=pos_f2+2;
        %Seleção dos pais: Torneio
        for p=1:1:2
            for t=1:1:N_p_torneio
                r_s=randi([1 tam_popu]);
                torneio(t,1)=fitness(r_s);
                torneio(t,2)=r_s;
            end
            [M,I]=min(torneio(:,1));
            pais(p)=torneio(I,2);
        end
        %Fim da seleção de pais
        %Cruzamento Uniforme + mutação
        r=randi([0 1],1,24);
        for f=1:1:2
            p=(rem(f,2)==1)+1;
            for n=1:1:24
                if(r(1,n)==0)
                    filhos(1,n,f)=populacao(1,n,pais(f));
                else
                    filhos(1,n,f)=populacao(1,n,pais(p));
                end
            end
            r_m=rand(1);
            if(r_m<taxa_mut)
                r_c1=randi([1 24]);
                filhos(1,r_c1,f)=not(filhos(1,r_c1,f));
            end
        end
        %Fim cruzamento e mutação
        %Elitismo
        Elite=fitness;
        for f=1:1:N_sobrevi
            [y,k]=min(Elite);
            Elite(k)=1000000;
            best_pos(f,1)=y;
            best_pos(f,2)=k;
            Cromoss_aux(1,:,f)=populacao(1,:,k);
        end
        %Fim Elitismo
        %Transferencia dos filhos para o cromossomo auxiliar
        Cromoss_aux(1,:,pos_f1)=filhos(1,:,1);
        Cromoss_aux(1,:,pos_f2)=filhos(1,:,2);
        %Fim transferencia
    end
    %Fim da seleção, cruzamento e mutação
    %Nova população
    for f=1:1:tam_popu
        populacao(1,:,f)=Cromoss_aux(1,:,f);
    end
    %Fim nova população
end
%Fim rotina

```

```

        ger=ger+1;
    end
    soma_ger=soma_ger+ger;
    %Progresso do algoritmo em %
    per=((soma_ger/(tot_ger))*100);
    clc;
    fprintf("Progresso: %3.2f",per);
    disp("%");
    fprintf("\n");
    %Fim progresso
    ger=1;
    fit_me=100000;
end
%Fim do laço
save AG.mat;
Custos_finais

```

### Calculo dos custos finais:

```

%Calcula o consumo total com a realocação de cargas proposta pelo algoritmo
%Cromossomo com potencias
Cromos_pot=zeros(Linhas,24);
for m=1:1:Linhas
    for n=1:1:24
        Cromos_pot(m,n)=Ref_cla(m,3)*melhor(m,n);
    end
end
%Cálculo do custo mensal
CE=[E;Cromos_pot];
CEtnl=(sum(CE)/1000);
CEtnl(:,25)=0;
Consumo=zeros(1,24);
Custo=zeros(1,24);
for m=1:1:24
    Consumo(m)=CEtnl(m)*30;
    Custo(m)=Consumo(m)*Vt(m);
end
Total_cons=sum(Consumo(1,:));
Total_cust=sum(Custo(1,:));
%Fim função de consumo
%Calculo da eficiencia do melhor individuo em relação a primeira melhor
%avaliação e o Total de consumo com a tarifa média

clc;
melhor(:, :)
Resultado_geral
Reposicao_cargas
Custos_por_faixa_AG
f=6;
Gera_graf_faixa
save resultado_ag.mat;

```

### Imprime na tela os custos iniciais e finais:

```

%Imprime o consumo total com a realocação de cargas proposta pelo algoritmo
fprintf("\nConsumo total");
fprintf("\nConsumo: %6.2fkWh.mês",Total_cons);
fprintf("\nCusto tarifa convencional: R$%6.2f por mês",Total_tmed);
fprintf("\nCusto tarifa dinamica sem AG: R$%6.2f por mês",Total_tdin);
fprintf("\nCusto tarifa dinamica com AG: R$%6.2f por mês",Total_cust);

```

```

Dif1=(1-(Total_cust/Total_tmed))*100;
Dif2=Total_tmed-Total_cust;
Dif3=(1-(Total_cust/Total_tdin))*100;
Dif4=Total_tdin-Total_cust;
if(Dif1>0)
    fprintf("\nO algoritmo reduziu o custo em %6.2f",Dif1);
    disp("% comparado ao custo com a tarifa convencional");
    fprintf("e %6.2f",Dif3);
    disp("% comparado ao custo dinâmico sem realocação de cargas.");
    fprintf("Diferença com o custo da tarifa convencional: R$%6.2f de
economia por mês.\n",Dif2);
    fprintf("Diferença com o custo dinâmico sem realocação de cargas:
R$%6.2f de economia por mês.\n",Dif4);
elseif(Dif1<0)
    fprintf("\nO algoritmo aumentou o custo em %6.2f",Dif1);
    disp("% comparado ao custo com a tarifa convencional");
    fprintf("e %6.2f",Dif3);
    disp("% comparado ao custo dinâmico sem realocação de cargas.");
    fprintf("Diferença com o custo da tarifa convencional: R$%6.2f de custo
extra por mês.\n",Dif2);
    fprintf("Diferença com o custo dinâmico sem realocação de cargas:
R$%6.2f de custo extra por mês.\n",Dif4);
else
    fprintf("\nNão houve diferença com o custo médio.",Dif2);
end

```

### Recoloca as cargas acessíveis aos seus devidos clientes:

```

%Recoloca as cargas acessíveis ao seus clientes
for f=1:1:N_cons
    Consumidor_AG(f).prog_ag=zeros(Ref_cargas(f,1),24); %Matriz períodos
com as potências equivalentes
end

for f=1:1:N_cons
    for m=1:1:length(Consumidor(f).per_c_pot(:,1))
        for n=1:1:24
            Consumidor_AG(f).prog_ag(m,n)=Consumidor(f).per_c_pot(m,n);
        end
    end
end

for f=1:1:N_cons
    for L=1:1:Linhas
        if(f==Ref_cla(L,1))
            for n=1:1:24
                Consumidor_AG(f).prog_ag(Ref_cla(L,2),n)=Cromos_pot(L,n);
            end
        end
    end
end

```

### Cálculo dos custos de energia por faixa de consumo:

```

%Calcula os custos de energia por faixa de consumo

%Pós AG
%faixa_1 = 101-200
%faixa_2 = 201-300

```

```

%faixa_3 = 301-400
%faixa_4 = 401-500
%faixa_5 = 501-1000

Pot_f1=zeros(Linhas_f(1,1),24);
pos=1;
for f=1:1:length(Cons_f1)
    for m=1:1:Ref_cargas(Cons_f1(f),1)
        for n=1:1:24
            Pot_f1(pos,n)=(Consumidor_AG(Cons_f1(f)).prog_ag(m,n))/1000;
        end
        pos=pos+1;
    end
end

Pot_f2=zeros(Linhas_f(1,2),24);
pos=1;
for f=1:1:length(Cons_f2)
    for m=1:1:Ref_cargas(Cons_f2(f),1)
        for n=1:1:24
            Pot_f2(pos,n)=(Consumidor_AG(Cons_f2(f)).prog_ag(m,n))/1000;
        end
        pos=pos+1;
    end
end

Pot_f3=zeros(Linhas_f(1,3),24);
pos=1;
for f=1:1:length(Cons_f3)
    for m=1:1:Ref_cargas(Cons_f3(f),1)
        for n=1:1:24
            Pot_f3(pos,n)=(Consumidor_AG(Cons_f3(f)).prog_ag(m,n))/1000;
        end
        pos=pos+1;
    end
end

Pot_f4=zeros(Linhas_f(1,4),24);
pos=1;
for f=1:1:length(Cons_f4)
    for m=1:1:Ref_cargas(Cons_f4(f),1)
        for n=1:1:24
            Pot_f4(pos,n)=(Consumidor_AG(Cons_f4(f)).prog_ag(m,n))/1000;
        end
        pos=pos+1;
    end
end

Pot_f5=zeros(Linhas_f(1,5),24);
pos=1;
for f=1:1:length(Cons_f5)
    for m=1:1:Ref_cargas(Cons_f5(f),1)
        for n=1:1:24
            Pot_f5(pos,n)=(Consumidor_AG(Cons_f5(f)).prog_ag(m,n))/1000;
        end
        pos=pos+1;
    end
end

Pt1_AG=sum(Pot_f1);

```

```

Consumo_f1=zeros(1,24);
Custo_f1_din=zeros(1,24);
Custo_f1_med=zeros(1,24);
for m=1:1:24
    Consumo_f1(m)=Pt1_AG(m)*30;
    Custo_f1_din(m)=Consumo_f1(m)*Vt(m);
    Custo_f1_med(m)=Consumo_f1(m)*Tconv;
end
Total_cons_f1_AG=sum(Consumo_f1(1,:));
Total_cust_f1_din_AG=sum(Custo_f1_din(1,:));
Total_cust_f1_med_AG=sum(Custo_f1_med(1,:));

Pt2_AG=sum(Pot_f2);
Consumo_f2=zeros(1,24);
Custo_f2_din=zeros(1,24);
Custo_f2_med=zeros(1,24);
for m=1:1:24
    Consumo_f2(m)=Pt2_AG(m)*30;
    Custo_f2_din(m)=Consumo_f2(m)*Vt(m);
    Custo_f2_med(m)=Consumo_f2(m)*Tconv;
end
Total_cons_f2_AG=sum(Consumo_f2(1,:));
Total_cust_f2_din_AG=sum(Custo_f2_din(1,:));
Total_cust_f2_med_AG=sum(Custo_f2_med(1,:));

Pt3_AG=sum(Pot_f3);
Consumo_f3=zeros(1,24);
Custo_f3_din=zeros(1,24);
Custo_f3_med=zeros(1,24);
for m=1:1:24
    Consumo_f3(m)=Pt3_AG(m)*30;
    Custo_f3_din(m)=Consumo_f3(m)*Vt(m);
    Custo_f3_med(m)=Consumo_f3(m)*Tconv;
end
Total_cons_f3_AG=sum(Consumo_f3(1,:));
Total_cust_f3_din_AG=sum(Custo_f3_din(1,:));
Total_cust_f3_med_AG=sum(Custo_f3_med(1,:));

Pt4_AG=sum(Pot_f4);
Consumo_f4=zeros(1,24);
Custo_f4_din=zeros(1,24);
Custo_f4_med=zeros(1,24);
for m=1:1:24
    Consumo_f4(m)=Pt4_AG(m)*30;
    Custo_f4_din(m)=Consumo_f4(m)*Vt(m);
    Custo_f4_med(m)=Consumo_f4(m)*Tconv;
end
Total_cons_f4_AG=sum(Consumo_f4(1,:));
Total_cust_f4_din_AG=sum(Custo_f4_din(1,:));
Total_cust_f4_med_AG=sum(Custo_f4_med(1,:));

Pt5_AG=sum(Pot_f5);
Consumo_f5=zeros(1,24);
Custo_f5_din=zeros(1,24);
Custo_f5_med=zeros(1,24);
for m=1:1:24
    Consumo_f5(m)=Pt5_AG(m)*30;
    Custo_f5_din(m)=Consumo_f5(m)*Vt(m);
    Custo_f5_med(m)=Consumo_f5(m)*Tconv;
end
Total_cons_f5_AG=sum(Consumo_f5(1,:));

```

```

Total_cust_f5_din_AG=sum(Custo_f5_din(1,:));
Total_cust_f5_med_AG=sum(Custo_f5_med(1,:));

tot_co_AG=Total_cons_f1_AG+Total_cons_f2_AG+Total_cons_f3_AG+Total_cons_f4_
AG+Total_cons_f5_AG;
tot_cu_din_AG=Total_cust_f1_din_AG+Total_cust_f2_din_AG+Total_cust_f3_din_A
G+Total_cust_f4_din_AG+Total_cust_f5_din_AG;
tot_cu_med_AG=Total_cust_f1_med_AG+Total_cust_f2_med_AG+Total_cust_f3_med_A
G+Total_cust_f4_med_AG+Total_cust_f5_med_AG;

clear f m n pos;

```

## Gera gráficos de comparação por faixa:

```
%Gera gráfico de comparação por faixa
```

```

switch f
    case 1
        %Comparação 101-200kWh
        CEt_f1=Pt1;
        CEt_f1(1,25)=0;
        CEt_f1_AG=Pt1_AG;
        CEt_f1_AG(1,25)=0;
        limf1=max(CEt_f1_AG)*1.2;
        Titulo= "Comparação 101-200kWh";
        H_Inicio = datenum('00:00');
        H_Fim = datenum('23:59');
        figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
        stairs(hs,CEt_f1,'r','LineWidth',2)
        hold on
        stairs(hs,CEt_f1_AG,'b','LineWidth',2)
        set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')
        ax = gca;
        ax.XTick = hs;
        datetick('x','HH:MM','kepticks');
        axis ([H_Inicio H_Fim 0 limf1]);
        grid off;
        box off;
        xlabel('Tempo[Horas]');
        ylabel('Potência[kWatt]');
        title(Titulo);
    case 2
        %Comparação 201-300kWh
        CEt_f2=Pt2;
        CEt_f2(1,25)=0;
        CEt_f2_AG=Pt2_AG;
        CEt_f2_AG(1,25)=0;
        limf2=max(CEt_f2_AG)*1.2;
        Titulo= "Comparação 201-300kWh";
        H_Inicio = datenum('00:00');
        H_Fim = datenum('23:59');
        figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
        stairs(hs,CEt_f2,'r','LineWidth',2)
        hold on
        stairs(hs,CEt_f2_AG,'b','LineWidth',2)
        set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')
        ax = gca;
        ax.XTick = hs;
        datetick('x','HH:MM','kepticks');
        axis ([H_Inicio H_Fim 0 limf2]);
        grid off;

```

```

box off;
xlabel('Tempo[Horas]');
ylabel('Potência[kWatt]');
title(Titulo);
case 3
%Comparação 301-400kWh
CEt_f3=Pt3;
CEt_f3(1,25)=0;
CEt_f3_AG=Pt3_AG;
CEt_f3_AG(1,25)=0;
limf3=max(CEt_f3_AG)*1.2;
Titulo= "Comparação 301-400kWh";
H_Inicio = datenum('00:00');
H_Fim = datenum('23:59');
figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
stairs(hs,CEt_f3,'r','LineWidth',2)
hold on
stairs(hs,CEt_f3_AG,'b','LineWidth',2)
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')
ax = gca;
ax.XTick = hs;
datetick('x','HH:MM','kepticks');
axis ([H_Inicio H_Fim 0 limf3]);
grid off;
box off;
xlabel('Tempo[Horas]');
ylabel('Potência[kWatt]');
title(Titulo);
case 4
%Comparação 401-500kWh
CEt_f4=Pt4;
CEt_f4(1,25)=0;
CEt_f4_AG=Pt4_AG;
CEt_f4_AG(1,25)=0;
limf4=max(CEt_f4_AG)*1.2;
Titulo= "Comparação 401-500kWh";
H_Inicio = datenum('00:00');
H_Fim = datenum('23:59');
figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
stairs(hs,CEt_f4,'r','LineWidth',2)
hold on
stairs(hs,CEt_f4_AG,'b','LineWidth',2)
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')
ax = gca;
ax.XTick = hs;
datetick('x','HH:MM','kepticks');
axis ([H_Inicio H_Fim 0 limf4]);
grid off;
box off;
xlabel('Tempo[Horas]');
ylabel('Potência[kWatt]');
title(Titulo);
case 5
%Comparação 501-1000kWh
CEt_f5=Pt5;
CEt_f5(1,25)=0;
CEt_f5_AG=Pt5_AG;
CEt_f5_AG(1,25)=0;
limf5=max(CEt_f5_AG)*1.2;
Titulo= "Comparação 501-1000kWh";
H_Inicio = datenum('00:00');

```

```

H_Fim = datenum('23:59');
figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
stairs(hs,CET_f5,'r','LineWidth',2)
hold on
stairs(hs,CET_f5_AG,'b','LineWidth',2)
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')
ax = gca;
ax.XTick = hs;
datetick('x','HH:MM','keepticks');
axis ([H_Inicio H_Fim 0 limf5]);
grid off;
box off;
xlabel('Tempo[Horas]');
ylabel('Potência[kWatt]');
title(Titulo);
case 6
%Comparação geral
Titulo= "Comparação consumo total";
H_Inicio = datenum('00:00');
H_Fim = datenum('23:59');
figure('units','normalized','outerposition',[0 0 1 1])
stairs(hs,total_consumidores,'r','LineWidth',2)
hold on
stairs(hs,CET,'b','LineWidth',2)
set(gca,'FontSize',10,'FontName','Arial')
ax = gca;
ax.XTick = hs;
datetick('x','HH:MM','keepticks');
axis ([H_Inicio H_Fim 0 400]);
grid off;
box off;
xlabel('Tempo[Horas]');
ylabel('Potência[kWatt]');
title(Titulo);
end

```

### Menu interativo:

```

% Trabalho de conclusão de curso
% Gerenciamento de Resposta a Demanda Utilizando Algoritmo Genético
% Jonas Eduardo Rooks

%Tela inicial
clc;
disp('          Algoritmo gerenciador de resposta a demanda');
disp('          1-Carregar arquivos e gerar gráficos');
disp('          2-Utilizar dados salvos');
opEntrada=input('          ');

switch opEntrada
    case 1
        disp('          1-Utilizar diretório salvo');
        disp('          D:\Documents\Faculdade\2019-2\TCC
2\Consumidores.xlsx');
        disp('          Pressione qualquer tecla para entrar com outro
diretório');
        op=input('          ');
        if (op==1)
            dir='D:\Documents\Faculdade\2019-2\TCC 2\Consumidores.xlsx';
        else

```

```

                dir=input('                Entre com o diretório do arquivo de
dados: ','s');
    end
    disp('                Carregando...');
    Load_data
    disp(' ');
    disp('                Tarifação de energia');
    disp('                1-Tarifação dinâmica');
    disp('                2-Tarifa branca');
    tipo_tarifa=input('                ');
    switch tipo_tarifa
        case 1
            disp('                1-Utilizar tarifas salvas');
            disp('                Tarifa média: R$ 0.60');
            disp('                Tarifa mínima: R$ 0.30');
            disp('                Tarifa máxima: R$ 1.20');
            disp('                Tarifa convencional: R$ 0.60');
            disp('                Pressione qualquer tecla para entrar com
outros valores');
            op=input('                ');
            if(op==1)
                Tmed=0.6;
                Tmin=0.3;
                Tmax=1.2;
                Tconv=0.6;
            else
                Tmed=input('                Valor da Tarifa média:');
                Tmin=input('                Valor da Tarifa mínima:');
                Tmax=input('                Valor da Tarifa máxima:');
                Tconv=input('                Valor da Tarifa
convencional:');
            end
            Custos
            Custos_por_faixa
        case 2
            disp('                1-Utilizar tarifas salvas (RGE Sul)');
            disp('                Tarifa ponta: R$ 0.958');
            disp('                Tarifa intermediária: R$ 0.618');
            disp('                Tarifa fora ponta: R$ 0.448');
            disp('                Tarifa convencional: R$ 0.547');
            disp('                Pressione qualquer tecla para entrar com
outros valores');
            op=input('                ');
            if(op==1)
                Tp=0.958;
                Tint=0.618;
                Tfp=0.448;
                Tconv=0.547;
            else
                Tp=input('                Valor da Tarifa ponta:');
                Tint=input('                Valor da intermediári:');
                Tfp=input('                Valor da fora ponta:');
                Tconv=input('                Valor da Tarifa
convencional:');
            end
            Custos
            Custos_por_faixa
    end
    disp('                Rodar Algoritmo Genético:');
    disp('                Pressione 1 para confirmar ou qualquer tecla para
sair');

```

```

    opag=input(' ');
    switch opag
        case 1
            AG_p_carga
            executar=1;
        otherwise
            executar=0;
    end
case 2
    disp('          1-Dados de entrada');
    disp('          2-Dados AG');
    opag=input(' ');
    switch opag
        case 1
            load 'Dados_custos.mat'
            disp('          Rodar Algoritmo Genético:');
            disp('          Pressione 1 para confirmar ou qualquer
tecla para sair');
            opag=input(' ');
            switch opag
                case 1
                    AG_p_carga
                    executar=1;
                otherwise
                    executar=0;
            end
        case 2
            load 'resultado_ag.mat'
            executar=1;
        otherwise
            fprintf('\n          Opção inválida, reinicie o algoritmo.\n ')
            executar=0;
    end

otherwise
    fprintf('\n          Opção inválida, reinicie o algoritmo.\n ')
    executar=0;
end
while(executar==1)
    disp(' ');
    disp('          Resultados:');
    disp('          1-Comparar custos');
    disp('          2-Gerar gráficos');
    disp('          3-Sair');
    opr=input(' ');
    switch opr
        case 1
            disp('          1-Por faixa de consumo');
            disp('          2-Geral');
            opc=input(' ');
            switch opc
                case 1
                    disp('          1. 101-200kWh');
                    disp('          2. 201-300kWh');
                    disp('          3. 301-400kWh');
                    disp('          4. 401-500kWh');
                    disp('          5. 501-1000kWh');
                    f=input(' ');
                    Comp_por_faixa
                    disp(' ');
                    disp(' ');

```

```

        sair=input('          Para sair pressione 1 ou
pressione qualquer tecla para continuar: ');
    case 2
        Resultado_geral
        disp('');
        disp('');
        sair=input('          Para sair pressione 1 ou
pressione qualquer tecla para continuar: ');
    end
case 2
    disp('          1-Geral');
    disp('          2-Por faixa de consumo');
    disp('          3-Por cliente');
    opg=input('          ');
    switch opg
    case 1
        f=6;
        Gera_graf_faixa
        disp('');
        disp('');
        sair=input('          Para sair pressione 1 ou
pressione qualquer tecla para continuar');
    case 2
        disp('          1. 101-200kWh');
        disp('          2. 201-300kWh');
        disp('          3. 301-400kWh');
        disp('          4. 401-500kWh');
        disp('          5. 501-1000kWh');
        f=input('          ');
        Gera_graf_faixa
        disp('');
        disp('');
        sair=input('          Para sair pressione 1 ou
pressione qualquer tecla para continuar');
    case 3
        ID=input('          Entre com a ID do cliente: ');
        if(ID>1)&&(ID<=N_cons)
            disp('          1-Antes AG');
            disp('          2-Com AG');
            disp('          3-Comparação de ambos');
            c=input('          ');
            if(c<=0)&&(c>3)
                fprintf('\n          Opção inválida, reinicie o
algoritmo.\n ')
                sair=1;
            else
                Gera_graf_cons
                disp('');
                disp('');
                sair=input('          Para sair pressione 1 ou
pressione qualquer tecla para continuar');
            end
        else
            fprintf('\n          Opção inválida, reinicie o
algoritmo.\n ')
            sair=1;
        end
    end
case 3
    sair=1;
otherwise

```

```
        sair=0;
    end
    if(sair==1)
        executar=0;
        clc
    else
        executar=1;
        clc
    end
end
```

## ANEXO A – TABELAS COM AS POTÊNCIAS DOS PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS ELETRODOMÉSTICOS E AR CONDICIONADOS

Potência média de aparelhos eletrodomésticos

Aparelho		Potência (W)
Aparelho de som		200
Aquecedor de ambiente		1.500
Aspirador de pó		1.000
Aquecedor central de água		5.000
Balcão frigorífico		900
Batedeira		450
Boiler 40 litros		900
Boiler 80 litros		1.200
Cafeteira		300
Computador		350
Chuveiro elétrico com controle eletrônico		7.500
Chuveiro elétrico		5.500
Enceradeira		350
Exaustor		300
Ferro elétrico	Convencional	750
	À vapor	1.500
Forno elétrico		2.400
Forno de micro-ondas		1.300
Freezer acima de 200 litros		150
Freezer até 200 litros		120
Freezer balcão		140
Fritadeira		1.200
Grill		1.200
Impressora jato de tinta		50
Impressora laser		400
Liquidificador		400
Máquina de lavar louça		2.700
Máquina de lavar roupa		1.500
Motor ½ cv		368
Motor 1cv		736
Motor 3cv		2.208
Motor 4cv		2.944
Motor 5cv		3.680
Motor 7,5cv		5.520
Refrigerador	Uma porta	200
	Duplex ou freezer	350
Secador de cabelo		1.300
Secadora de roupa		3.500
Televisor		200
Torneira elétrica		5.500
Ventilador		100

Fonte: FECOERGS (2019)

## Potência média de condicionadores de ar

Capacidade	Potência		Corrente	Tensão
	Btu/h	W	VA	
7.000	639	687	3,1	220
9.000	890	957	4,3	220
12.000	1.185	1.274	5,8	220
18.000	1.670	1.796	8,2	220
24.000	2.190	2.355	10,7	220
30.000	3.080	3.312	15,1	220
36.000	3.720	4.000	18,2	220
48.000	4.680	5.032	7,6	380
60.000	6.762	7.271	11,0	380

Fonte: FECOERGS (2019)

## ANEXO B – TABELAS COM AS POTÊNCIAS DOS BOILERS DA MARCA BROILO®

### Informações técnicas dos acumuladores da marca Broilo

AQUECEDOR SOLAR (BOILER)													
		Unidade	80	100	150	200	300	400	500	600	800*		
Conexões (ponteiras)	Conexões A.Quente/A.Fria (2X)	pol.	1"	1"	1"	1"	1"	1"	1.1/4"	1.1/4"	1.1/4"	1.1/4"	
	Dreno	pol.	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	3/4"	
	Serpentina (2X)	pol.	1"	1"	1"	1"	1"	1"	1.1/4"	1.1/4"	1.1/4"	1.1/4"	
	Solar (2X)	pol.	1"	1"	1"	1"	1"	1"	1.1/4"	1.1/4"	1.1/4"	1.1/4"	
Dimensões (mm)	Comprimento externo (Horizontal) ou altura (Vertical)	mm	900	1100	1600	1280	1580	900	1200	1600	1880	2180	2700
	Diâmetro externo	mm	430	430	430	480	480	680	680	680	680	680	680
Peso (vazio)		kg	26	28	36	37	42	43	54	66	62	75	103
Potência da serpentina		kca/h	3.200	6.000	10.000	10.000	10.000	10.000	13.000	17.500	20.000	25.000	25.000
Apoio elétrico		Watts	1.500	1.500	1.500	1.500	2.000	2.000	2.500	3.000	3.000	3.000	5.000
Produção contínua de água		l/h	128	240	400	400	400	400	520	700	800	1.000	1.000
** Produção com pico de consumo em 1 hora		litros	272	420	670	670	760	760	1.060	1.420	1.700	2.080	2.440
Produção contínua apenas com apoio elétrico		l/h	52	52	52	52	69	69	86	103	103	103	172
Dados:													
Temperatura de entrada de água:			15 °C										
Temperatura de água de banho:			40 °C										
Temperatura de acúmulo:			60 °C										
Diferencial de Temperatura (ΔT)			25 °C										

\*O boiler de 800 litros está disponível apenas na versão horizontal.  
\*\* A produção de água de consumo (capacidade[litros] x potência[kca/h]) se refere a um pico e consumo com duração de 1 hora. Ou seja, é a capacidade de produção em 1 hora somada à energia já acumulada.

Fonte: Broilo (2019)