

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

THALES AUGUSTO NOAL

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA A GESTÃO
ENERGÉTICA DE CONSUMIDORES DO GRUPO A**

PATO BRANCO

2022

THALES AUGUSTO NOAL

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA A GESTÃO
ENERGÉTICA DE CONSUMIDORES DO GRUPO A**

**Development of a computational energy management tool for group A
consumers**

Trabalho de conclusão de curso de graduação
apresentada como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Orientador(a): Géremi Gilson Dranka.

PATO BRANCO

2022



Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

THALES AUGUSTO NOAL

**DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA PARA A GESTÃO ENERGÉTICA DE
CONSUMIDORES DO GRUPO A**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Elétrica da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 29 de novembro de 2022

Géremi Gilson Dranka
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Marcelo Gonçalves Trentin
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Ósis Eduardo Silva Leal
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PATO BRANCO

2022

Dedico este trabalho a minha família e meus amigos
por sempre estarem ao meu lado em momentos
difíceis ao longo de todo o período de graduação.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a todos meus colegas que estiveram comigo nessa caminhada para a formação, não apenas pertencentes ao meu curso, mas também a todos que de alguma forma agregaram para meu crescimento acadêmico, profissional e, acima de tudo, pessoal, em especial para meus amigos que estiveram sempre ao meu lado dividindo momentos bons e ruins, Julio, Henrique e Rafael.

Agradecer a meu orientador Géremi Gilson Dranka pelo auxílio e tempo disponibilizado para o desenvolvimento deste trabalho, certamente o mesmo não seria possível sem suas orientações e correções.

À minha família como um todo, que sempre me deu o suporte necessário permitindo com que eu continuasse meus estudos durante todo o período da graduação, em especial para minha avó Marilene e minha mãe Adriane por sempre me ajudarem em meus momentos mais difíceis.

Tática é saber o que fazer quando há algo a fazer,
estratégia é saber o que fazer quando não há
nada para fazer.
(TARTAKOWER; SAVIELLY).

RESUMO

Nos dias atuais, as empresas estão sempre buscando se tornar mais competitivas no mercado, sendo que qualquer economia no custo final dos produtos ou serviços pode tornar a empresa mais competitiva. Existem muitos meios para redução de custos no ambiente empresarial e questões relacionadas à gestão energética, e em particular, a escolha da demanda contratada e modalidade tarifária são considerados importantes nesse processo, sobretudo para consumidores enquadrados no Grupo A (alta tensão). O objetivo principal deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma ferramenta computacional de gestão energética para indicar a opção tarifária mais viável e para o cálculo da demanda contratada adequada para Unidades Consumidoras (UCs) do Grupo A. Um algoritmo genético foi desenvolvido utilizando a linguagem Python e considerando dados do histórico de faturas da UC. Parte dos resultados obtidos pela ferramenta proposta foram comparados com os resultados apresentados por uma ferramenta similar disponível na literatura considerando dois estudos de caso. A diferença entre as demandas contratadas calculadas por ambas as ferramentas não foi significativa em termos percentuais, validando-se o algoritmo proposto. Os estudos de caso realizados resultaram em uma economia anual estimada de R\$ 775,72 para a UC 1 e uma economia, em três anos, estimada em R\$ 6699,48 para a UC 2, caso as modificações sugeridas tivessem sido implementadas. Como principais contribuições da ferramenta desenvolvida, destacam-se: (i) o cálculo da demanda contratada “ótima”, o termo ótimo neste trabalho se refere a demanda adequada, uma vez que para a realização dos cálculos foi utilizado um algoritmo genético o qual se trata de um método heurístico, sendo assim possui acurácia porém não possui extrema exatidão, assim resultando sempre em um valor próximo ao ótimo real, (ii) a indicação da modalidade tarifária mais adequada e (iii) considera as componentes tarifárias (com e sem imposto) para o período de ponta e fora de ponta, resultando em uma maior precisão com relação à economia prevista para a UC quando comparado com ferramentas similares disponíveis na literatura. Para trabalhos futuros, ressalta-se a possibilidade de levar em consideração um conjunto adicional de variáveis para o cálculo da demanda contratada ‘ótima’, considerando, por exemplo, a inclusão do impacto da implantação de um sistema de geração fotovoltaica junto a unidade consumidora.

Palavras-chave: Mercado de Energia Elétrica Brasileiro; Demanda contratada; Modalidade tarifária; Interface gráfica.

ABSTRACT

Nowadays, companies are always looking to become more competitive in the market, and any savings in the final cost of products or services can make the company more competitive. There are many ways to reduce costs in the business environment and issues related to energy management, and in particular, the choice of contracted demand and tariff modality are considered important in this process, especially for consumers classified in Group A (high voltage). The main objective of this work is to develop a computational energy management tool to indicate the most viable tariff option and to calculate adequate contracted demand for Consumer Units (UCs) of Group A. A genetic algorithm was developed using the Python language and considering UC invoice history data. Part of the results obtained by the proposed tool were compared with the results presented by a similar tool available in the literature considering two case studies. The difference between contracted demands calculated by both tools was not significant in percentage terms, validating the proposed algorithm. The case studies carried out resulted in an estimated annual saving of BRL 775.72 for UC 1 and a three-year saving estimated at BRL 6699.48 for UC 2, if the suggested modifications had been implemented. As main contributions of the tool developed, the following stand out: (i) the calculation of the "optimal" contracted demand, the term optimal in this work refers to adequate demand, since a genetic algorithm was used to carry out the calculations, which is based on it is a heuristic method, so it is accurate but not extremely accurate, thus always resulting in a value close to the real optimum, (ii) the indication of the most appropriate tariff modality and (iii) it considers the tariff components (with and without tax) for the peak and off-peak period, resulting in greater accuracy regarding the predicted savings for the UC when compared to similar tools available in the literature. For future work, the possibility of taking into account an additional set of variables for calculating the 'optimal' contracted demand is highlighted, considering, for example, the inclusion of the impact of the implementation of a photovoltaic generation system at the consumer unit.

Keywords: Brazilian electricity market; Contracted demand; Tariff modality; Graphical user interface.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Demanda instantânea e demanda média	23
Figura 2 – Demanda medida ao longo de um dia (24 h).....	23
Figura 3 – Comparativo de demanda medida, contratada e tolerância	25
Figura 4 – Exemplo de demanda contratada subdimensionada	28
Figura 5 – Exemplo de demanda contratada superdimensionada.....	28
Figura 6 – Lógica de operação para um algoritmo genético	32
Figura 7 – Exemplo de cruzamento entre dois indivíduos	34
Figura 8 – Exemplo de mutação.....	34
Figura 9 – Exemplo de mínimo global e mínimo local	35
Figura 10 – Enquadramento metodológico.....	36
Figura 11 – Fluxograma geral da ferramenta proposta.....	37
Figura 12 – Tela inicial da interface gráfica	38
Figura 13 – Área para tarifas	39
Figura 14 – Tela para informar tarifas	39
Figura 15 – Área para tarifas pós atualização.....	40
Figura 16 – Área para informar dados do histórico de faturas da UC	41
Figura 17 – Área para informar dados com exemplo de preenchimento genérico	41
Figura 18 – Confirmação para limpar dados de faturas.....	42
Figura 19 – Erro de campos em branco	43
Figura 20 – Área de dados da UC	43
Figura 21 – Destaque da ferramenta referente ao botão calcular	46
Figura 22 – Formato de número a ser utilizado	47
Figura 23 – Erro de formato de número	47
Figura 24 – Mensagem com resultados	48
Figura 25 – Tela gráfica de resultados	48
Figura 26 – Dinâmica para cálculo da demanda contratada ‘ótima’	50
Figura 27 – Cálculo da demanda ‘ótima’ utilizando o algoritmo genético	51
Figura 28 – Ferramenta com dados para a UC 1	54
Figura 29 – Tela gráfica de resultados para a UC 1.....	55
Figura 30 – Análise para a UC 1 com crescimento projetado de 5%	56
Figura 31 – Tela gráfica dos resultados para a UC 2 (Período 1: jan/13 – dez/13)	57
Figura 32 – Tela gráfica dos resultados para a UC 2 (Período 2: jan/14 – dez/14)	58
Figura 33 – Tela gráfica dos resultados para a UC 2 (Período 3: jan/15 – dez/15)	59
Figura 34 – Resultados para a UC 1 utilizando o MACDE.....	59
Figura 35 – Resultados para a UC 2 utilizando MACDE (jan/13 – dez/13)	60
Figura 36 – Resultados para a UC 2 utilizando MACDE (jan/14 – dez/14)	60
Figura 37 – Resultados para a UC 2 utilizando o MACDE (jan/15 – dez/15)	61
Figura 38 – Comparativo gráfico entre as demandas para o estudo de caso 2.62	

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	Objetivo geral.....	15
1.2	Objetivos específicos.....	15
1.3	Estrutura do trabalho	16
2	REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1	Ambientes de contratação de energia	17
2.2	Classificação de consumidores e suas características	18
2.3	Modalidades tarifárias.....	19
2.4	Gestão energética de consumidores do Grupo A	21
2.4.1	Consumo e Demanda.....	21
2.4.2	Faturamento do consumo	22
2.4.3	Faturamento da demanda	22
<u>2.4.3.1</u>	<u>Demanda medida</u>	<u>23</u>
<u>2.4.3.2</u>	<u>Demanda contratada</u>	<u>24</u>
<u>2.4.3.3</u>	<u>Demanda de ultrapassagem</u>	<u>24</u>
<u>2.4.3.4</u>	<u>Demanda faturada.....</u>	<u>25</u>
2.4.4	Tarifa de consumidores do grupo A.....	26
2.4.5	Desvantagens da demanda contratada desajustada.....	27
2.5	Revisão de modelos para o cálculo da demanda contratada.....	29
2.6	Algoritmos Genéticos	31
3	DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA PARA GESTÃO ENERGÉTICA	36
3.1	Estrutura metodológica e fluxograma proposto.....	36
3.2	<i>Front-End</i>	38
3.2.1	Tarifas em vigor da unidade consumidora.....	39
3.2.2	Histórico de faturas da unidade consumidora	40
3.2.3	Preenchimento de dados da unidade consumidora.....	43
<u>3.2.3.1</u>	<u>Crescimento percentual.....</u>	<u>43</u>
3.2.4	Restrições <i>Front-End</i>	45
<u>3.2.4.1</u>	<u>Dados mínimos para inicialização do algoritmo</u>	<u>45</u>
<u>3.2.4.2</u>	<u>Formato de número</u>	<u>46</u>
3.2.5	Tela de resultados	47
3.3	<i>Back-End</i>	48

3.3.1	Cálculo dos fatores de carga	49
3.3.2	Demanda contratada e modalidade tarifária sugeridas	49
<u>3.3.2.1</u>	<u>Cálculo da demanda contratada sugerida</u>	<u>49</u>
<u>3.3.2.2</u>	<u>Algoritmo genético para cálculo da demanda contratada 'ótima'</u>	<u>50</u>
<u>3.3.2.3</u>	<u>Avaliação da modalidade tarifária adequada.....</u>	<u>52</u>
3.3.3	Cálculo de economia estimada.....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	53
4.1	Indústria do ramo madeireiro (UC 1)	53
4.2	UTFPR – UC 2	56
4.3	Discussão dos Resultados	59
4.3.1	Comparativo para a UC 1	59
4.3.2	Comparativo para a UC 2	60
4.3.3	Comparativo geral	61
5	CONCLUSÕES	65
5.1	Sugestões de Trabalhos Futuros	67
	REFERÊNCIAS.....	69
	APÊNDICE A	71

1 INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) brasileiro tem apresentado aumentos constantes de consumo e demanda ao longo dos últimos anos. A 1º Revisão Quadrimestral das Projeções da demanda de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional 2022-2026, realizado pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), em conjunto com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), projetou um aumento do consumo de energia elétrica do SIN de 3,1% anual entre 2022-2026, totalizando aproximadamente 578.698 gigawatt-hora (GWh) em 2026. A classe industrial representa aproximadamente 36% do aumento previsto, seguida pela classe residencial com 29,7%, comercial com 17,7% e o restante pertencente a outras classes. A projeção de demanda máxima instantânea, por sua vez, é projetada para aumentar de 91.756 megawatts (MW) em 2022 para 105.834 MW em 2026, um aumento de aproximadamente 15,34% (EPE; ONS; CCEE, 2022).

O aumento previsto tanto para o consumo quanto para a demanda máxima instantânea, acarreta na necessidade de um bom planejamento do SIN, com o intuito de mantê-lo em operação contínua e dentro de limites de qualidade, conforme evidenciado no Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) e no Plano de Expansão da Transmissão (PET), ambos realizados pela EPE (EPE, 2022). Acontecimentos no Brasil envolvendo o SIN ao longo da história, como os apagões de 1985, 1999, 2001 e o mais recente em 2020 (o qual ocorreu no Amapá, deixando a população do estado em situação de *blackout* total e/ou racionamento de energia, por 22 dias), enfatizam a necessidade de um bom gerenciamento e planejamento do SIN.

Um planejamento adequado do SIN interfere diretamente na fatura mensal de energia dos consumidores, principalmente em épocas de estiagem, em que se faz necessário gerar energia através de fontes mais onerosas, sobretudo as termelétricas, resultando em um aumento da fatura, fato que se relaciona com a bandeira tarifária em vigor. De acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), existem quatro bandeiras tarifárias, sendo elas: bandeira verde, amarela, vermelha – patamar 1 e vermelha – patamar 2. A bandeira verde é detentora dos valores de tarifas considerados “normais”, ou seja, não existe nenhum acréscimo em seu valor. A partir da bandeira verde, as tarifas sofrem um acréscimo em seu valor, sendo a bandeira

vermelha – patamar 2, detentora dos maiores acréscimos para as tarifas de energia elétrica. Com o sistema de bandeiras tarifárias, o consumidor tem a capacidade de reavaliar seus hábitos de consumo, a fim de reduzir o consumo e/ou demanda e, conseqüentemente, reduzir a fatura de eletricidade bem como contribuir com a operação econômica do SIN (ANEEL, 2022).

De acordo com a Resolução Normativa Nº 414 (2010), da ANEEL e do MME, os consumidores do SIN podem ser divididos em dois grupos principais, sendo eles Grupo A e Grupo B, cada um contendo seus subgrupos. O Grupo A é composto por consumidores com tensão de fornecimento igual ou superior a 2,3 kV ou com fornecimento através de sistemas subterrâneos de distribuição, caracterizados pela tarifa binômia (consumo e demanda). Desse modo, para consumidores do Grupo A, a fatura de energia elétrica não é apenas composta pelo consumo de energia elétrica (kWh), mas também pela demanda contratada (kW). O Grupo B é composto por consumidores com tensão de fornecimento inferior a 2,3 kV e caracterizados pela tarifa monômia, ou seja, a fatura considera apenas o consumo de energia elétrica (MME; ANEEL, 2021).

A redução do valor da fatura de eletricidade é de interesse para todos os consumidores pertencentes ao Grupo A ou Grupo B. Todavia, para consumidores industriais enquadrados no Grupo A, uma gestão energética adequada pode ter um impacto ainda mais significativo em termos de competitividade e crescimento, tendo em vista que o custo de seu produto e/ou serviço final é diretamente impactado pelo custo de energia necessária para produzir e/ou realizar os mesmos. Quando comparado com os consumidores do Grupo B, a gestão energética de consumidores do Grupo A possui um maior grau de complexidade, principalmente em decorrência da tarifa binômia. Atualmente, já existem ferramentas para auxiliar os consumidores no sentido de se ter uma gestão energética adequada. Como exemplo, pode-se citar a norma ISO 50001, que visa auxiliar as organizações a estruturarem uma gestão energética compatível com sua realidade através de requisitos mínimos e específicos que garantam a melhoria contínua do desempenho energético da organização, e conseqüentemente, tornar a empresa mais competitiva no mercado (FOSSA; SGARBI, 2018)(MME, 2021).

Nesse sentido, a escolha adequada da (i) opção tarifária e (ii) da demanda contratada é de grande importância para a gestão energética de Unidades Consumidoras (UCs) do Grupo A. Caso a demanda contratada esteja acima do valor

ótimo necessário para o atendimento da carga da unidade consumidora, esta deverá pagar integralmente pela demanda contratada, mesmo não utilizando-a. É importante mencionar que, muitas vezes, o fato do consumidor 'nunca' pagar por ultrapassagem ou utilizar integralmente o valor de sua demanda contratada, pode gerar a falsa sensação de que o valor da demanda contratada está adequado, quando na prática, o valor de demanda contratada poderia ser inferior, gerando uma economia financeira em sua fatura. Por outro lado, caso a demanda contratada esteja abaixo ou no limite do valor adequado para a necessidade do consumidor, o mesmo pode estar frequentemente pagando cobranças por ultrapassagem da tolerância da demanda contratada, e, portanto, acarretando prejuízos financeiros desnecessários.

A escolha de um valor adequado para a demanda contratada não é apenas benéfica financeiramente para o consumidor, mas também traz benefícios para as distribuidoras de energia elétrica. É comum as UCs contratarem um valor de demanda acima do valor necessário para evitarem ultrapassagens. Entretanto, esse valor extra pode acabar por acarretar em uma análise distorcida do sistema, como exemplo, em uma área industrial, caso muitos consumidores estejam com a demanda contratada acima do valor adequado, isso pode induzir a distribuidora a efetuar reforços na rede de alimentação desta área, que poderia ser evitado caso os consumidores não possuíssem uma demanda contratada em excesso.

Outro fator importante relacionado à demanda contratada, refere-se ao fato de que a alteração do valor contratado possui prazos definidos pela ANEEL. De modo geral, para a solicitação de aumento da demanda contratada, a distribuidora de energia tem um período de 30 dias para efetuar a alteração. Por outro lado, para uma solicitação de redução, a distribuidora de energia possui um período de 180 dias para efetuar a mudança, com exceção dos consumidores do subgrupo A4, na qual este prazo é de 90 dias. O número de reduções em que um consumidor pode solicitar está limitado a uma redução apenas no período de 12 meses (MME; ANEEL, 2021). Com base no contexto supracitado, para uma gestão energética de qualidade dos consumidores do Grupo A, faz-se necessário a contratação de uma demanda 'ótima'. Entretanto, a questão emergente nesse contexto é: **Como realizar o cálculo 'ótimo' da demanda contratada e a opção pela modalidade tarifária mais adequada de uma unidade consumidora do Grupo A?** A resposta para essa pergunta traz consigo um conjunto de complexidades, sobretudo relacionadas à variabilidade, no tempo, da curva de carga futura de cada unidade consumidora. Somado a isso existe,

para alguns consumidores do Grupo A, a opção de diferentes modalidades tarifárias, e que caso não esteja adequada com o perfil de consumo e demanda do consumidor, pode interferir negativamente no valor de sua fatura de energia elétrica.

Nesse sentido, o objetivo principal deste trabalho consiste em desenvolver uma metodologia de análise para indicar a opção tarifária mais viável e para o cálculo da demanda contratada adequada para consumidores do Grupo Tarifário A, com o intuito de verificar se os valores atuais estão adequados e, caso contrário, sugerir novos valores e, com isso, promover a redução de custos da fatura de energia elétrica das UCs. A metodologia proposta resultou em uma ferramenta com interface gráfica para a realização dos cálculos e apresentação dos resultados. Dois estudos de caso serão conduzidos, utilizando a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Pato Branco (UTFPR-PB), e uma indústria do ramo madeireiro do sudoeste do Paraná, como exemplo.

1.1 Objetivo geral

Desenvolver uma metodologia de análise e uma ferramenta para a indicação da opção tarifária mais adequada e para o cálculo da demanda contratada adequada para consumidores do Grupo Tarifário A.

1.2 Objetivos específicos

- Realizar um levantamento das legislações em vigor no mercado de energia elétrica brasileiro para consumidores do Grupo A.
- Desenvolver um algoritmo genético (em linguagem Python) utilizando o histórico de faturas da UC para a indicação da modalidade tarifária e para o cálculo da demanda contratada 'mais adequada' de consumidores do Grupo Tarifário A.
- Desenvolver uma ferramenta para apresentação dos resultados (demanda contratada sugerida, modalidade tarifária sugerida, estimativa de economia anual e fator de carga em cada posto tarifário), resultando em uma ferramenta de gestão energética.
- Aplicar a metodologia proposta em dois estudos de caso para avaliar a ferramenta proposta.

- Comparar os resultados obtidos com outra ferramenta disponível na literatura.

1.3 Estrutura do trabalho

Após introduzir a temática dessa pesquisa neste primeiro capítulo, realiza-se uma revisão de literatura no Capítulo 2, em que será apresentado um resumo sobre os ambientes de contratação existentes no SIN (Seção 2.1), e demais conceitos fundamentais relacionados as modalidade tarifárias, em especial para consumidores do Grupo A (Seções 2.2 e 2.3), juntamente com a explicação de conceitos importantes para a continuidade do trabalho (Seção 2.4). Também será abordado a respeito de trabalhos já existentes que tiveram um objetivo semelhante ao proposto nesse trabalho (Seção 2.5), bem como indicar quais os prejuízos financeiros para as unidades consumidoras resultantes por não ter uma demanda contratada adequada.

Na sequência, no Capítulo 3, se dará início a explicação do desenvolvimento da ferramenta proposta neste trabalho, a qual será desmembrada em duas partes distintas, sendo elas, *Back-end*, que relacionado ao algoritmo responsável pelo cálculo da melhor modalidade tarifária e demanda contratada 'ótima', e *Front-end*, relacionado com a interface gráfica proposta na qual o usuário poderá inserir os dados necessários para realizar os cálculos bem como visualizar os resultados, ambas serão abordadas nas Seções 3.3 e 3.2 respectivamente. Ainda, na seção 3.1 será apresentado um fluxograma da ferramenta proposta.

Posteriormente, no Capítulo 4, a ferramenta proposta será testada utilizando dois estudos de caso. Além disso, com o objetivo de validar a ferramenta desenvolvida neste trabalho, os resultados obtidos serão comparados com uma ferramenta paralela já existente (Seção 4.3), evidenciando os possíveis motivos de divergências e vantagens/desvantagens da ferramenta desenvolvida neste trabalho.

Por fim, no Capítulo 5, as conclusões provenientes dessa pesquisa serão destacadas, incluindo possíveis sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo, serão apresentados os conceitos fundamentais relacionados ao tema de pesquisa. Inicialmente, uma contextualização será realizada referente aos ambientes de contratação existentes para os consumidores do Grupo A. Na sequência, apresenta-se as estruturas tarifárias existentes no SIN, explicando brevemente a estrutura do Grupo B e mais detalhadamente a estrutura do Grupo A, tendo em vista que este trabalho tem como enfoque os consumidores deste último grupo. Portanto, serão detalhadas as modalidades tarifárias existentes para os consumidores do Grupo A, bem como os critérios necessários para optar por cada modalidade. Por fim, será detalhado o procedimento de medição e faturação das grandezas elétricas de consumidores do Grupo A, a importância da escolha da modalidade tarifária compatível com o perfil do consumidor e finalizando com exemplos práticos dos impactos de se ter uma demanda contratada desajustada.

2.1 Ambientes de contratação de energia

De acordo com o Decreto Nº 5.163 de 2004, para os consumidores do Grupo A (tensão de fornecimento igual ou superior a 2,3 kV) existem dois ambientes de contratação possíveis, sendo eles o Ambiente de Contratação Livre (ACL) e o Ambiente de Contratação Regulado (ACR) (CASA CIVIL, 2004). A Portaria Nº 465 de 2019 do Ministério de Minas e Energia (MME) estabelece como sendo consumidor “livre”, os consumidores com carga igual ou superior a 1.000 kW e atendidos em qualquer tensão, os quais podem optar pelo ACL, bem como adquirir energia elétrica de qualquer concessionária, permissionário ou autorizado de energia elétrica do SIN (MME, 2019). Os consumidores com carga inferior a 1.000 kW e superior a 500 kW são denominados consumidores “especiais”. Estes, por sua vez, também podem optar pelo ACL, porém necessitam realizar a compra de energia apenas de fontes específicas, sendo elas, pequenas centrais hidrelétricas, solar fotovoltaica, eólica e biomassa. De acordo com a Lei Nº 9.427 de 1996, para consumidores com a carga inferior a 500 kW, é permitido a união de dois ou mais consumidores, que somados possuem uma carga igual ou superior a 500 kW para assim poderem, em conjunto, optarem pelo ACL (CASA CIVIL, 1996).

O ACL é caracterizado pela comercialização de energia via contratos bilaterais, ou seja, o consumidor que optar por este tipo de contratação terá um

contrato de compra de energia e, juntamente, existirá um contrato pelo uso da rede de transmissão.

Em contrapartida, ao mesmo tempo que existem “pré-requisitos” para os consumidores do Grupo A realizarem a migração para o ACL, estes têm a opção de permanecer no mercado regulado (ACR), sendo a demanda contratada mínima de 30 kW. Portanto, os consumidores optantes pelo ACR são denominados de consumidores “cativos”. No caso do ACR, os consumidores devem, obrigatoriamente, adquirir a energia elétrica da concessionária detentora da licitação de distribuição da região em que o consumidor se encontra (CASA CIVIL, 2004).

É importante ressaltar a necessidade de contratação de demanda de potência ativa (grandeza explicada mais adiante) para UCs do Grupo A, independente do ambiente de contratação em que o consumidor se encontra (ACL ou ACR). Entretanto, os consumidores do ACL não estão submetidos às modalidades tarifárias. Ressalta-se que o foco da ferramenta proposta neste trabalho tem como alvo principal os consumidores optantes pelo ACR, ou seja, consumidores “cativos”.

2.2 Classificação de consumidores e suas características

Como já citado anteriormente, os consumidores do SIN podem ser divididos em dois grandes grupos (A e B). O Grupo A pode ainda ser subdividido em seis subgrupos, sendo cinco deles relacionados com o nível de tensão de conexão e o sexto para consumidores com fornecimento através de sistemas subterrâneos. Os subgrupos do Grupo A de acordo com sua tensão de conexão são (MME; ANEEL, 2021):

- A1: tensão de conexão maior ou igual a 230 kV;
- A2: tensão de conexão maior ou igual a 88 kV e menor ou igual a 138 kV;
- A3: tensão de conexão igual a 69 kV;
- A3a: tensão de conexão maior ou igual a 30 kV e menor ou igual a 44 kV;
- A4: tensão de conexão maior ou igual a 2,3 kV e menor ou igual a 25 kV;
- AS: tensão de conexão menor que 2,3 kV a partir de sistemas subterrâneos de distribuição.

Os consumidores do Grupo A são caracterizados pela tarifa de energia binômia, ou seja, a tarifa é composta pelo consumo (kWh) e demanda contratada (kW). Sendo assim, se faz necessário a contratação de demanda de potência ativa, denominada de **Demanda Contratada (kW)**, que deve ser continuamente disponibilizada pela distribuidora para o consumidor no ponto de conexão (MME; ANEEL, 2021). O faturamento dos consumidores do Grupo A pode ser realizado de diferentes maneiras de acordo com a modalidade tarifária escolhida pelo consumidor. A explicação a respeito das opções possíveis bem como o faturamento de cada modalidade disponível será realizada na Seção 2.3.

De acordo com AZEVEDO (2019, pg. 7):

“Para os consumidores atendidos em tensão superior a 2,3 kV, pertencentes ao Grupo A, o valor da demanda de potência ativa a ser contratado com a concessionária de distribuição de energia elétrica passa a ser um dos fatores de peso significativo no valor final da fatura mensal.”

Os consumidores do Grupo B também são divididos em subgrupos, porém não relacionados com a tensão de conexão, mas de acordo com a classe do consumidor, sendo:

- B1: residencial;
- B2: comercial;
- B3: demais classes;
- B4: iluminação pública.

Para os consumidores do Grupo B, a tarifa de energia elétrica é monômia, ou seja, a faturação considera apenas o consumo da energia elétrica (kWh). Existem variações de tarifas para os consumidores do Grupo B de acordo com a modalidade tarifária escolhida pelo consumidor, porém, tais aspectos não serão detalhados neste trabalho, tendo em vista que o enfoque aqui são consumidores do Grupo A (MME; ANEEL, 2021).

2.3 Modalidades tarifárias

As UCs do Grupo A podem optar pela “melhor” modalidade tarifária, de acordo com as suas características. Sendo assim, para UCs do Grupo A, existem duas modalidades tarifárias: **Modalidade Tarifária Horária Azul** e **Modalidade Tarifária**

Horária Verde (MME; ANEEL, 2021). A diferença entre as modalidades tarifárias caracteriza-se principalmente por tarifas diferenciadas (ou não) de acordo com o horário de utilização do dia para consumo e demanda de potência ativa. O Quadro 1 apresenta as possíveis modalidades tarifárias para os consumidores do Grupo A de acordo com o subgrupo que pertencem.

Quadro 1 – Modalidades tarifárias para cada subgrupo do grupo A

Subgrupo	Modalidades tarifárias possíveis
A1	Horária azul
A2	
A3	
A3a	Horária azul ou Horária verde
A4	
AS	

Fonte: (MME; ANEEL, 2021)

A diferenciação nos valores das tarifas relaciona-se com o horário do dia, denominados de postos tarifários. A ANEEL estabeleceu três postos tarifários, denominados de posto tarifário ponta, posto tarifário intermediário e posto tarifário fora de ponta. O posto tarifário ponta é um período de três horas consecutivas no dia, a ser definido por cada distribuidora de energia, de acordo com sua curva de carga (sujeito à aprovação da ANEEL). Para os finais de semanas e feriados determinados pela ANEEL, não é aplicado o posto tarifário ponta. O posto tarifário intermediário é o período compreendido entre uma hora anterior e uma hora posterior ao horário de ponta, o mesmo é aplicado exclusivamente para consumidores do Grupo B que optaram pela Tarifa Branca. O posto tarifário fora de ponta é o restante do período fora do posto tarifário de ponta para consumidores do Grupo A e fora do posto tarifário intermediário para consumidores do Grupo B (MME; ANEEL, 2021). O Quadro 2 apresenta as características das modalidades tarifárias possíveis para consumidores do Grupo A, respeitando as possibilidades para cada subgrupo de acordo com o Quadro 1.

Quadro 2 – Características das modalidades tarifárias do Grupo A

Modalidade tarifária	Tarifa	
	Consumo (kWh)	Demanda (kW)
Horária verde	Ponta e fora de ponta	Única
Horária azul	Ponta e fora de ponta	Ponta e fora de ponta

Fonte: (MME; ANEEL, 2021)

2.4 Gestão energética de consumidores do Grupo A

Tendo conhecimento das estruturas tarifárias de ambos os grupos de consumidores do SIN bem como as modalidades tarifárias possíveis para as UCs do Grupo A, é possível observar que a gestão energética para essa classe de consumidores (Grupo A) possui um nível de complexidade maior em relação ao Grupo B, uma vez que a fatura de energia elétrica do Grupo A é composta por um conjunto adicional de fatores (incluindo faturamento por ultrapassagem de demanda, fator de potência abaixo do limite mínimo, entre outros). Além disso, para alguns subgrupos de consumidores do Grupo A, existem diferentes modalidades tarifárias possíveis de serem contratadas (Verde ou Azul), o que torna a análise ainda mais complexa.

Como mencionado, a fatura de energia elétrica das UCs do grupo A é caracterizada pela tarifa binômia, sendo composta tanto pelo consumo quanto pela demanda de potência ativa. Nas próximas subseções, serão abordados conceitos importantes referentes às principais grandezas elétricas que compõem as faturas dos consumidores do Grupo A, bem como exemplos de UCs com uma demanda contratada ‘não ótima’.

2.4.1 Consumo e Demanda

O conceito de ‘demanda’ refere-se à quantidade de potência ativa e reativa em que uma carga (ou conjunto de cargas) consome da rede elétrica em um determinado instante. A ‘demanda’ pode ser representada pela demanda instantânea expressa em quilowatts (kW) e/ou quilo-ampére-reactivo (kVAr). O ‘consumo’ elétrico, por sua vez, representa o tempo em que as cargas ficam ligadas demandando determinada potência. Desse modo, o consumo representa a quantidade de potência

elétrica ativa consumida pelas cargas em um intervalo de tempo, tendo como unidade o quilowatt hora (kWh) (ou seus múltiplos) (ANEEL, 2012).

2.4.2 Faturamento do consumo

Para princípios de faturamento, o consumo tem seu valor faturado considerando o produto da quantidade de energia elétrica ativa consumida pela unidade consumidora e a tarifa em vigor de acordo com o subgrupo em que a mesma pertence. O cálculo que resulta no valor (em R\$) para o faturamento do consumo mensal está expresso na Equação (1).

$$FEA(p) = EEAM(p) \cdot TE(p), \quad (1)$$

em que p representa o posto tarifário (ponta ou fora de ponta), $FEA(p)$ representa o faturamento da energia elétrica no posto tarifário p (R\$), $EEAM(p)$ é a energia elétrica ativa medida (kWh) no posto tarifário p e $TE(p)$ é a tarifa de energia elétrica no posto tarifário p (R\$/kWh). Para consumidores do grupo A, independente do subgrupo em que se enquadram, a parcela referente ao consumo de energia elétrica é subdividida entre o horário de ponta e o horário fora de ponta, de acordo com o Quadro 2. Desse modo, a Equação (2) apresenta a parcela total do consumo para as faturas de consumidores do grupo A.

$$FEA_{total}(P, FP) = FEA(P) + FEA(FP), \quad (2)$$

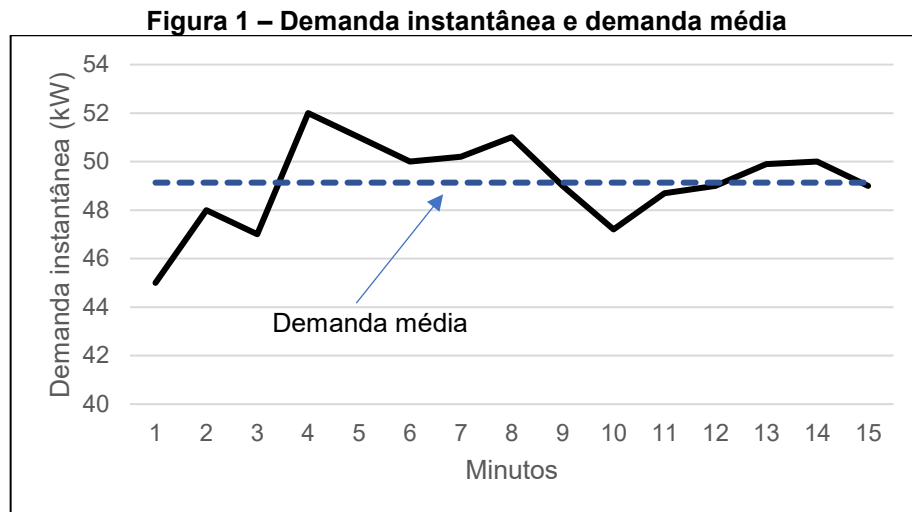
em que $FEA(P)$ e $FEA(FP)$ são, respectivamente, o faturamento de energia elétrica nos horários de ponta e fora de ponta (R\$), e FEA_{total} é o faturamento de energia elétrica total da UC.

2.4.3 Faturamento da demanda

Para o faturamento da demanda, alguns conceitos fundamentais são necessários: **Demanda Medida**, **Demanda Contratada**, **Demanda de Ultrapassagem** e **Demanda Faturada**. Esses conceitos serão explicados nesta seção com o objetivo de compreender o faturamento para a parcela da demanda de UCs do grupo A.

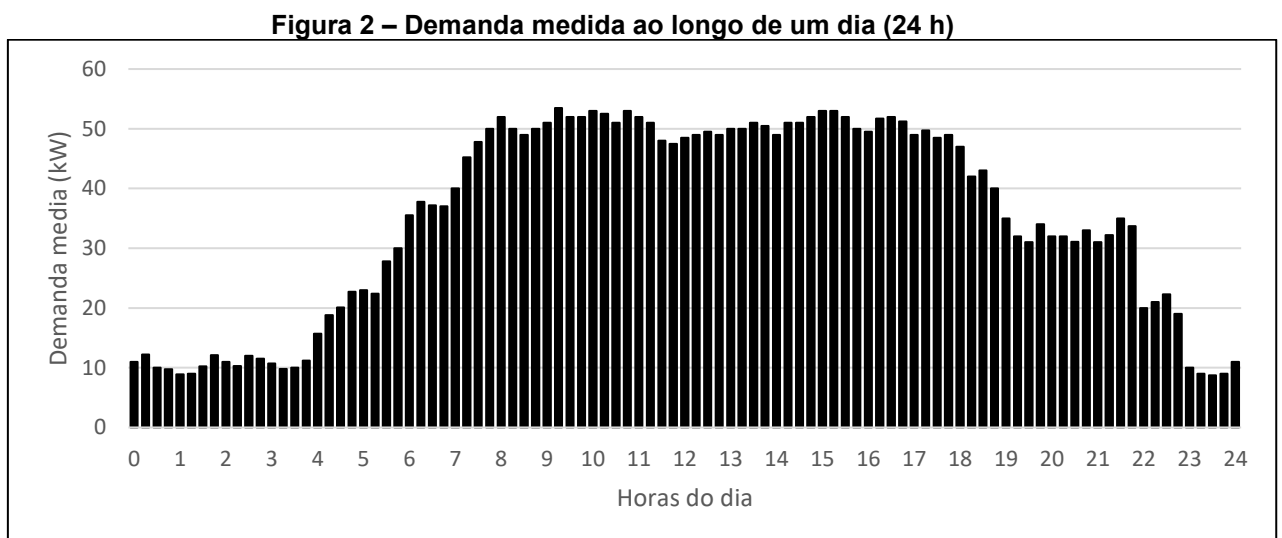
2.4.3.1 Demanda medida

A demanda medida é a demanda média registrada em um período de 15 minutos (MME; ANEEL, 2021). A Figura 1 apresenta um gráfico de demanda hipotético em que a demanda máxima instantânea registrada acontece no minuto 4, com demanda igual a 52 kW.



Fonte: Autoria própria

Este processo se repete ao longo de todo o dia, gerando um total de 4 demandas medidas por hora (um valor a cada 15 minutos), conforme ilustra a Figura 2, que apresenta uma curva hipotética de demanda medida ao longo de 24 horas.



Fonte: Autoria própria

2.4.3.2 Demanda contratada

Para os consumidores do Grupo A, é necessário a contratação de uma demanda (Ponta e/ou Fora de Ponta, dependendo da modalidade tarifária). Assim, de acordo com a modalidade tarifária em que se encaixam (ou que optem), será necessária a contratação de uma demanda independente do horário de uso (caso da modalidade tarifária verde), ou de duas demandas, uma para o horário de ponta e outra para o horário fora de ponta (caso da modalidade tarifária azul).

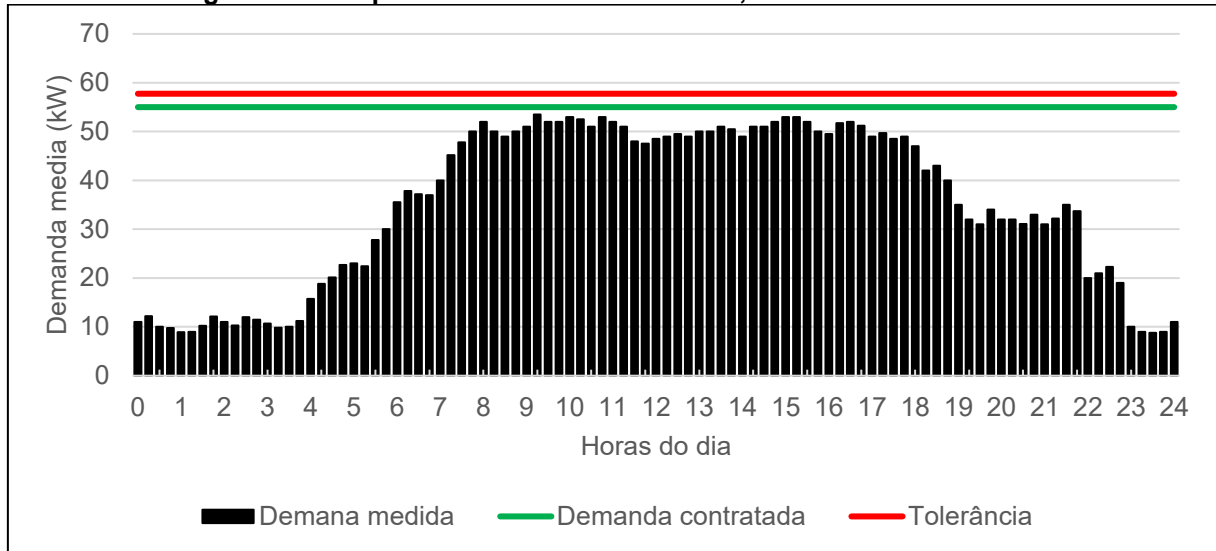
Para consumidores cativos do Grupo A, a contratação de demanda mínima é de 30 kW. Quando é realizada a contratação da demanda, os consumidores tem direito a solicitar a redução da mesma durante um período de teste que pode variar de acordo com o subgrupo em que o consumidor se enquadra, sendo o período de 90 dias para consumidores dos subgrupos AS ou A4 e 180 dias para os demais subgrupos. Após os períodos supracitados de acordo com o subgrupo, os consumidores podem solicitar apenas uma redução da demanda contratada em um período de 12 meses.

Quando se deseja aumentar a demanda contratada, a distribuidora possui um prazo de 15 dias para consumidores com a tensão de conexão inferior a 69 kV e para consumidores com a tensão superior a esse valor, o prazo passa a ser de 30 dias. Caso seja necessário obras na rede de distribuição para adequações ao fornecimento da demanda solicitada (reforços de rede), cabe a distribuidora fornecer o orçamento para o consumidor solicitante pelo aumento.

2.4.3.3 Demanda de ultrapassagem

A demanda de ultrapassagem corresponde à uma tolerância existente de 5% do valor da demanda contratada. Sendo assim, caso a demanda a ser faturada ultrapasse a demanda contratada, mas não ultrapasse a tolerância, o consumidor não será submetido à cobrança por ultrapassagem. Por outro lado, se a demanda a ser faturada exceder a tolerância, o consumidor será submetido a uma cobrança por ultrapassagem proporcional a quantidade ultrapassada em relação a demanda contratada. A Figura 3 apresenta um exemplo hipotético de demandas medidas ao longo de um dia (em intervalos de 15 minutos) bem como a demanda contratada (55 kW) e o limite de tolerância (57,75 kW).

Figura 3 – Comparativo de demanda medida, contratada e tolerância



Fonte: Autoria própria

2.4.3.4 Demanda faturada

A demanda que será utilizada para fins de faturamento será a maior demanda medida ao longo do mês (entre a demanda contratada e a demanda medida). Portanto, em um mês típico de 30 dias, tem-se 2880 medições (intervalos de 15 minutos) e a demanda faturada será correspondente ao maior valor entre essas medições. Entretanto, existem alguns cenários possíveis que variam em função da cobrança (ou não) de impostos dependendo do valor da demanda medida em relação à demanda contratada. Desse modo, existem três possíveis cenários para o faturamento da parcela de demanda dos consumidores do grupo A, apresentados no Quadro 3.

Quadro 3 – Possíveis cenários de faturamento

Casos	Possíveis cenários de faturamento da demanda
Caso 1	Demanda medida < Demanda contratada
Caso 2	Demanda contratada < Demanda medida < Tolerância
Caso 3	Demanda medida > Tolerância

Fonte: (MME; ANEEL, 2021)

- **Caso 1**

Para o faturamento da demanda do caso 1, a parcela de demanda ativa da UC a ser faturada é calculada de acordo com a Equação (3).

$$FDA(p) = DAM(p) \cdot FDCI(p) + (DAC(p) - DAM(p)) \cdot FDSI(p), \quad (3)$$

em que $FDA(p)$ é o faturamento total de demanda de potência ativa (R\$), $DAM(p)$ representa a demanda de potência ativa medida (kW), $DAC(p)$ é a demanda de potência ativa contratada (kW) e $FDCI(p)$ e $FDSI(p)$ representam, respectivamente, as tarifas de demanda com e sem impostos, ambas em R\$/kW.

- **Caso 2**

Para o caso 2 apresentado no Quadro 3, a parcela de demanda ativa da UC a ser faturada é calculada de acordo com a Equação (4).

$$FDA(p) = DAM(p) \cdot FDCI(p). \quad (4)$$

- **Caso 3**

Para o caso 3 apresentado no Quadro 3, a parcela de demanda ativa da UC a ser faturada é calculada de acordo com a Equação (5).

$$FDA(p) = DAM(p) \cdot FDCI(p) + (DAM(p) - DAC(p)) \cdot 2 \cdot FDCI(p). \quad (5)$$

2.4.4 Tarifa de consumidores do grupo A

Para consumidores que se enquadrem ou optem pela modalidade tarifária azul, a parcela de faturamento será composta por um faturamento para o horário de ponta e outro para o horário fora de ponta. O faturamento total para consumidores pertencentes a modalidade tarifária em questão é dado pela Equação (6).

$$FDA_{total} = FDA(FP) + FDA(P), \quad (6)$$

em que FDA_{total} é o faturamento de demanda de potência ativa total (R\$) composto pelo faturamento de demanda de potência ativa no horário fora de ponta - $FDA(FP)$ (R\$) e pelo faturamento de demanda de potência ativa no horário de ponta - $FDA(P)$ (R\$).

Para consumidores que se enquadrem (ou optem) pela modalidade tarifária verde, a demanda medida a ser utilizada para o faturamento, será a maior demanda medida registrada no horário de ponta e horário fora de ponta no período do ciclo de

faturamento. Logo, para consumidores pertencentes a modalidade tarifária verde, o faturamento da parcela da demanda é calculado de acordo com a Equação (7).

$$FDA_{total} = FDA(DAM_{max}), \quad (7)$$

em que $FDA(DAM_{max})$ é o faturamento com a maior demanda medida no período de ciclo de faturamento, independente do horário em que ocorreu (R\$).

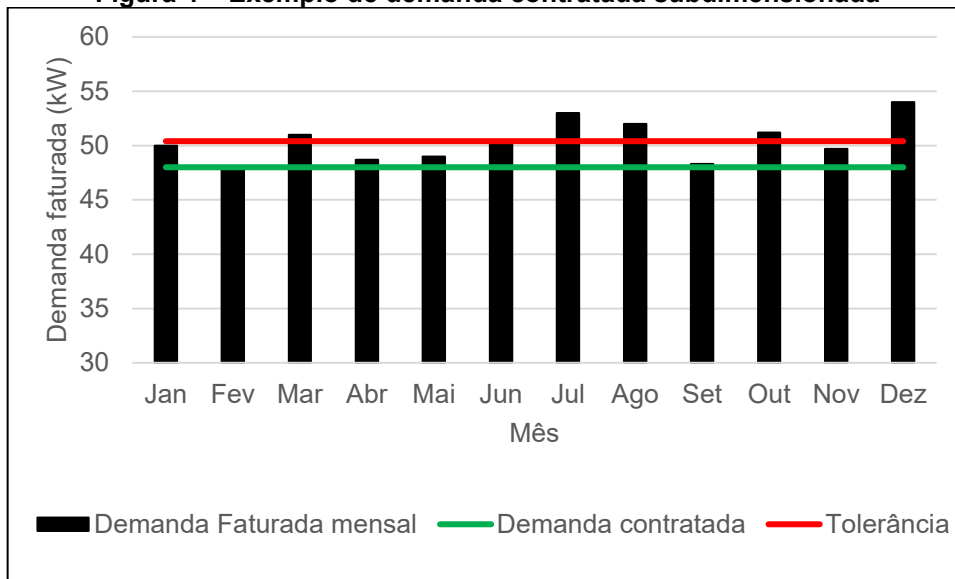
Conforme apresentado na seção anterior, a tarifa final (T_{final}), em R\$, dos consumidores do grupo A é majoritariamente composta por duas parcelas, sendo uma proveniente do consumo de energia elétrica e outra da demanda de potência ativa. Desta maneira, a tarifa final dos consumidores do grupo A é calculada de acordo com a Equação (8).

$$T_{final} = FDA_{total} + FEA_{total}. \quad (8)$$

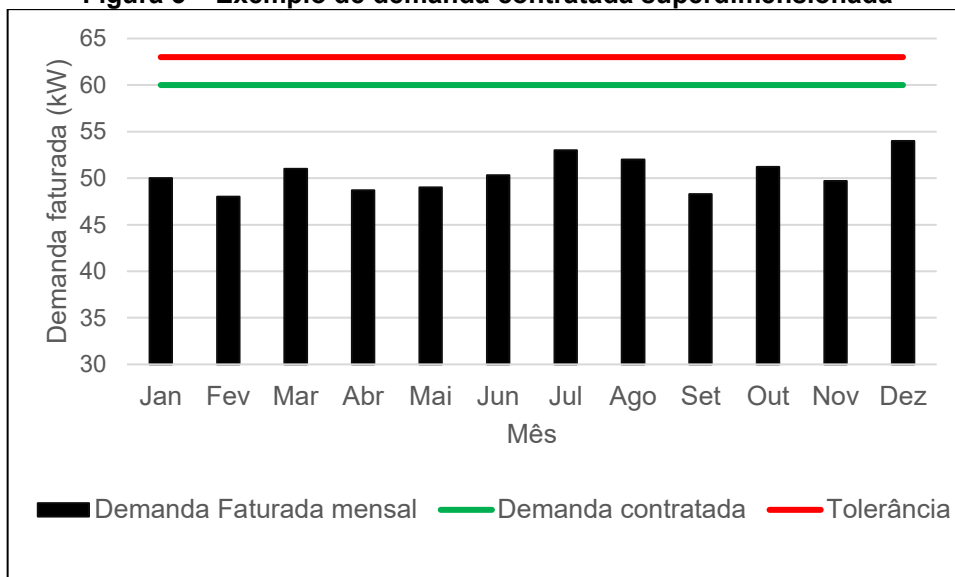
É importante ressaltar que existem outros componentes que compõem a tarifa final, como por exemplo, a tarifa de uso do sistema de distribuição, tarifa por baixo fator de potência, iluminação pública, entre outras. Estes componentes supracitados não serão levados em consideração nos cálculos realizados, uma vez que fogem do escopo do cálculo para demanda contratada e modalidade tarifária, somado a isso, em sua grande maioria possuem um custo constante.

2.4.5 Desvantagens da demanda contratada desajustada

Como já mencionado, o consumidor deve atender alguns pré-requisitos para solicitar a redução da quantidade de demanda contratada. Ainda, a solicitação só é possível de ser realizada uma vez a cada 12 meses, corroborando com a necessidade de se contratar um valor de demanda adequado (“ótimo”). Uma demanda contratada desajustada (“não ótima”) resulta em prejuízos financeiros para o consumidor. Isso vale tanto para uma demanda contratada superdimensionada quanto para uma demanda contratada subdimensionada. A Figura 4 e Figura 5 apresentam um caso hipotético de faturamento ao longo de um ano em que está representada uma demanda contratada subdimensionada e superdimensionada, respectivamente.

Figura 4 – Exemplo de demanda contratada subdimensionada

Fonte: Autoria própria

Figura 5 – Exemplo de demanda contratada superdimensionada

Fonte: Autoria própria

No caso da Figura 4, a demanda contratada do consumidor está subdimensionada, o que acaba por gerar ocorrências de demanda medida superior à tolerância e conseqüentemente o consumidor será submetido a cobranças por ultrapassagem, sofrendo prejuízos financeiros em virtude da demanda contratada desajustada. O caso da Figura 5 também gera prejuízos financeiros, porém, desta vez é ocasionado devido ao valor da demanda contratada estar superdimensionada. Para este caso, o consumidor não será submetido a cobranças por ultrapassagem, pelo contrário, estará pagando constantemente por uma quantidade de demanda contratada não utilizada.

Muitas vezes, o fato de o consumidor não pagar por ultrapassagem ou não utilizar integralmente o valor de sua demanda contratada, pode dar a falsa sensação de que o valor da demanda contratada está adequado, quando na prática, o valor da demanda contratada poderia ser inferior, oferecendo uma economia financeira na fatura da UC.

2.5 Revisão de modelos para o cálculo da demanda contratada

Com base no contexto supracitado, para uma gestão energética de qualidade das UCs do Grupo A, faz-se necessário a contratação de uma demanda 'ótima'. Entretanto, a questão emergente nesse contexto é como realizar o cálculo da demanda contratada 'ótima' de uma unidade consumidora do Grupo A, considerando as particularidades de cada caso. A solução para este problema traz consigo um conjunto de complexidades, sobretudo relacionadas à variabilidade, no tempo, na curva de carga futura de cada unidade consumidora. Além disso, para alguns consumidores do Grupo A, existe a opção de contratação de diferentes modalidades tarifárias, como representado no Quadro 1.

Os estudos sobre o cálculo da demanda contratada 'ótima' não são recentes. Tsay, Lin e Lee (2001) conduziram um estudo que tinha como principal objetivo a decisão ótima de contrato de clientes industriais com o objetivo de reduzir o custo de suas faturas de energia elétrica. Com base no modelo de tarifas que variam de acordo com a hora do dia de um determinado consumidor, empregadas pela *Taiwan Power Company*, utilizou-se de programação evolutiva (comumente conhecido como algoritmo genético), para o cálculo da demanda ideal de consumidores industriais. Para validação do estudo, um estudo de caso foi realizado com quatro clientes. Em todos os casos, houve uma redução no contrato de demanda e, conseqüentemente, uma redução na fatura. O estudo conduzido por Tsay, Lin e Lee (2001) levou ainda em consideração o cálculo da demanda a ser contratada em diferentes períodos do dia com base em qual TOU (do Inglês, *Time of Use*) o cliente em questão possuía, sendo elas contratação de pico, semi-pico e fora do pico (TSAY; LIN; LEE, 2001).

Em 2011, o trabalho de Chen e Liao (2011) propôs melhorias no trabalho conduzido por Tsay, Lin e Lee (2001), no qual citaram o tempo de computação necessário para resolução do problema através da programação evolutiva como sendo substancial. Chen e Liao (2011) formularam o problema do cálculo da demanda 'ótima' a ser contratada como um programa linear, minimizando assim, o tempo de

computação para resolução do problema. Para validação do modelo, foram conduzidos dois estudos de caso: o primeiro em uma universidade e o segundo em uma fábrica de papel. Para ambos os casos, o modelo obteve o valor ótimo para a contratação da demanda em menos de 60 ms (CHEN; LIAO, 2011).

Em trabalhos mais recentes, os algoritmos genéticos se tornaram uma boa opção para o cálculo ótimo da demanda contratada, tendo em visto a evolução de processamento dos computadores e conseqüentemente a diminuição de tempo de computação. Saccaro e Corso (2019) propuseram a otimização de contratação de demanda de potência ativa por meio de algoritmos genéticos, em específico, para consumidores do subgrupo A4 enquadrados na antiga modalidade tarifária horosazonal verde. O algoritmo genético em questão foi aplicado para a previsão de demanda baseada em faturas antigas. O método foi aplicado em um estudo de caso que previu uma redução de 14,3% nos somatórios dos custos anuais referentes à fatura de energia elétrica da empresa (SACCARO; CORSO, 2019).

Outros métodos já foram utilizados para o cálculo ótimo da demanda contratada. Albuquerque (2015), por exemplo, realizou o cálculo ótimo de demanda contratada através da aplicação de um modelo heurístico de otimização robusta. Seu trabalho analisou sete curvas de carga diferentes para consumidores industriais, as quais tiveram suas características alteradas em lineares e não lineares, grau de variância e tendência de crescimento. Posteriormente, foi feito um comparativo da aplicação do modelo heurístico de otimização robusta com um método determinístico de demanda contratada. O modelo heurístico com otimização robusta resultou em um melhor resultado em seis cenários (de um total de sete) quando comparado ao método determinístico, tal verificação indica modelos heurísticos como sendo uma boa opção para realização dos cálculos (ALBUQUERQUE, 2015).

Marangoni, Ferreira e Konopatzki (2015) realizaram um estudo de caso na Universidade Tecnológica Federal do Paraná - campus Medianeira (UTFPR-MD) com o intuito de encontrar a demanda contratada ótima para a instituição também através de histórico de faturas de energia elétrica da UC. Foi utilizado um modelo de busca exaustiva em um intervalo pré-determinado de valores para demanda contratada. Seus estudos resultaram em uma demanda ótima com valor superior a demanda contratada pela instituição. No comparativo financeiro ao longo do ano, a demanda ótima resultou em uma economia estimada em R\$ 9.237,70 para o estudo de caso em análise (MARANGONI; FERREIRA; KONOPATZKI, 2015).

Para o desenvolvimento da ferramenta proposta, se optou pela utilização do algoritmo genético para a realização dos cálculos, tal escolha se deu por dois principais fatores, i) o algoritmo genético vem obtendo bons resultados em trabalhos recentes e, ii) pensando em um aperfeiçoamento da ferramenta em um futuro, como por exemplo a consideração da geração distribuída para realização dos cálculos, a complexidade para resolução do problema irá aumentar, porém, se espera que o algoritmo genético se mantenha uma boa opção mesmo com o aumento da complexidade.

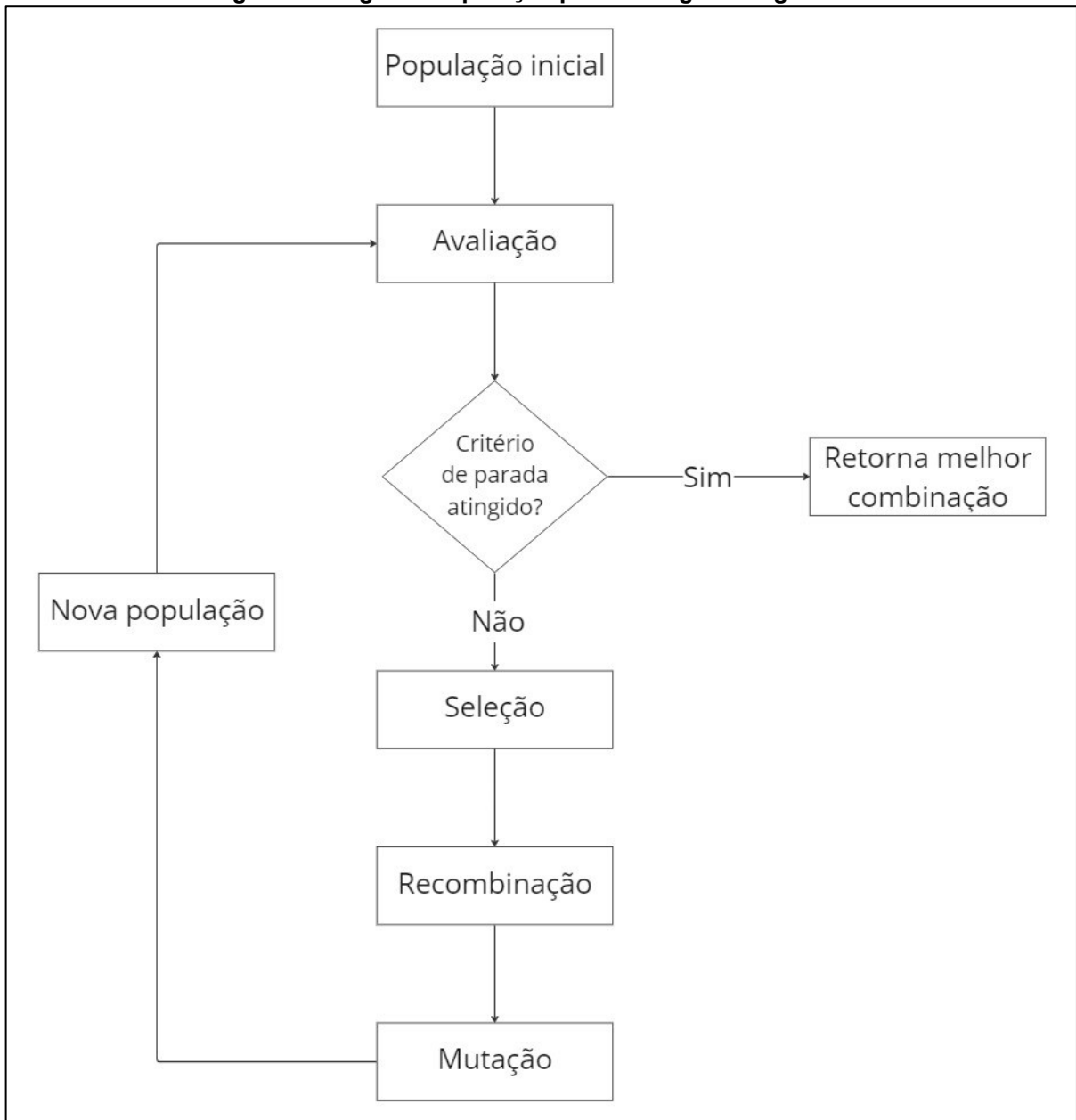
2.6 Algoritmos Genéticos

Os algoritmos genéticos são algoritmos baseados em evolução biológica como uma espécie de “imitação” da evolução biológica existente no mundo real. Os algoritmos genéticos são uma boa opção para buscar soluções próximas as ótimas de algum problema ou uma resposta mais otimizada para a resolução de determinados problemas (FORREST, 1996).

Os algoritmos genéticos tem como base o princípio da teoria de Charles Darwin, de 1859, em que a evolução biológica é considerada como sendo baseada na seleção natural, ou seja, em uma determinada espécie, os indivíduos mais bem adaptados possuem uma maior probabilidade de sobrevivência. Sendo assim, os indivíduos mais aptos a sobreviverem produzem mais descendentes que indivíduos menos aptos e os descendentes dos mesmos não irão possuir as mesmas características que seus antecessores, pois são fruto de uma combinação entre dois indivíduos. Somado a isso, o indivíduo desta nova geração pode, por si só, possuir alguma “mutação” quando comparado a seus antecessores. Tal mutação pode tornar o indivíduo mais ou menos apto ao ambiente. O processo supracitado continua por gerações, e após algumas gerações, a tendência levará a espécie para uma evolução espontânea, tornando a mesma cada vez mais adaptada ao ambiente (SIVANANDAM; DEEPA, 2008).

De modo geral, a resolução de um problema utilizando algoritmos genéticos consiste na busca pela melhor solução conforme representado no fluxograma da Figura 6.

Figura 6 – Lógica de operação para um algoritmo genético



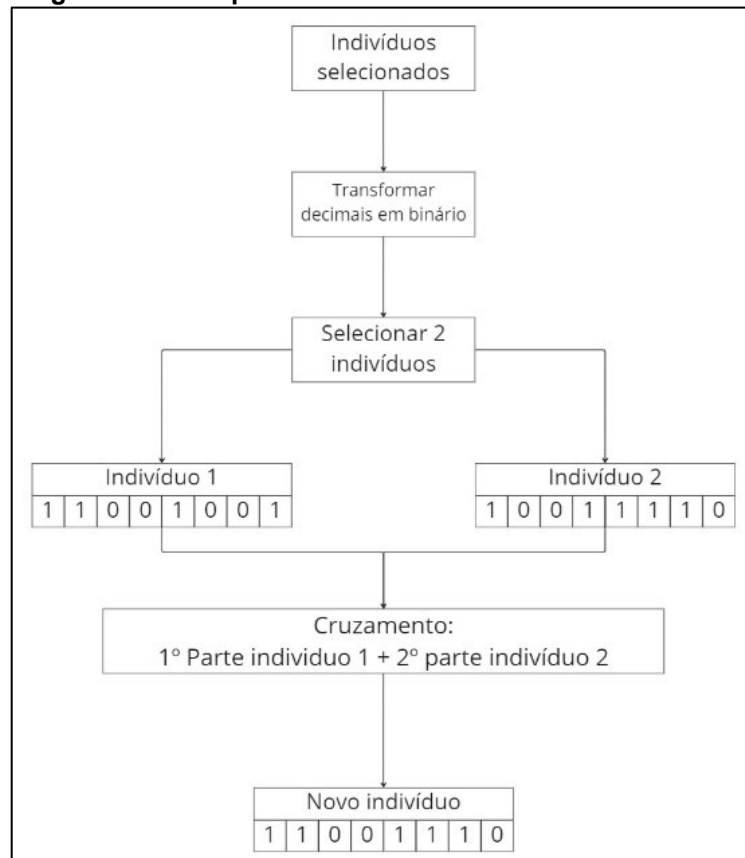
Fonte: Autoria própria

De acordo com Kendall, Sastry e Goldberg (2005), as etapas do fluxograma da Figura 6 podem ser descritas da seguinte maneira (SASTRY; GOLDBERG; KENDALL, 2005):

- 1) **Popula o inicial:** compreende um conjunto de solu es possíveis para o problema e cada possível soluço   chamada de indivíduo. Geralmente, a popula o inicial   gerada de forma aleatória dentro de um intervalo em que faça sentido existir solu es para a soluço do problema.
- 2) **Avalia o:** Nesta etapa, a popula o atual   avaliada através da fun o objetivo, que representa o problema que se deseja minimizar ou maximizar.

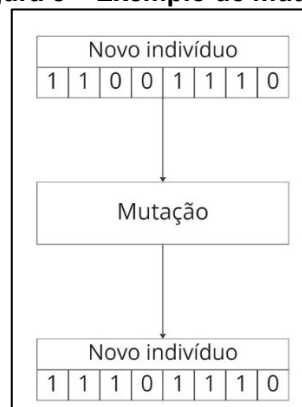
O processo de avaliação compreende testar todos os indivíduos da população na função objetivo e avaliar se os resultados atendem, ou não, ao critério de parada estipulado. O critério de parada pode ser o número de iterações e/ou com base no resultado da função objetivo, em que caso o resultado seja satisfatório, o algoritmo irá finalizar o processo e retornar a melhor solução.

- 3) **Seleção:** a etapa de seleção é necessária para gerar outras gerações de população, promovendo uma evolução quando comparada a população inicial. A seleção se baseia em selecionar os melhores indivíduos da população avaliada na Etapa 2, ou seja, a seleção irá selecionar os indivíduos que resultaram em um menor ou maior (com base no objetivo) valor quando avaliados através da função objetivo. É importante ressaltar que nesta etapa não são selecionados apenas os melhores indivíduos, uma vez que tal ação poderia resultar em problemas, fazendo com que o algoritmo não retornasse a melhor solução. Sendo assim, indivíduos que retornem valores “intermediários” quando submetidos a função objetivo, também devem ser selecionados, porém, em uma menor quantidade quando comparados aos melhores indivíduos.
- 4) **Recombinação:** a etapa de recombinação é responsável por realizar o “cruzamento” dos indivíduos selecionados na Etapa 3. O cruzamento é realizado entre dois indivíduos gerando um novo indivíduo. Este processo se repete até que o número de indivíduos novos seja igual ao número de indivíduos da antiga população, gerando assim uma nova população. Para realizar o processo de cruzamento, os indivíduos selecionados na Etapa 3 são transformados em bits e posteriormente são recombinados. Um exemplo deste processo é apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Exemplo de cruzamento entre dois indivíduos

Fonte: Autoria própria

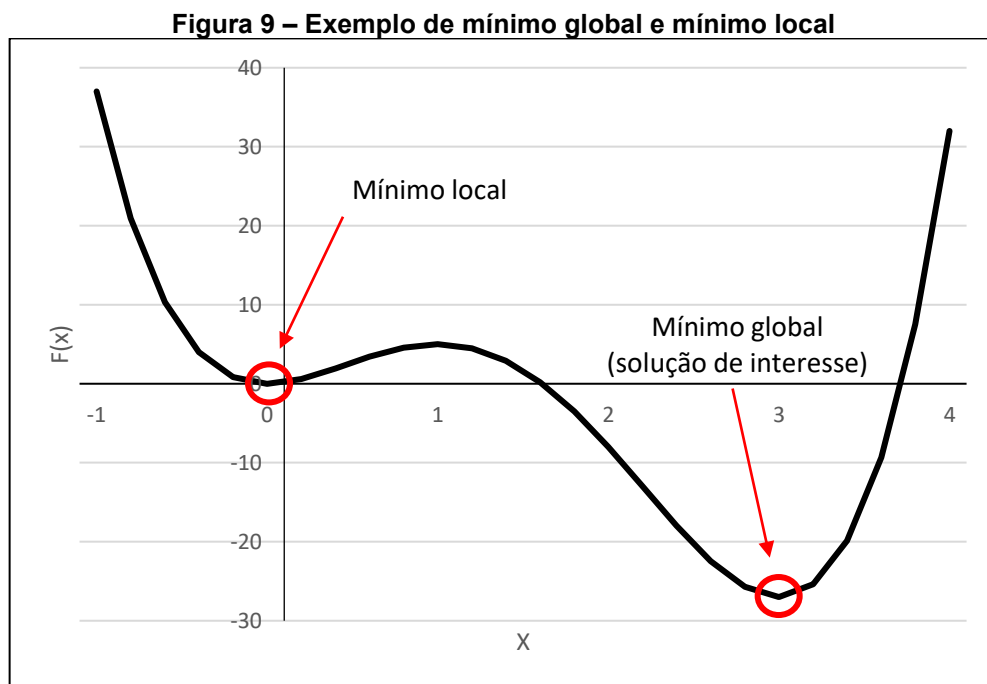
5) Mutação: a etapa de mutação é responsável por realizar a alteração em algum bit. Essa mutação é realizada com base em uma probabilidade repassada para o algoritmo e acontece de forma aleatória. Essa mutação será realizada em apenas um bit do indivíduo e todos os novos indivíduos são submetidos a esta probabilidade de mutação. A Figura 8 apresenta um exemplo em que a mutação ocorre no terceiro bit mais significativo do novo indivíduo.

Figura 8 – Exemplo de mutação

Fonte: Autoria própria

6) Nova população: Após a Etapa 5, a nova população tem seus valores transformados em decimais novamente, retornando para a Etapa 2. Este processo continua até que o critério de parada é atingido, retornando à solução 'ótima'.

É necessário tomar alguns cuidados no momento de definir os parâmetros de população, seleção e mutação, (i) caso a quantidade de indivíduos da população seja muito baixa, (ii) seleção seja realizada apenas com os melhores indivíduos e não selecione indivíduos "medianos" ou a (iii) taxa (probabilidade) de mutação seja muito baixa, podem levar o algoritmo genético a encontrar máximos ou mínimos (com base no objetivo) locais, e não as parâmetros globais, estes últimos, por sua vez são as soluções de interesse. A Figura 9 apresenta um exemplo de uma função hipotética na qual está sinalizada um mínimo local e um mínimo global (MATHEW, 2012).

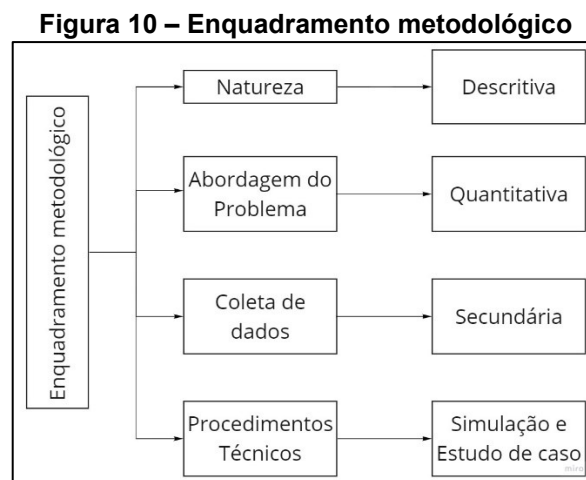


Fonte: Autoria própria

3 DESENVOLVIMENTO DE FERRAMENTA PARA GESTÃO ENERGÉTICA

3.1 Estrutura metodológica e fluxograma proposto

A Figura 10 apresenta o enquadramento metodológico deste trabalho, tratando-se de um estudo de natureza descritiva com abordagem quantitativa. As simulações e validação da ferramenta proposta serão realizadas por meio de estudos de caso.

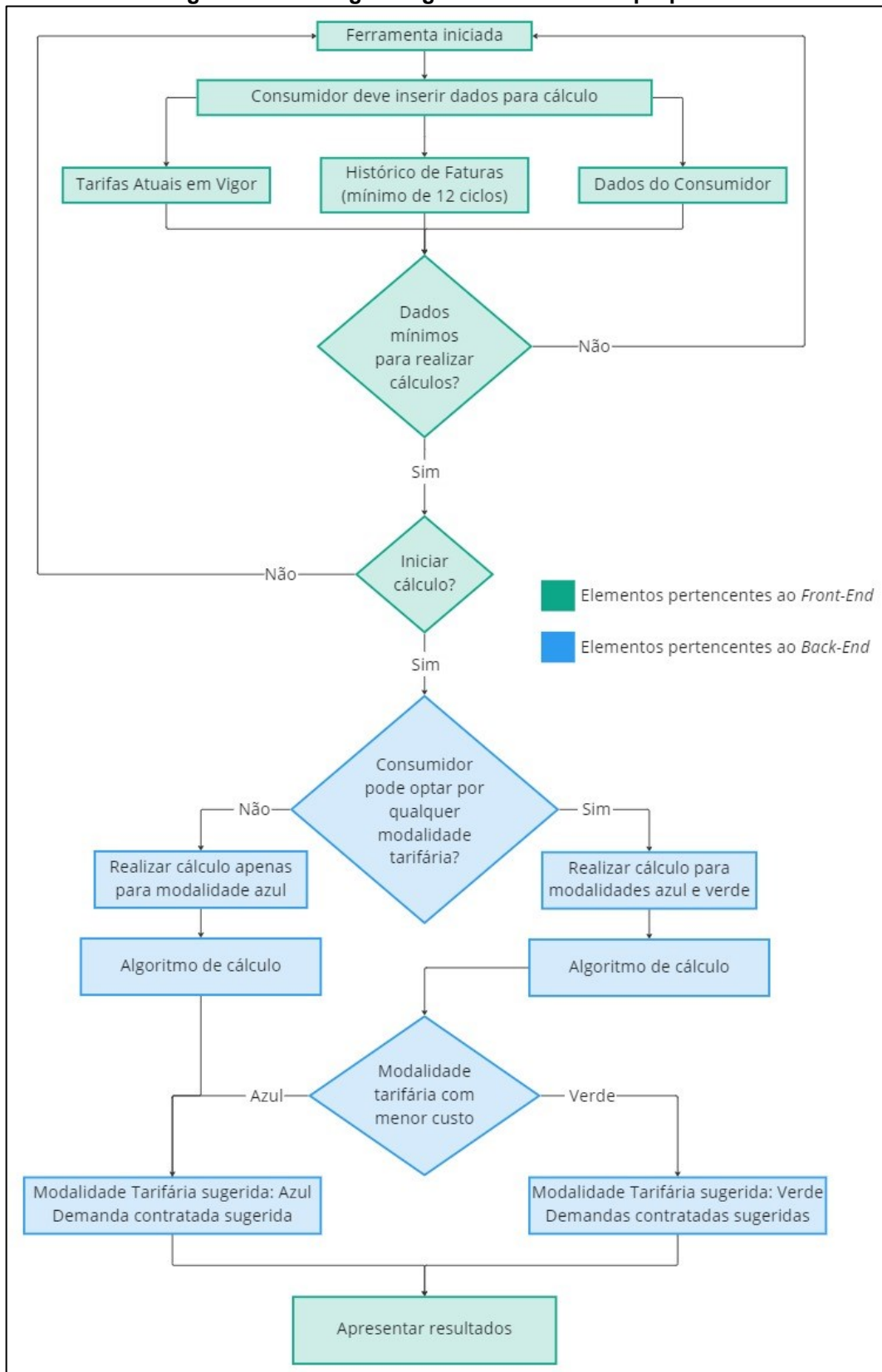


Fonte: Autoria própria

A ferramenta proposta neste trabalho pode ser dividida em duas partes principais: *Front-end* e *Back-end*. O *Front-end* está relacionado com a interface gráfica (incluindo a tela de resultados), na qual o usuário irá introduzir os dados necessários para ser possível calcular a demanda contratada bem como simular a melhor modalidade tarifária (quando for possível escolher a modalidade). O *Back-end* está relacionado ao método utilizado para o cálculo da demanda contratada e da modalidade tarifária mais adequada, bem como com a lógica de programação da ferramenta.

O fluxograma da Figura 11 demonstra a dinâmica que ocorre na ferramenta desenvolvido, incluindo a parte do *Front-end* e *Back-end*. Os elementos que compõe cada uma das partes em qual a ferramenta foi desmembrada (*Front-end* e *Back-end*) serão explicadas nas Seções 3.2 e 3.3, respectivamente.

Figura 11 – Fluxograma geral da ferramenta proposta



Fonte: Autoria própria

3.2 Front-End

O *Front-End* é responsável por realizar a conexão entre o usuário (consumidor) e a ferramenta, ou seja, é no *Front-End* que o usuário poderá incluir os dados de entrada, para posteriormente, o *Back-End* realiza os cálculos necessários e apresentar visualmente os resultados. Para o desenvolvimento do *Front-End* foram utilizadas as bibliotecas Tkinter e Numpy, enquanto para o *Back-End* foram utilizadas as bibliotecas Numpy e Matplotlib, todas as bibliotecas são de uso gratuito. A Figura 12 apresenta a tela inicial da ferramenta desenvolvida. Posteriormente, será explicado as subdivisões da tela inicial, cada qual com um objetivo específico de modo a possibilitar o consumidor inserir os dados necessários.

Figura 12 – Tela inicial da interface gráfica

The screenshot shows a graphical user interface window titled "Menu Inicial". It is divided into several sections:

- Tensão de Conexão:** A group box containing five radio buttons for different voltage levels: "230 kV ou superior (A1)", "88 kV a 138 kV (A2)", "69 kV (A3)", "30 kV a 44 kV (A3a)", and "2,3 kV a 25 kV (A4)". The option "Inferior a 2,3 kV (A5)" is selected.
- Modalidade Tarifária Atual:** A group box with two radio buttons: "Verde" and "Azul". "Azul" is selected.
- Dados do Histórico de Faturas:** A section with four input fields: "Demanda Ponta (kW)", "Consumo Ponta (kWh)", "Demanda Fora Ponta (kW)", and "Consumo Fora Ponta (kWh)".
- Buttons:** A row of four buttons: "ATUALIZAR", "CANCELAR", "DELETAR", and "ADICIONAR".
- Table:** A table with five columns: "MES", "D. PONTA", "C. PONTA", "D. F. PONTA", and "C. F. PONTA". The table body is currently empty.
- Bottom Buttons:** "LIMPAR DADOS" and "CALCULAR".
- Right Panel:** A section titled "ATUALIZAR TARIFAS" with "MANUAL" and "RESET" buttons, and a status indicator "STATUS: Não Carregado". Below this are three input fields: "Demanda Contratada Fora de Ponta (Atual) (kW)", "Demanda Contratada Ponta (Atual) (kW)", and "Crescimento Percentual Anual (%)".

Fonte: Autoria própria

3.2.1 Tarifas em vigor da unidade consumidora

A Figura 13 apresenta a subdivisão da tela inicial referente a atualização de tarifas em vigor da UC, a qual permite que o consumidor insira as tarifas em vigor de acordo com o subgrupo e concessionária em que o mesmo se encaixa.

Figura 13 – Área para tarifas



ATUALIZAR TARIFAS

MANUAL

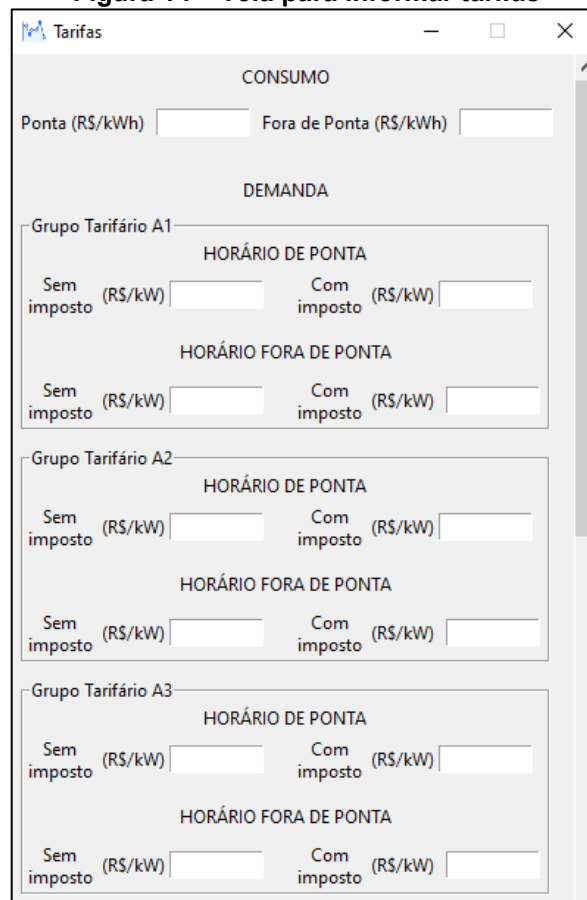
RESET

STATUS: Não Carregado

Fonte: Autoria própria

Para realizar a inserção das tarifas, é necessário que o usuário clique no botão “MANUAL”, abrindo uma segunda tela representada na Figura 14.

Figura 14 – Tela para informar tarifas



Tarifas

CONSUMO

Ponta (R\$/kWh) Fora de Ponta (R\$/kWh)

DEMANDA

Grupo Tarifário A1

HORÁRIO DE PONTA

Sem imposto (R\$/kW) Com imposto (R\$/kW)

HORÁRIO FORA DE PONTA

Sem imposto (R\$/kW) Com imposto (R\$/kW)

Grupo Tarifário A2

HORÁRIO DE PONTA

Sem imposto (R\$/kW) Com imposto (R\$/kW)

HORÁRIO FORA DE PONTA

Sem imposto (R\$/kW) Com imposto (R\$/kW)

Grupo Tarifário A3

HORÁRIO DE PONTA

Sem imposto (R\$/kW) Com imposto (R\$/kW)

HORÁRIO FORA DE PONTA

Sem imposto (R\$/kW) Com imposto (R\$/kW)

Fonte: Autoria própria

A tela apresentada na Figura 14 permite que o consumidor adicione as tarifas (com e sem imposto impostos em cada posto tarifário) de consumo (R\$/kWh) na ponta e fora de ponta, e também as tarifas de demanda nos horários de ponta e fora de ponta (R\$/kW). Para a “DEMANDA”, é necessário que o consumidor preencha apenas os dados das tarifas do subgrupo em que a sua UC pertence.

Após o consumidor salvar os dados de tarifas vigentes, a subdivisão apresentada na Figura 13 tem seu “STATUS” atualizado, conforme ilustra a Figura 15.

Figura 15 – Área para tarifas pós atualização



Fonte: Autoria própria

3.2.2 Histórico de faturas da unidade consumidora

A Figura 16 apresenta a subdivisão da tela inicial referente ao histórico de faturas da UC, permitindo que o usuário insira na ferramenta os respectivos dados mensais. Para realizar a inserção das grandezas faturadas é necessário que o consumidor insira os dados para cada mês em seus respectivos campos e posteriormente clique em “ADICIONAR”.

Figura 16 – Área para informar dados do histórico de faturas da UC

Dados do Histórico de Faturas

Demanda Ponta (kW) Consumo Ponta (kWh)

Demanda Fora Ponta (kW) Consumo Fora Ponta (kWh)

ATUALIZAR CANCELAR DELETAR ADICIONAR

MES	D. PONTA	C. PONTA	D. F. PONTA	C. F. PONTA

LIMPAR DADOS CALCULAR

Fonte: Autoria própria

A Figura 17 apresenta a subdivisão da tela inicial com valores genéricos já adicionados.

Figura 17 – Área para informar dados com exemplo de preenchimento genérico

Dados do Histórico de Faturas

Demanda Ponta (kW) Consumo Ponta (kWh)

Demanda Fora Ponta (kW) Consumo Fora Ponta (kWh)

ATUALIZAR CANCELAR DELETAR ADICIONAR

MES	D. PONTA	C. PONTA	D. F. PONTA	C. F. PONTA
1	1	3	2	4
2	5	7	6	8
3	9	11	10	12
4	13	15	14	16
5	17	19	18	20
6	29	31	30	32
7	37	39	38	40

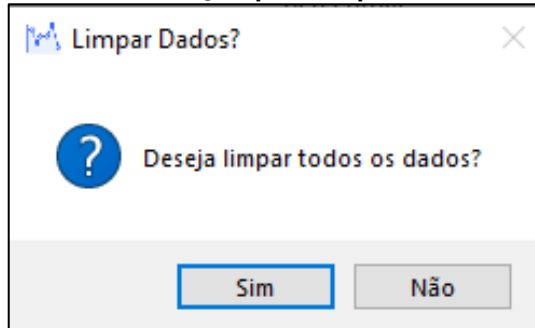
LIMPAR DADOS CALCULAR

Fonte: Autoria própria

Após a existência de ao menos um mês de dados do histórico de faturas da unidade consumidora adicionados, através dos demais botões existentes, o usuário ainda tem a opção de executar outras ações com os dados, destacando-se:

- **Atualizar dados já adicionados:** Caso o usuário tenha adicionado algum dado de forma equivocada, é possível atualizá-lo. Para isso, basta dar um duplo clique na linha do dado que se deseja editar. Após isso, os dados serão transpostos para os campos de entrada permitindo que sejam editados. Após a alteração desejada, basta clicar em “ATUALIZAR”. Caso seja necessário cancelar a edição no meio do processo, basta clicar em “CANCELAR”;
- **Deletar dados:** Caso o usuário deseje excluir alguma linha de dados, é necessário apenas selecionar a linha desejada, com um clique único, e em seguida clicar em “DELETAR”;
- **Deletar todos os dados:** Com a finalidade de facilitar o processo de exclusão de vários dados inseridos de uma só vez, o botão “LIMPAR DADOS” deleta todos os dados adicionados referentes ao histórico de faturas. Após clicar nesse campo, uma mensagem de aviso questiona o usuário e pede a confirmação da decisão como é mostrado na Figura 18.

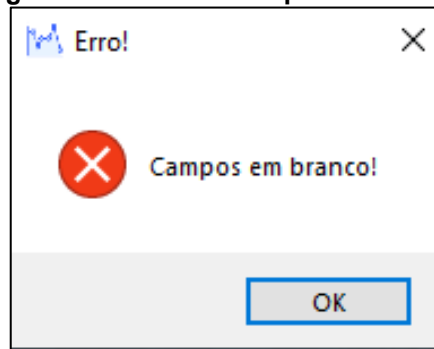
Figura 18 – Confirmação para limpar dados de faturas



Fonte: Autoria própria

Caso o usuário tente adicionar os dados sem os mesmos estarem todos devidamente preenchidos, uma mensagem de erro surge, conforme ilustra a Figura 19.

Figura 19 – Erro de campos em branco



Fonte: Autoria própria

3.2.3 Preenchimento de dados da unidade consumidora

A Figura 20 apresenta a subdivisão da tela inicial referente aos dados da UC, permitindo que o usuário informe à ferramenta os valores de: tensão de conexão, modalidade tarifária atual, demanda contratada atual, demanda contratada na ponta atual (se existir) e crescimento percentual anual estimado. Para informar os dados supracitados, basta que o usuário selecione a tensão de conexão bem como a modalidade tarifária atual e informe nos campos adequados a(s) demanda(s) contratada(s) (FP e/ou P) e o crescimento percentual esperado.

Figura 20 – Área de dados da UC

Tensão de Conexão <input type="radio"/> 230 kV ou superior (A1) <input type="radio"/> 88 kV a 138 kV (A2) <input type="radio"/> 69 kV (A3) <input type="radio"/> 30 kV a 44 kV (A3a) <input type="radio"/> 2,3 kV a 25 kV (A4) <input checked="" type="radio"/> Inferior a 2,3 kV (AS)		Demanda Contratada Fora de Ponta (Atual) (kW) <input type="text"/>
Modalidade Tarifária Atual <input type="radio"/> Verde <input checked="" type="radio"/> Azul		Demanda Contratada Ponta (Atual) (kW) <input type="text"/>
		Crescimento Percentual Anual (%) <input type="text"/>

Fonte: Autoria própria

3.2.3.1 Crescimento percentual

Um dos principais objetivos da ferramenta desenvolvida é realizar o cálculo para a demanda contratada 'ótima', tanto para a ponta quanto para fora de ponta,

baseando-se no histórico de faturas da UC. Por outro lado, as empresas, em geral, buscam o seu crescimento, resultando conseqüentemente em prováveis aumentos no consumo de energia e demanda elétrica. Nesse sentido, levando em consideração que o algoritmo se baseia no histórico de faturas e com o objetivo de não resultar em um valor para a demanda contratada que pudesse se tornar obsoleto a curto prazo (em decorrência do crescimento da empresa), optou-se por adicionar um campo em que o usuário pode informar qual é o crescimento percentual esperado para os próximos anos.

O crescimento percentual previsto a ser informado pelo usuário para a ferramenta foi inserido no processo de cálculo assumindo que o fator de carga do consumidor permanecerá constante conforme ilustra a Equação (9).

$$FC_{antes} = FC_{depois}, \quad (9)$$

em que FC_{antes} é o fator de carga atual, sem consideração de crescimento, enquanto FC_{depois} é o fator de carga após o percentual de crescimento. A Equação (10) apresenta o cálculo geral para o fator de carga.

$$FC = \frac{D_{med}}{D_{max}} = \frac{C}{D_{max} \cdot \Delta t}, \quad (10)$$

em que FC é o fator de carga calculado, D_{max} é a demanda máxima (kW), C é o consumo de energia elétrica (kWh) e D_{med} (kW) é a demanda média, todas estas grandezas são referentes ao mesmo período de Δt .

Igualando os fatores de carga da Equação (9) de acordo com a Equação (10), obtém-se a relação apresentada Equação (11):

$$\frac{C_{antes}}{Da_{max} \cdot \Delta t} = \frac{C_{depois}}{Dd_{max} \cdot \Delta t}, \quad (11)$$

em que Da_{max} e Dd_{max} são, respectivamente, a demanda máxima, antes e após a aplicação do percentual de crescimento, ambas em (kW), e, seguindo a mesma lógica, C_{antes} e C_{depois} são o consumo de energia elétrica (kWh), antes e após a aplicação do percentual de crescimento.

Como a quantidade de horas (Δt) é a mesma para ambos os casos, resulta na Equação (12):

$$\frac{C_{antes}}{Da_{max}} = \frac{C_{depois}}{Dd_{max}}. \quad (12)$$

Considerando o percentual anual de crescimento (C_{cresc}), resulta-se no consumo de energia elétrica (kWh) após a inclusão do percentual (C_{depois}), conforme apresentado na Equação (13).

$$C_{depois} = C_{antes} \cdot C_{cresc}. \quad (13)$$

Substituindo a Equação (13) em (12), obtém-se a Equação (14), utilizada para realizar os cálculos de demanda contratada ‘ótima’ com o fator de crescimento da UC.

$$Dd_{max} = Da_{max} \cdot C_{cresc}. \quad (14)$$

Desta forma, todos os valores de demanda medida no histórico de faturas do consumidor que forem informadas pelo usuário, serão multiplicadas pelo crescimento percentual, também informado pelo usuário, conforme apresentado na Equação (14) e então os valores resultantes serão utilizados para o cálculo da demanda contratada ‘ótima’.

3.2.4 Restrições *Front-End*

Para garantir o bom funcionamento e operação da ferramenta, algumas restrições foram impostas ao *Front-end* com o objetivo de evitar erros inesperados devido ao preenchimento incorreto por parte do usuário, fato que poderia resultar em erros na execução da ferramenta, no que se refere às informações que o *Back-end* necessita para executar o algoritmo. As principais restrições impostas referem-se à necessidade de um conjunto de dados mínimos para dar início ao cálculo e também o formato de número padrão para o preenchimento das informações necessárias.

3.2.4.1 Dados mínimos para inicialização do algoritmo

Para ser possível iniciar a etapa de cálculo, ou seja, iniciar o *Back-End* da ferramenta, é necessária uma quantidade de dados mínimos de faturas. A inicialização do processo de cálculo é realizada ao clicar no botão “CALCULAR” apresentado na Figura 21.

Figura 21 – Destaque da ferramenta referente ao botão calcular

Dados do Histórico de Faturas

Demanda Ponta (kW) Consumo Ponta (kWh)

Demanda Fora Ponta (kW) Consumo Fora Ponta (kWh)

ATUALIZAR CANCELAR DELETAR ADICIONAR

MES	D. PONTA	C. PONTA	D. F. PONTA	C. F. PONTA
1	1	3	2	4
2	5	7	6	8
3	9	11	10	12
4	13	15	14	16
5	17	19	18	20
6	21	23	22	24
7	25	27	26	28
8	29	31	30	32
9	33	35	34	36
10	37	39	38	40

LIMPAR DADOS CALCULAR

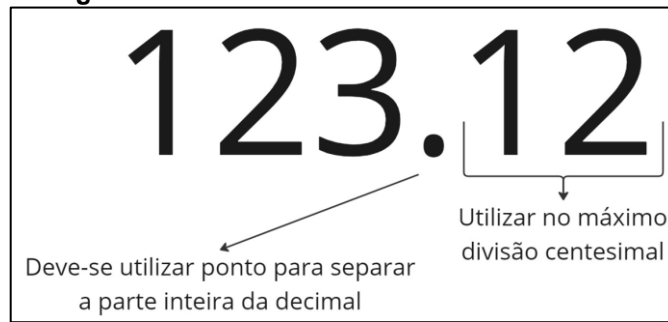
Fonte: Autoria própria

O botão “CALCULAR” torna-se ativo somente a partir do momento em que o usuário tenha informado doze dados de faturas antigas. Além da quantidade de dados de faturas antigas, outras informações devem ser informadas à ferramenta, sendo elas: tarifas vigentes, demanda contratada em ambos os horários e crescimento percentual anual previsto. Caso o usuário tente iniciar o processo de cálculo sem ter informado os dados mínimos necessários, uma mensagem de erro é gerada, conforme apresentado na Figura 19.

3.2.4.2 Formato de número

Todos os dados a serem inseridos na ferramenta devem seguir o formato apresentado na Figura 22, sem a obrigatoriedade de informar a parte decimal, para a parte inteira é necessário apenas o real valor que se deseja informar, não sendo necessário o complemento de demais casas (unidade de milhar, centenas, dezenas) com zeros, quando não utilizadas.

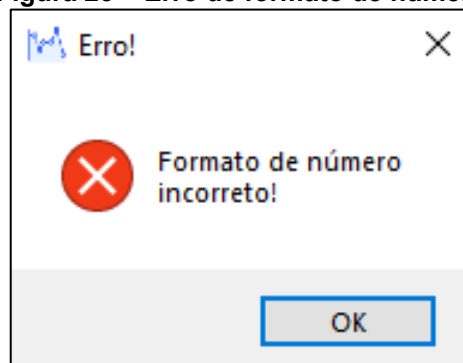
Figura 22 – Formato de número a ser utilizado



Fonte: Autoria própria

Em qualquer etapa do processo em que o usuário tentar inserir um número que esteja no formato incorreto, tanto no momento de adicionar dados de faturas antigas como no momento de iniciar o processo de cálculo clicando no botão “CALCULAR”, uma mensagem de erro será apresentada conforme ilustra a Figura 23.

Figura 23 – Erro de formato de número



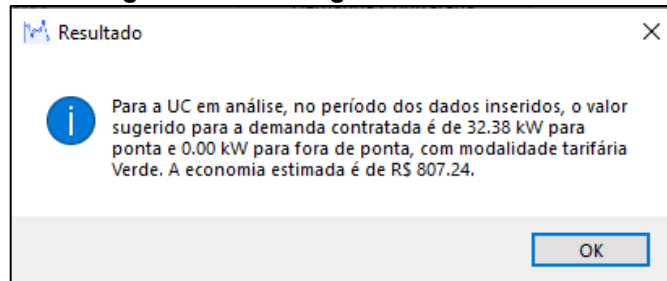
Fonte: Autoria própria

3.2.5 Tela de resultados

A última etapa pertencente ao *Front-End* é a tela de resultados, na qual são apresentados graficamente os dados inseridos pelo usuário e os dados calculados. A tela de resultados apresenta duas mensagens principais. Na primeira, uma mensagem com as principais informações calculadas pela ferramenta (i.e., demanda(s) contratada(s) sugerida(s), modalidade tarifária sugerida e economia anual estimada) são apresentadas. Posteriormente, os mesmos dados citados anteriormente são apresentados de forma gráfica em uma janela separada, juntamente com um conjunto de dados adicionais, incluindo o fator de carga da UC na ponta e fora de ponta para cada mês, consumos mensais e a estimativa de economia anual sugerida. A Figura 24 e Figura 25 apresentam a mensagem com as principais informações e os

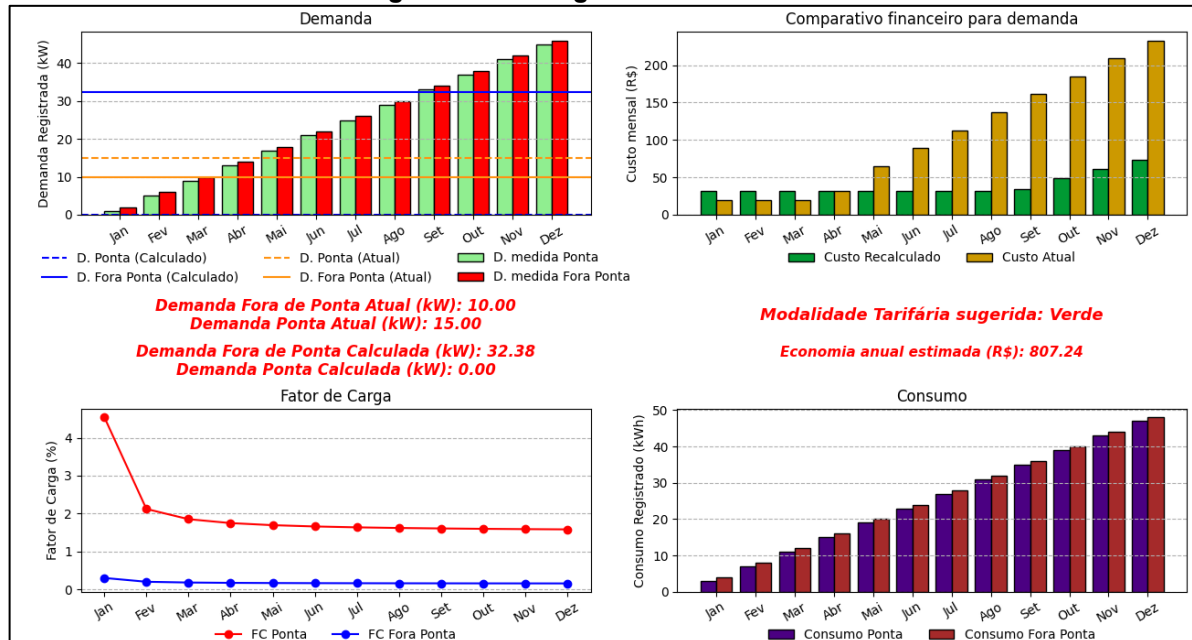
dados apresentados de forma gráfica, respectivamente. Ambas as figuras estão com valores arbitrários, apenas para ilustração de tais funcionalidades.

Figura 24 – Mensagem com resultados



Fonte: Autoria própria

Figura 25 – Tela gráfica de resultados



Fonte: Autoria própria

Para a tela de apresentação gráfica, são apresentados os mesmos dados existentes na Figura 24, porém inclui também os gráficos de fator de carga na ponta e fora de ponta, consumos mensais e a estimativa de economia anual sugerida antes e após a execução do algoritmo, além da apresentação gráfica da antiga demanda contratada e da nova demanda sugerida para contratação.

3.3 Back-End

Após inserido todos os dados mínimos necessários, é possível dar início a execução do algoritmo, ou seja, a partir deste momento a ferramenta passa a executar o seu *Back-end*. O *Back-end*, de maneira ampla, é responsável por realizar os cálculos

de fator de carga nos horários de ponta e fora de ponta, cálculo da demanda contratada sugerida bem como modalidade tarifária sugerida e economia anual estimada. Os cálculos realizados no *Back-End* serão explicados nas seções 3.3.1 a 3.3.3.

3.3.1 Cálculo dos fatores de carga

O primeiro cálculo executado pelo *Back-end* é o fator de carga para todos os meses informados pelo usuário. Os fatores de carga são calculados usando os dados de consumo e demanda faturada (para ambos os postos tarifários) utilizando a Equação (10).

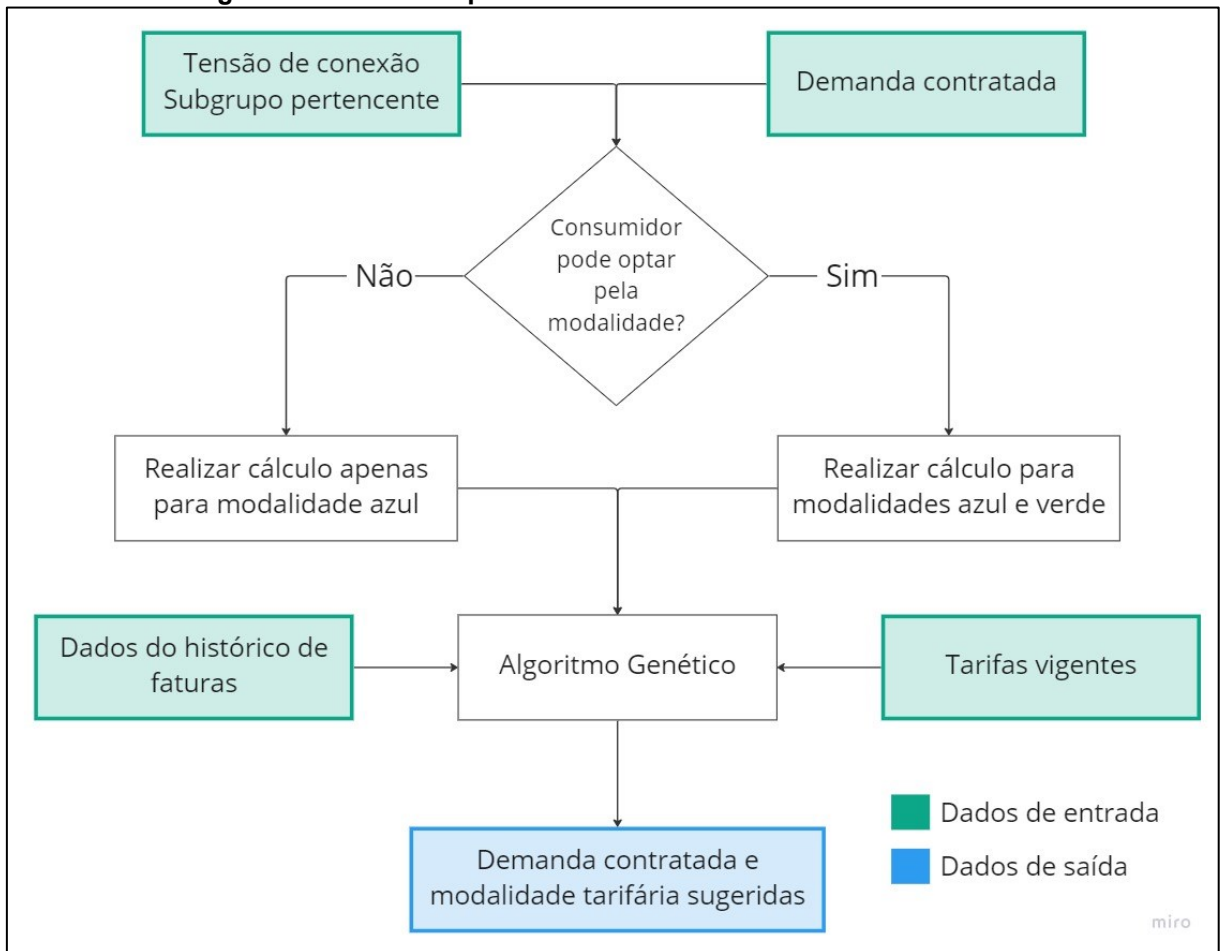
3.3.2 Demanda contratada e modalidade tarifária sugeridas

Na sequência, o cálculo realizado pelo *Back-end* é referente à demanda contratada e modalidade tarifária sugeridas. Essa parte do *Back-end* é dividida em duas etapas: o cálculo da demanda contratada 'ótima' e a avaliação da melhor modalidade tarifária.

3.3.2.1 Cálculo da demanda contratada sugerida

Para realizar o cálculo da demanda contratada sugerida, optou-se pela utilização de um algoritmo genético. Essa escolha se deu sobretudo pelo fato de os algoritmos genéticos serem considerados como uma boa opção na busca por soluções 'ótimas'. O cálculo da demanda contratada 'ótima' se baseia nas informações de demandas inseridas pelo usuário (histórico de faturas) e nas tarifas de demanda vigentes informadas. Como apresentado no fluxograma da Figura 26, o *Back-end* utiliza das informações da UC para analisar se é possível ele escolher, ou não, a modalidade tarifária que desejar. Com base na análise dos dados inseridos, procede-se ao cálculo da demanda contratada 'ótima', em que o algoritmo realizará o cálculo para uma ou ambas as modalidades tarifárias de acordo com os dados de entrada inseridos. A Figura 26 apresenta o fluxograma de como funciona a dinâmica supracitada para o cálculo da demanda 'ótima' a ser contratada.

Figura 26 – Dinâmica para cálculo da demanda contratada ‘ótima’



Fonte: Autoria própria

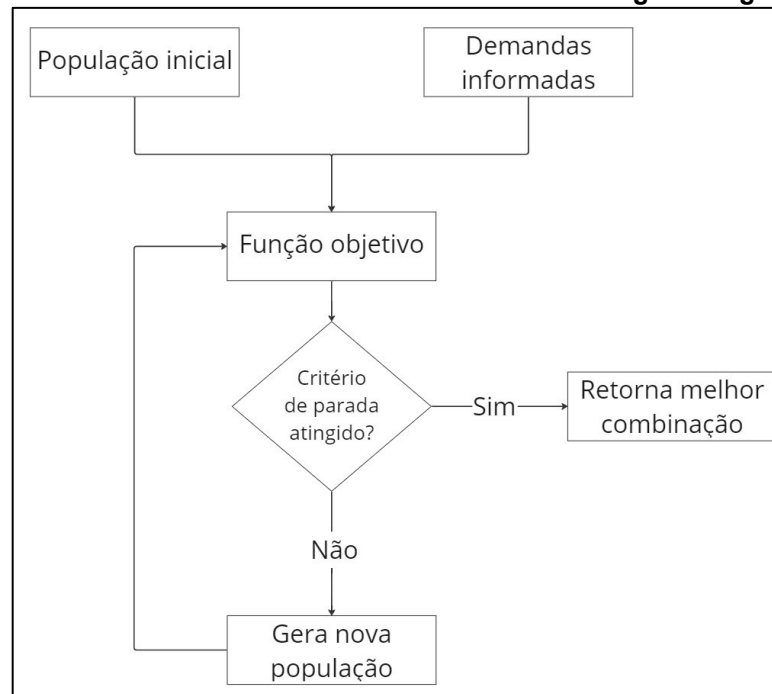
3.3.2.2 Algoritmo genético para cálculo da demanda contratada ‘ótima’

Para realizar o cálculo da demanda contratada ‘ótima’ através de algoritmo genético, os dados de demanda e tarifas de demanda vigentes informados pelo usuário são usados como base. O cálculo da demanda contratada ‘ótima’ (como apresentado na Figura 26) pode ser realizado apenas para a modalidade tarifária azul, ou para modalidade tarifária azul e verde, de acordo com os dados inseridos pelo usuário. A diferença entre os cálculos das demandas contratadas sugeridas nas diferentes modalidades tarifárias, além das funções objetivos de acordo com as equações da seção 2.4.3.4, também está na composição dos indivíduos da população, em que de acordo com a modalidade tarifária os indivíduos podem conter, cada um, apenas uma demanda contratada ou duas demandas contratadas. Assim, os indivíduos da população são:

- **Modalidade Tarifária Azul** – Indivíduos contam com uma combinação de demanda contratada para o horário ponta e outra demanda contratada para o horário fora de ponta.
- **Modalidade Tarifária Verde** – Indivíduos contam apenas com uma demanda contratada geral.

As funções objetivo foram formuladas de acordo com as Equações (3), (4) e (5), em que o algoritmo genético irá testar diferentes valores de demanda contratada utilizando como base as demandas faturadas informadas pelo usuário. A dinâmica para o cálculo está apresentada na Figura 27.

Figura 27 – Cálculo da demanda ‘ótima’ utilizando o algoritmo genético



Fonte: Autoria própria

Para o cálculo da demanda contratada da modalidade tarifária azul não é necessária nenhuma alteração das demandas informadas pelo usuário. Entretanto, quando o cálculo será executado para a modalidade tarifária verde, se faz necessário avaliar as demandas informadas pelo usuário, afim de verificar mês a mês qual a demanda deve ser considerada para cálculo. A demanda que será considerada para cada mês será a maior demanda do mês entre a demanda no horário de ponta e no horário fora de ponta.

O algoritmo genético irá testar todas as possíveis soluções da população em todas as demandas faturadas informadas pelo usuário (respeitando o parágrafo supracitado). O teste continua até alcançar o critério de parada.

Testes foram realizados a fim de obter a melhor combinação de parâmetros como, número de interações, número de bits por variável, número da população, taxa de mutação e método de seleção, para a resolução do problema, por fim, bons resultados foram obtidos com a configuração:

- Número de interações (critério de parada): 100.
- Número de bits por variável: 16.
- Número da população: 100.
- Taxa de mutação para modalidade verde: 6,25%.
- Taxa de mutação para modalidade azul: 3,12%.
- Método de seleção: Seleção por torneio.

3.3.2.3 Avaliação da modalidade tarifária adequada

A avaliação da melhor modalidade tarifária é necessária apenas nos casos em que a UC possui a possibilidade de optar por ambas as modalidades tarifárias (com base nos dados da UC informados pelo usuário). Para esse caso, a avaliação da modalidade tarifária mais adequada é realizada por meio do retorno das funções objetivo apresentadas na seção 3.3.2.2 e corresponde ao próprio custo resultante do período de cálculo, ou seja, o algoritmo genético irá buscar pela demanda contratada que resulta no menor custo no período. Sendo assim, após o cálculo da demanda contratada 'ótima', para ambas as modalidades tarifárias, é realizado um comparativo entre o retorno de ambas as funções objetivo (função da modalidade verde e função da modalidade azul) e a função objetivo que retornar o menor custo no período em consideração, será a modalidade tarifária mais adequada.

3.3.3 Cálculo de economia estimada

Para o cálculo da economia anual estimada, implementou-se um algoritmo específico para tal finalidade, responsável por realizar o cálculo do custo total gerado com base na demanda contratada e modalidade tarifária atual do consumidor. Posteriormente, o mesmo cálculo é realizado, porém considerando a modalidade tarifária adequada e a demanda contratada 'ótima' calculada pelo algoritmo genético. Desta maneira, é possível observar mês a mês o comparativo entre a configuração atual do consumidor e a configuração calculada pela ferramenta bem como obter o montante da redução de custo anual (R\$).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Com o intuito de avaliar a utilização da ferramenta proposta em situações reais, foram selecionadas duas UCs do Grupo A de diferentes ramos atendidas pela empresa de distribuição Copel. O primeiro caso (UC 1) refere-se a uma indústria do ramo madeireiro localizada na região Sudoeste do Paraná. No segundo estudo de caso (UC 2), considerou-se o caso da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) - campus Pato Branco. Foram utilizadas o histórico de faturas de ambas as UCs para avaliar se a demanda contratada vigente no período em questão estava dimensionada adequadamente, bem como avaliar se a solicitação do aumento/diminuição da demanda contratada que ocorreu ao longo das faturas antigas promoveu benefícios ou prejuízos financeiros às UCs em análise.

Para a realização do estudo de caso, as tarifas utilizadas foram as tarifas em vigor para o subgrupo A4 da concessionária Copel. O Quadro 4 – Enquadramento das UCs apresenta o enquadramento tarifário para ambas as UCs, juntamente com as demandas contratadas consideradas nos estudos de caso.

Quadro 4 – Enquadramento das UCs

UC	Modalidade Tarifária Atual	Subgrupo	Concessionária	Demanda(s) Contratada(s) (kW)	Período considerado
1	Verde	A4	COPEL	50	Set/21 – Ago/22
2	Verde	A4	COPEL	280	Jan/13 – Dez/13
				380	Jan/14 – Dez/14
				450	Jan/15 – Dez/15

Fonte: Autoria própria

O principal objetivo dos estudos de caso consiste na avaliação dos resultados obtidos pela aplicação do algoritmo proposto em relação a (i) melhor modalidade tarifária, (ii) demanda contratada 'ótima' e, na sequência, estimar (iii) a redução de custos anuais resultante caso os itens (i) e (ii) tivessem sido considerados ao longo do ano em análise.

4.1 Indústria do ramo madeireiro (UC 1)

Através de contato com a administração da indústria, foi possível ter acesso ao histórico de consumo e demanda dos últimos 12 meses (outubro de 2020 até setembro de 2021) da UC em questão (dados apresentados na Tabela A2). O período para a análise foi escolhido propositalmente, pois após o mês de setembro de 2021,

a indústria começou a operar com um sistema de geração fotovoltaico, que afeta diretamente na demanda faturada, podendo gerar resultados distorcidos, uma vez que a ferramenta desenvolvida não leva em consideração outros fatores como a inserção de Geração Distribuída (GD), por exemplo.

A Figura 28 apresenta a tela da ferramenta preenchida com as informações dos dados da UC 1, desconsiderando inicialmente o fator de crescimento percentual. Como apresentado no Quadro 4, a UC 1 é optante pela Modalidade Tarifária Verde, sendo assim, possui apenas uma demanda contratada. Para a realização dos cálculos, a demanda contratada da UC será utilizada como sendo a demanda contratada para o horário fora de ponta, enquanto a demanda contratada para o horário de ponta foi considerada como sendo nulo.

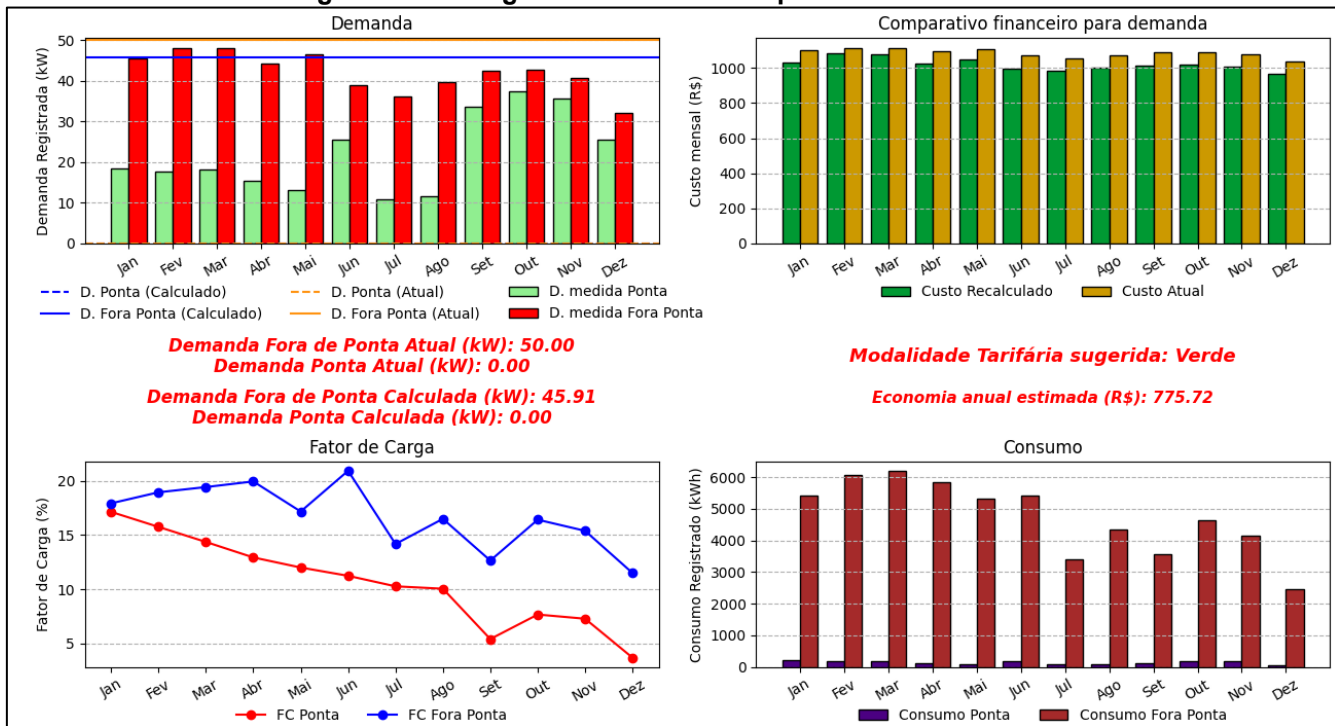
Figura 28 – Ferramenta com dados para a UC 1

The screenshot displays a web-based interface for configuring tariff data. On the left, there are two sections: 'Tensão de Conexão' with radio buttons for 230 kV ou superior (A1), 88 kV a 138 kV (A2), 69 kV (A3), 30 kV a 44 kV (A3a), 2,3 kV a 25 kV (A4) (selected), and Inferior a 2,3 kV (A5); and 'Modalidade Tarifária Atual' with radio buttons for Verde (selected) and Azul. On the right, under the heading 'ATUALIZAR TARIFAS', there are 'MANUAL' and 'RESET' buttons, a green status indicator 'STATUS: Carregado', and three input fields: 'Demanda Contratada Fora de Ponta (Atual) (kW)' with the value 50, 'Demanda Contratada Ponta (Atual) (kW)' with the value 0, and 'Crescimento Percentual Anual (%)' with the value 0.

Fonte: Autoria própria

A Figura 29 apresenta a tela de resultados da interface gráfica proposta com base nos dados da UC 1.

Figura 29 – Tela gráfica de resultados para a UC 1

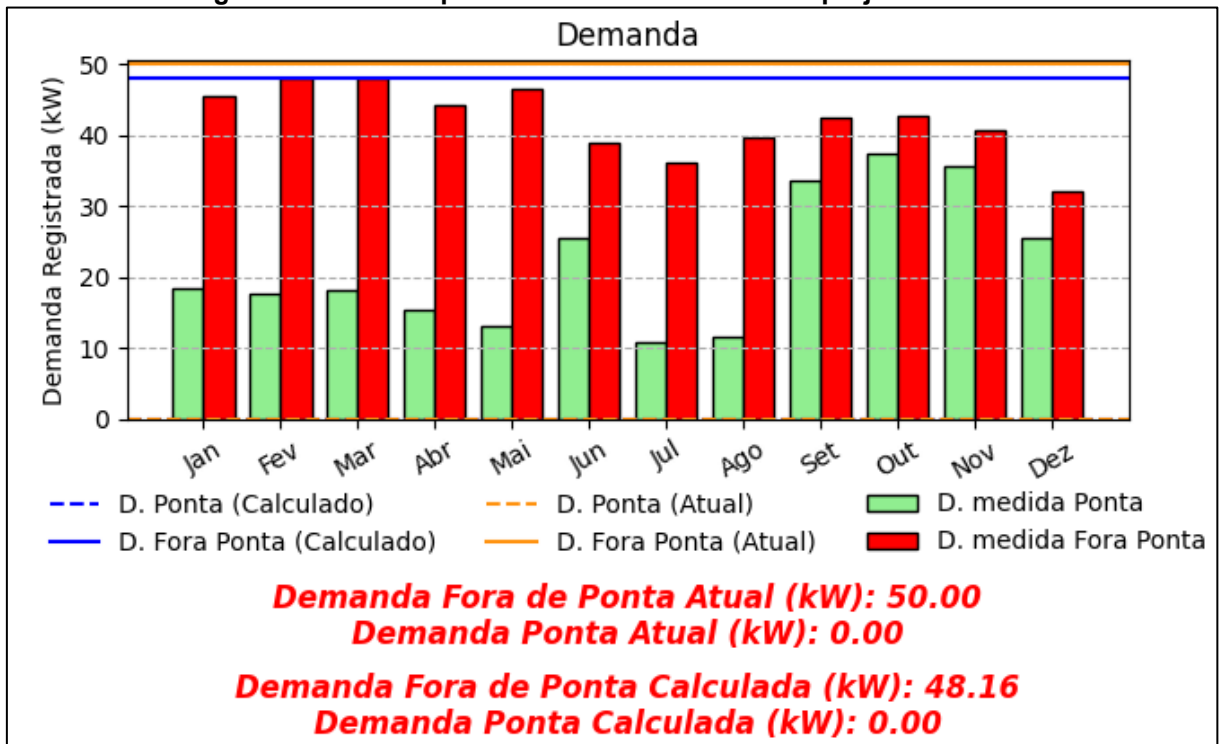


Fonte: Autoria própria

Os resultados indicam que a melhor modalidade tarifária para a UC 1 se manteve como sendo a modalidade tarifária verde. A demanda contratada, por sua vez, teve uma redução de 50 kW para 45.91 kW, resultando em uma estimativa de economia anual estimada de aproximadamente R\$ 775.72.

A Figura 30 apresenta o gráfico para a demanda contratada quando se projeta um crescimento percentual de 5% para a UC 1. É possível observar que a demanda contratada 'ótima', neste caso, é alterada de 50 kW para 48.16 kW. Ainda, é possível inferir que é válido considerar a atual demanda contratada como estando adequada para os próximos períodos em que se espera um crescimento de até 5% para a UC 1.

Figura 30 – Análise para a UC 1 com crescimento projetado de 5%



Fonte: Autoria própria

4.2 UTFPR – UC 2

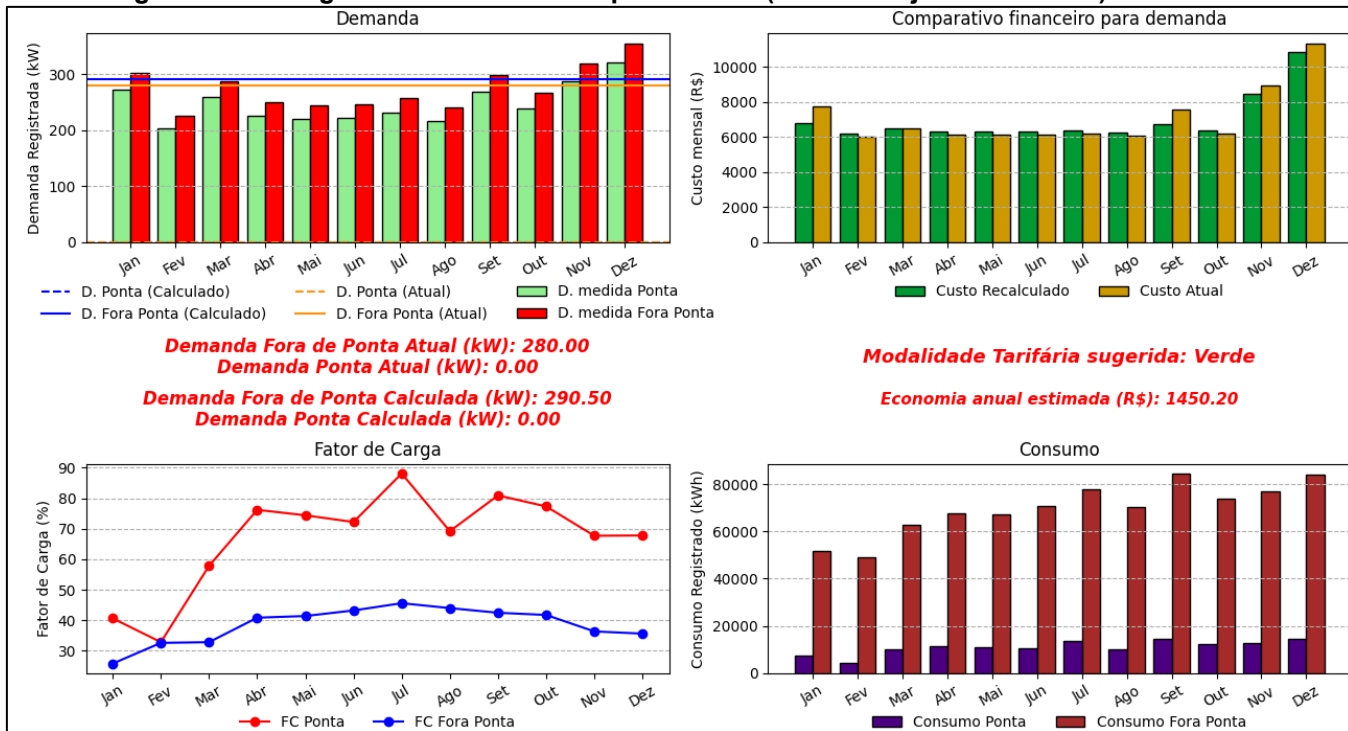
No caso da UC 2, utilizou-se os dados de consumo e demanda do período entre janeiro de 2012 a dezembro de 2014 (dados apresentados na Tabela A2). Entretanto, os dados foram divididos e avaliados em três períodos distintos. Devido a situação de pandemia global no período de 2019 a 2022, o consumo e demanda da UC 2 (universidade) sofreram alterações significativas. Somado a esta situação, a universidade conta ainda com um sistema próprio de geração fotovoltaica. Desta maneira, o estudo de caso foi realizado no período mencionado acima, em que a universidade não possuía sistema de geração fotovoltaica e operava no período pré-pandemia.

Portanto, o estudo de caso para a instituição foi realizado em três intervalos diferentes, 1) janeiro de 2013 a dezembro de 2013; 2) janeiro de 2014 a dezembro de 2014 e 3) janeiro de 2015 a dezembro de 2015, respectivamente. Além disso, foram consideradas as demandas contratadas de 280 kW, 380 kW e 450 kW, conforme o Quadro 4, em cada período. Tal divisão foi realizada pois houve aumento da demanda contratada nos períodos ou logo após os períodos supracitados. Nesse sentido, tornou-se possível avaliar o valor da demanda contratada 'ótima' para cada período,

bem como verificar se o aumento da demanda contratada na época foi o mais vantajoso do ponto de vista de economia financeira nos períodos em análise.

Para a realização do estudo de caso da UC 2, em cada período de tempo em análise, foram utilizadas as tarifas em vigor para o subgrupo A4 da concessionária Copel. A Figura 31 apresenta a tela gráfica de resultados para o primeiro período considerado no estudo de caso (janeiro a dezembro de 2013).

Figura 31 – Tela gráfica dos resultados para a UC 2 (Período 1: jan/13 – dez/13)

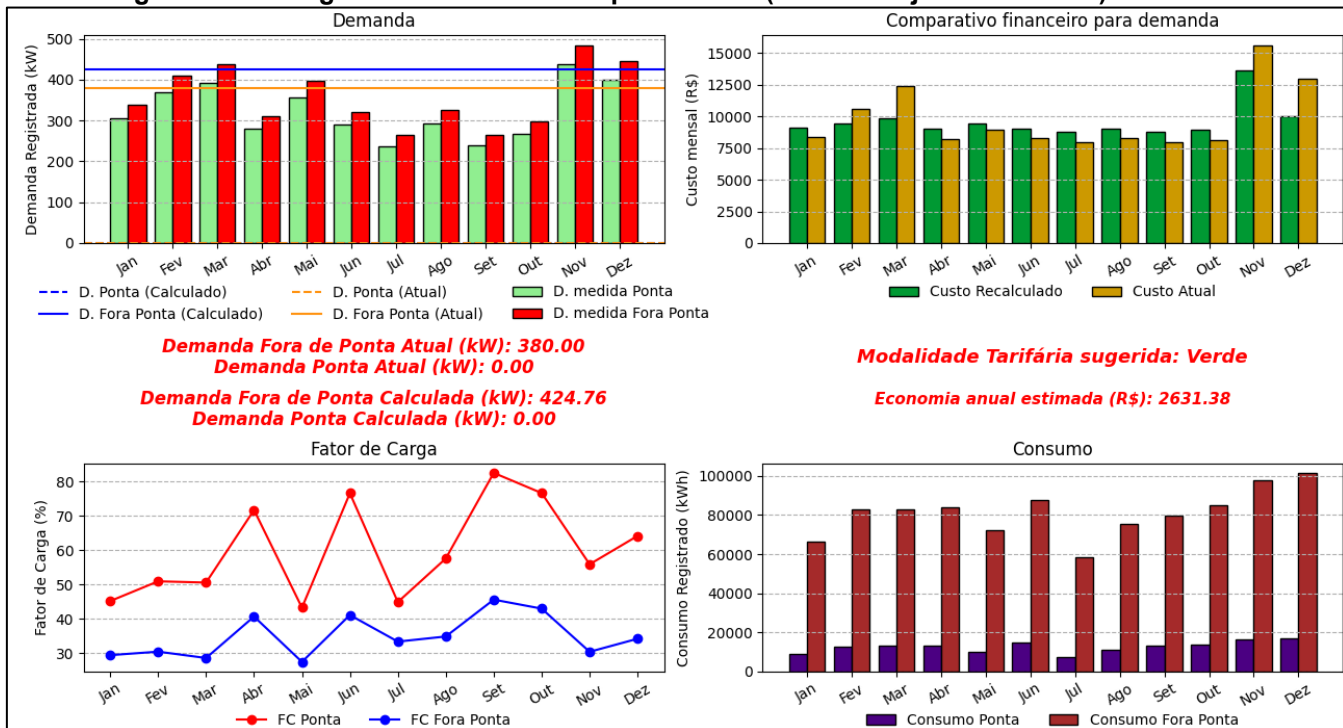


Fonte: Autoria própria

Neste caso, a melhor modalidade tarifária para a UC 2 se manteve como sendo a modalidade tarifária verde. A demanda contratada sugerida aumentou de 280 kW para 290.50 kW, resultando em uma estimativa de economia anual de aproximadamente R\$ 1450.20 (entre janeiro e dezembro de 2013).

A Figura 32 apresenta a tela gráfica de resultados para o segundo período considerado no estudo de caso (janeiro a dezembro de 2014).

Figura 32 – Tela gráfica dos resultados para a UC 2 (Período 2: jan/14 – dez/14)

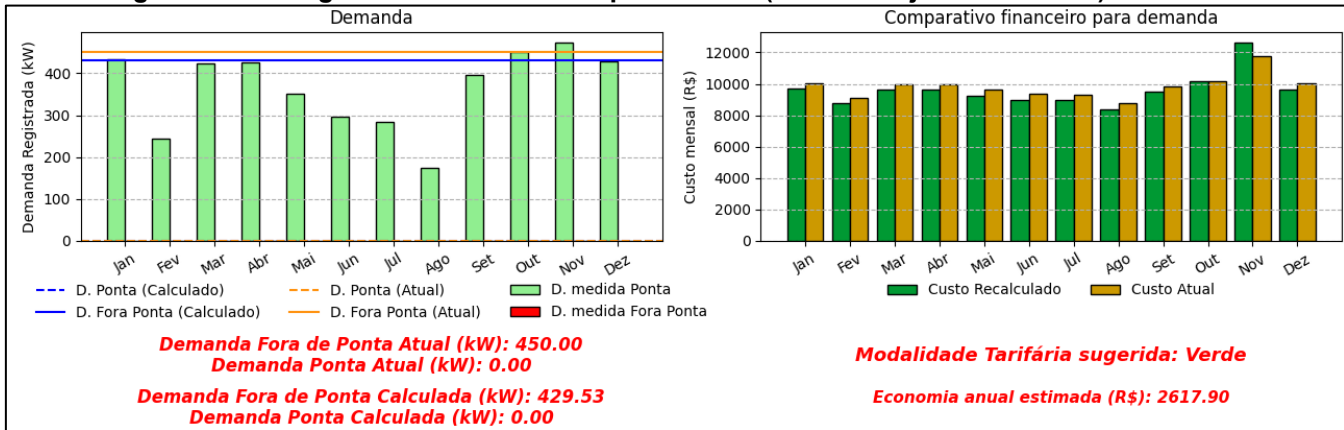


Fonte: Autoria própria

Neste caso, a melhor modalidade tarifária para a UC 2 se manteve como sendo a modalidade tarifária verde. A demanda contratada sugerida aumentou de 380 kW para 424.76 kW, resultando em uma redução no período de estudo (janeiro a dezembro de 2014) estimada em R\$ 2631.38.

A Figura 33 apresenta a tela gráfica de resultados para o terceiro período considerado no estudo de caso (janeiro a dezembro de 2015). Para o período em questão, se teve acesso apenas a demanda faturada, sendo assim, para fins de cálculo de redução de custo bem como a demanda contratada 'ótima', se utilizou do artifício de preenchimento apenas das demandas faturadas considerando as mesmas como sendo em horário de ponta (horário fora de ponta foi anulado com preenchimento nulo), tal artifício utilizado não interfere no cálculo da demanda 'ótima' e no cálculo da redução de custo, apenas interfere no cálculo do fator de carga.

Figura 33 – Tela gráfica dos resultados para a UC 2 (Período 3: jan/15 – dez/15)



Fonte: Autoria própria

Com a avaliação da ferramenta, a demanda contratada teve uma redução de 450 kW para 429.53 kW, resultando em uma economia financeira no período de estudo (janeiro a dezembro de 2015) estimada em R\$ 2617.90. Como para o terceiro período em análise, se teve acesso apenas as demandas faturadas, não é cabível de se analisar a modalidade tarifária para este caso.

4.3 Discussão dos resultados

Os estudos de caso das seções 4.1 e 4.2 tiveram seus resultados comparados com o Modelo de Avaliação dos Contratos de Demanda de Energia (MACDE) do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC), campus de Florianópolis (MACDE, 2022). As comparações realizadas incluem a Demanda Contratada ‘ótima’ resultante e da redução de custo estimada. Não foi possível avaliar a modalidade tarifária, uma vez que o MACDE não avalia qual seria a modalidade tarifária que resultaria em um menor custo para o consumidor.

4.3.1 Comparativo para a UC 1

Submetendo os dados utilizados da UC 1 no MACDE, obteve-se os resultados apresentados na Figura 34.

Figura 34 – Resultados para a UC 1 utilizando o MACDE



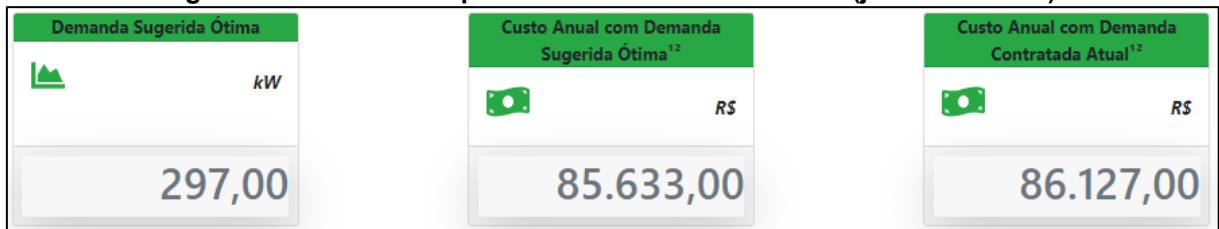
Fonte: MACDE

A demanda contratada 'ótima' foi similar à demanda resultante do estudo da UC 1 por meio do algoritmo desenvolvido. A redução de custos utilizando o MACDE resultou em um total de R\$ 1012. Entretanto, observou-se que o cálculo de custo realizado pelo MACDE é feito de maneira simplificada, uma vez que não leva em consideração a isenção de impostos da demanda contratada não utilizada.

4.3.2 Comparativo para a UC 2

Para a avaliação do estudo de caso 2, foram avaliados três períodos no MACDE. A Figura 35 apresenta os resultados obtidos no MCDE referente ao primeiro período do estudo de caso 2 (janeiro a dezembro de 2013).

Figura 35 – Resultados para a UC 2 utilizando MACDE (jan/13 – dez/13)



Fonte: MACDE

Observou-se que a demanda contratada 'ótima' calculada pelo MCDE também sofreu um aumento quando comparada com a demanda contratada submetida ao estudo do período (janeiro a dezembro de 2013). A demanda contratada 'ótima' possui um valor similar a demanda contratada calculada pela ferramenta desenvolvida nesse trabalho. A redução de custo anual calculada pelo MCDE resultou em R\$ 494, cerca de três vezes menor que a redução calculada pela ferramenta desenvolvida.

A Figura 36 apresenta os resultados obtidos no MCDE referente ao segundo período do estudo de caso 2 (janeiro a dezembro de 2014).

Figura 36 – Resultados para a UC 2 utilizando MACDE (jan/14 – dez/14)



Fonte: MACDE

Observou-se que a demanda contratada 'ótima' calculada pelo MCDE aumentou em relação a demanda contratada real do período 2 (de 380 kW para 431

kW). Ambas as demandas contratadas sugeridas, calculadas pela ferramenta desenvolvida e pelo MCDE, resultaram em valores similares. Por outro lado, a estimativa anual de economia calculada pelo MCDE resultou em um valor inferior (R\$ 2517.00) ao valor calculado pela ferramenta desenvolvida (R\$ 2631.38).

A Figura 37 apresenta os resultados obtidos no MCDE referente ao último período do estudo de caso 2 (janeiro a dezembro de 2015).

Figura 37 – Resultados para a UC 2 utilizando o MACDE (jan/15 – dez/15)

Demanda Sugerida Ótima	Custo Anual com Demanda Sugerida Ótima ¹²	Custo Anual com Demanda Contratada Atual ¹²
kW	R\$	R\$
436,00	120.461,00	122.978,00

Fonte: MACDE

O estudo do período realizado no MCDE (436 kW) resultou em uma demanda contratada 'ótima' similar ao valor calculado pela ferramenta (429,53 kW). Juntamente com a demanda contratada, a redução de custo calculada através de ambas as ferramentas ficou similar.

4.3.3 Comparativo geral

O resultado da demanda contratada 'ótima' calculada pelo MACDE considera um crescimento percentual de no mínimo 1% na demanda contratada (fator de segurança). A Tabela 1 apresenta as demandas contratadas 'ótimas' reais calculadas pelo MACDE (sem acréscimo de 1%), juntamente com as demandas contratadas sugeridas calculadas pela ferramenta desenvolvida para cada estudo de caso realizado.

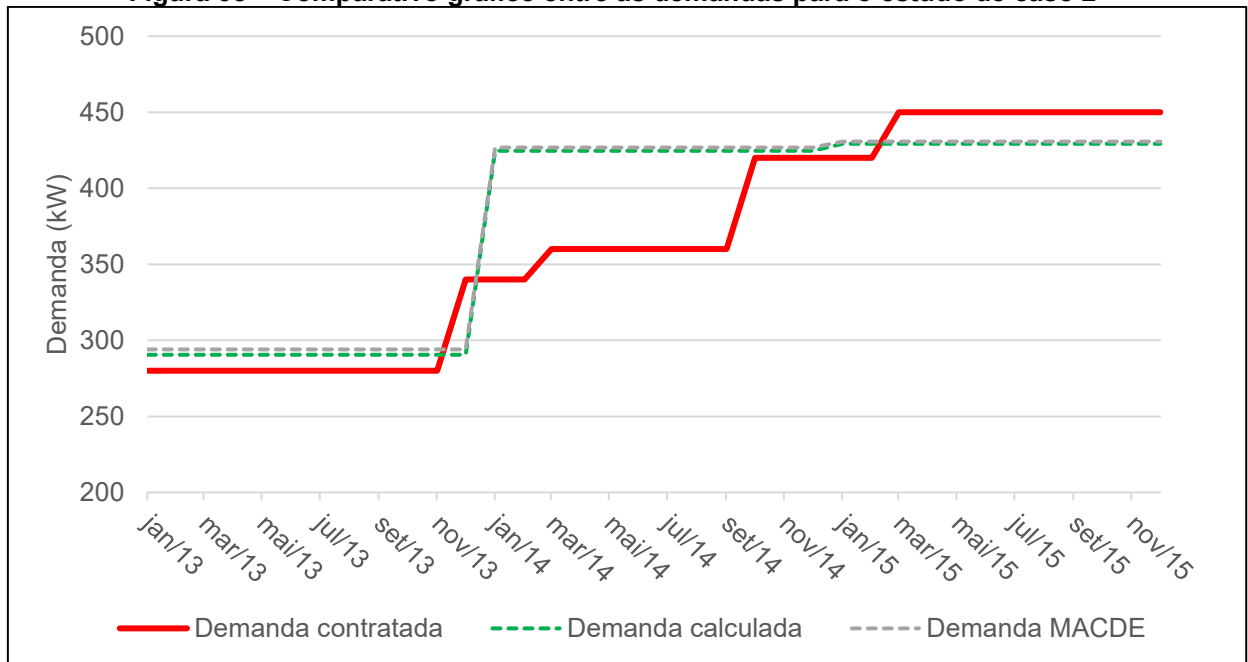
Tabela 1 – Comparativo entre demandas 'ótimas' calculadas

Estudo de caso	Demanda Contratada (kW)	Demanda Calculada (kW)		Diferença percentual (%)
		MACDE	Ferramenta Desenvolvida	
UC 1	50	45,54	45,91	0,805%
UC 2 – Período 1	280	294	290,5	1,205%
UC 2 - Período 2	380	426,73	424,76	0,464%
UC 2 - Período 3	450	430,7	429,53	0,272%

Fonte: Autoria própria

A Figura 38 apresenta o comparativo gráfico, para o estudo de caso 2, entre a demanda contratada real ao longo dos meses e a demanda contratada calculada pela ferramenta desenvolvida e pelo MACDE para os três períodos diferentes em que o estudo de caso foi realizado. Analisando a Figura 38, percebe-se que a diferença percentual entre os valores sugeridos pela ferramenta desenvolvida e pelo MACDE são pequenas.

Figura 38 – Comparativo gráfico entre as demandas para o estudo de caso 2



Fonte: Autoria própria

A Tabela 2 apresenta o comparativo entre a redução de custo calculada pelo MACDE em relação ao valor calculado pela ferramenta desenvolvida para cada estudo de caso realizado, incluindo a diferença percentual entre ambos.

Tabela 2 – Comparativo entre reduções de custo calculadas

Estudo de caso	Redução de custo (R\$)		Diferença percentual (%)
	MACDE	Ferramenta Desenvolvida	
UC 1	1012	775,72	30,46
UC 2 – Período 1	494	1450,20	-34,06
UC 2 - Período 2	-90	2631,38	-
UC 2 - Período 3	2517	2617,90	-3,85

Fonte: Autoria própria

Tal divergência de economias calculadas entre ambas as ferramentas apresentada na Tabela 2 pode ser explicada por dois fatores principais: (i) o MACDE realiza o cálculo de estimativa de custos apenas com uma tarifa de demanda (R\$/kW),

denominada de “Tarifa Média” e (ii) o cálculo da estimativa de custo realizada no MACDE considera como base a demanda contratada com 1% de acréscimo.

Nas simulações realizados no MACDE, considerou-se apenas a tarifa de demanda com impostos. Com isso, quando existe uma diferença positiva entre a demanda contratada e a demanda faturada, esta diferença é faturada com a tarifa informada (tarifa com impostos). Em resumo, o MACDE não considera a isenção do pagamento de impostos para a parcela de demanda contratada e não utilizada e, portanto, fornece valores diferentes dos calculados pela ferramenta desenvolvida.

Para validar os resultados de economia anual estimada calculada pela ferramenta desenvolvida, foi realizado uma análise manual (utilizando o Excel), verificando a economia resultante quando comparado ao faturamento do período com a demanda contratada atual e o faturamento do período com a demanda contratada calculada pela ferramenta. A Tabela 3 apresenta o comparativo da análise realizada, validando os resultados obtidos pela ferramenta desenvolvida.

Tabela 3 – Verificação de economia calculada

Estudo de caso	Redução de custo (R\$)		Diferença percentual (%)
	Verificação manual	Ferramenta	
UC 1	775,98	775,72	0,034
UC 2 - Período 1	1450,20	1450,20	-
UC 2 - Período 2	2630,53	2631,38	0,032
UC 2 - Período 3	2617,70	2617,90	-

Fonte: Autoria própria

Também foi realizado uma verificação para as demandas calculadas pelo MACDE para tal, o valor da tarifa de demanda sem imposto foi utilizado igualmente ao valor da tarifa de demanda com imposto. Com isso, a isenção do pagamento de impostos sobre a demanda contratada e não utilizada é desconsiderada, com o objetivo de validar a metodologia empregada pelo MACDE para a estimativa de custos. A Tabela 4 apresenta o comparativo de cálculo do MACDE em relação ao valor calculado no Excel.

Tabela 4 – Validação de cálculo de economia do MACDE

Estudo de caso	Custos anual com demanda sugerida 'ótima' (R\$)		Diferença percentual (%)
	Verificação manual	MACDE	
UC 1	12508,37	12470,00	0,307
UC 2 - Período 1	85633,17	85633,00	-
UC 2 - Período 2	120326,62	120326,00	-
UC 2 - Período 3	120461,67	120461,00	-

Fonte: Autoria própria

Por fim, a Tabela 5 apresenta o percentual do custo anual da demanda que a redução calculada com a nova demanda sugerida representa.

Tabela 5 – Representação da redução no custo anual para demanda

Estudo de caso	Redução de custo anual (R\$)	Redução percentual (%)
UC 1	775,98	5,96
UC 2 - Período 1	1450,2	1,71
UC 2 - Período 2	2630,53	2,24
UC 2 - Período 3	2617,7	2,22

Fonte: Autoria própria

5 CONCLUSÕES

A ferramenta desenvolvida neste trabalho permite a avaliação da demanda contratada e modalidade tarifária mais adequadas de UCs do Grupo A. Uma das vantagens adicionais é a realização de estudos de previsão para a demanda contratada futura com base em um determinado crescimento previsto da UC. Ressalta-se que é possível realizar apenas a análise da demanda contratada, como realizado no terceiro período do estudo de caso na Seção 4.2.

A implementação do algoritmo genético para o cálculo da demanda contratada 'ótima' através de dados do histórico de faturas da UC apresentou resultados satisfatórios. Ressalta-se que os cálculos realizados podem ser obtidos por meio de outros métodos de resolução, como por exemplo o método de busca exaustiva, que consiste em avaliar demandas contratadas submetidas aos dados do histórico de faturas da UC e posteriormente verificar qual a demanda contratada ideal para cada posto horário (ponta e/ou fora de ponta) que tende a resultar no menor custo estimado para o período. Por outro lado, a utilização de métodos tradicionais (como o método de busca exaustiva) pode resultar em complexidades adicionais caso sejam inseridos um conjunto de variáveis adicionais no modelo (conforme será apresentado na seção adiante de sugestão de trabalhos futuros). Nesse sentido, o algoritmo genético se mostra como uma alternativa com maior robustez.

Os estudos de caso realizados resultaram em casos em que a demanda contratada 'ótima' calculada foi superior à demanda contratada atual, e casos em que a demanda contratada 'ótima' foi inferior a demanda contratada atual, porém, ambos os casos resultaram em uma estimativa de redução de custo anual da fatura da UC.

Comparou-se também os resultados obtidos pela ferramenta desenvolvida em relação aos resultados apresentados pela ferramenta MACDE, para a demanda contratadas sugerida. A diferença entre as demandas contratadas calculadas por ambas ferramentas não foi significativa em termos percentuais, validando-se o algoritmo proposto. As pequenas divergências percentuais dos resultados para a demanda contratada sugerida podem ser explicadas devido ao fato de (i) o método de resolução ser diferente de cada algoritmo e (ii) o MACDE não leva em consideração as casas decimais das demandas faturadas. Com relação a estimativa de custos finais, as diferenças percentuais foram significativas e podem ser explicadas, sobretudo, devido a uma simplificação considerada pela ferramenta MACDE, em que

considera uma tarifa média para a realização dos cálculos, não levando em conta a isenção de impostos existente sobre a demanda contratada não utilizada. Além disso, o MACDE considera o acréscimo de 1% na contratação para estimar os custos finais.

Em termos gerais, a ferramenta desenvolvida, além de realizar o cálculo da demanda contratada, possui como vantagens adicionais: (i) a indicação da modalidade tarifária mais adequada (desde que o mesmo esteja apto a escolher qual modalidade deseja se enquadrar) e (ii) considera as componentes tarifárias (com e sem imposto) para o período de ponta e fora de ponta, resultando em uma maior precisão com relação ao faturamento previsto para a UC caso implemente tais modificações.

Os estudos de caso realizados indicaram uma economia anual estimada para a UC 1 de R\$ 775,72. Realizando a análise considerando um crescimento percentual de 5%, foi possível concluir que a demanda contratada atual estaria adequada para tal crescimento. Para a UC 2, as reduções nos períodos 1, 2 e 3 foram respectivamente, R\$ 1450,20, R\$ 2631,38 e R\$ 2617,90 totalizando em uma economia total estimada em R\$ 6699,48 considerando os três anos avaliados (desconsiderando crescimento percentual para a UC 2).

De modo geral, a modalidade tarifária azul tende a ser preferível em relação à modalidade tarifária verde (em termos econômicos) para altos fatores de carga no horário de ponta. Isso ocorre devido ao fato de que apesar da TUSD demanda na ponta (R\$/kW) na modalidade azul ser superior ao valor da modalidade verde, há uma redução significativa referente a tarifa TUSD energia na ponta (R\$/kWh) na modalidade azul em relação à modalidade verde. Isso significa que, em termos gerais, a modalidade azul tende a ser economicamente mais vantajosa em relação a modalidade verde quando a UC apresentar um consumo de energia elétrica elevado na ponta, isto é, um alto fator de carga nesse período.

Os resultados para todos os casos analisados indicaram a modalidade tarifária verde como a melhor opção (em termos econômicos). Ao analisar o fator de carga na ponta, percebe-se um valor inferior a 20% em todos os meses analisados para a UC 1. Por outro lado, para a UC 2, o fator de carga mensal na ponta apresenta variações significativas para cada mês analisado conforme indicado nas Figura 31 e Figura 32.

5.1 Sugestões de Trabalhos Futuros

É importante ressaltar que os resultados obtidos nesse trabalho representam uma aproximação da realidade, tendo em vista que as tarifas de energia podem oscilar no futuro e também o padrão de consumo de cada UC pode sofrer modificações ao longo do tempo.

Para trabalhos futuros, ressalta-se a possibilidade de levar em consideração um conjunto adicional de variáveis para o cálculo da demanda contratada sugerida, como por exemplo, a inclusão do impacto de um sistema de geração fotovoltaica. Ressalta-se que a geração fotovoltaica afeta diretamente a curva de carga da UC e, conseqüentemente, a demanda de potência ativa proveniente da rede, o que pode impactar no cálculo otimizada da demanda a ser contratada.

Além da geração fotovoltaica, no modelo implementado, é necessário que o usuário preencha manualmente os valores de tarifas de consumo e demanda, nesse sentido, se propõe o desenvolvimento de um *web scraping* para obter diretamente do site da concessionária desejada os valores das tarifas atuais. Somado a isso, é possível realizar o cálculo da demanda contratada sugerida considerando a variação dos valores das tarifas.

A inserção do crescimento previsto nos cálculos implementados, foi realizada de maneira simples, em que o crescimento é inserido diretamente nas demandas faturadas, e a partir disto os cálculos são feitos. Propõe-se ainda a realização das estimativas de crescimento previsto da UC por meio de séries temporais, ou modelos similares, em que o objetivo é prever futuras demandas através do crescimento previsto informado de uma maneira mais sofisticada, e a partir das demandas previstas realizar os cálculos para demanda contratada sugerida. O uso de modelos de previsão também pode ser utilizado para a projeção das tarifas futuras.

Ainda mais, se propõe implementar na ferramenta a possibilidade de o consumidor informar se houve ou não aumento da demanda contratada no período em que os cálculos serão realizados, tornando a ferramenta mais completa e preparada para fatos como o estudo da UC 2, em que houve a existência de aumento da demanda contratada durante os períodos de estudo. Nesses casos, a ferramenta poderia sugerir quando (em que mês) poderia ser realizada a nova solicitação de demanda.

Sugere-se ainda como trabalho futuro, a adição na ferramenta de um gráfico que indique o ponto de equilíbrio entre as modalidades tarifárias azul e verde em função do fator de carga na ponta, ou seja, indicando a partir de qual valor do fator de carga na ponta que a tarifa azul passa a ser mais vantajosa economicamente do que a modalidade verde.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, Felipe Oliveira. Otimização Robusta Aplicada à Contratação de Energia Elétrica considerando incerteza na Demanda Futura. , p. 75, 2015.
- ANEEL. Resolução Normativa N° 479. 2012.
- ANEEL. Sobre Bandeiras Tarifárias — Português (Brasil). 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/tarifas/bandeiras-tarifarias>. Acessado em: 7 Nov. 2022.
- AZEVEDO, Thales Bruno Costa de. Otimização da Demanda de Potência Contratada Utilizando Algoritmos Genéticos: O caso do Campus Central da UFRN. , p. 7, 2019.
- CASA CIVIL. Presidência da República. , p. 1–18, 1996.
- CASA CIVIL. Presidência da República. , p. 1–28, 2004.
- CHEN, Chiung-Yao; LIAO, Ching-Jong. A linear programming approach to the electricity contract capacity problem. **Elsevier**, 2011.
- EPE. Planejamento Energético Planejamento de Curto e Médio Prazo. 2022. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/areas-de-atuacao/planejamento-energetico/planejamento-de-curto-e-medio-prazo>. Acessado em: 7 Nov. 2022.
- EPE; ONS; CCEE. Previsão de carga para o Planejamento Anual da Operação Energética do Sistema Interligado Nacional (2022-2026). vol. 2016, p. 1–11, 2022.
- FORREST, S. Genetic Algorithms. **Comprehensive Chemometrics**, vol. 1, no. 1, p. 631–653, 1996.
- FOSSA, Alberto José; SGARBI, Felipe de Albuquerque. Gestão de energia - Guia para aplicação da Norma ABNT NBR ISO 50001. , p. 82, 2018.
- MACDE. Modelo de Avaliação dos Contratos de Demanda de Energia (MACDE). 2022. Disponível em: <https://gese.florianopolis.ifsc.edu.br/macde/>. Acessado em: 7 Nov. 2022.
- MARANGONI, Filipe; FERREIRA, Samir De Oliveira; KONOPATZKI, Evandro André. DETERMINATION OF GREAT DEMAND FOR ENSURING. 2015.
- MATHEW, Tom V. Genetic algorithm for the pair distribution function of the electron gas. **Interdisciplinary Sciences – Computational Life Sciences**, vol. 3, no. 4, p. 283–289, 2012.
- MME. Portaria N° 465. , p. 156, 2019.
- MME. Sistema de Gestão de Energia e ISO 50.001 — Português (Brasil). 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/iso-50001>. Acessado em: 7 Nov. 2022.
- MME; ANEEL. Diário oficial da união. , p. 1–170, 2021.
- SACCARO, Eleandro Jose; CORSO, Leandro Luís. Otimização de contratação de demanda de potência ativa por meio do uso de algoritmos genéticos. **Scientia cum Industria**, vol. 7, no. 2, p. 88–93, 2019.
- SASTRY, Kumara; GOLDBERG, David; KENDALL, Graham. Chapter 4 Genetic

Algorithms. **Search Methodologies** , p. 97–125, 2005.

SIVANANDAM, S; DEEPA, S. Genetic Algorithms. In: Introduction to Genetic Algorithms. , p. 15–16, 2008.

TSAY, M-T; LIN, W-M; LEE, J-L. Optimal contracts decision of industrial customers. **Elsevier**, 2001.

J. D. Hunter. "Matplotlib: A 2D Graphics Environment", Computing in Science & Engineering, vol. 9, no. 3, p. 90-95, 2007.

Harris, C.R.; Millman, K.J.; van der Walt; S.J. et al. Array programming with NumPy. Nature 585, p. 357–362 ,2020.

Van Rossum, G. The Python Library Reference, release 3.8.2. Python Software Foundation, 2020.

APÊNDICE A

Tabela A1: Histórico de consumo e demanda da UC 1

MÊS/ANO	CONSUMO (kWh)			DEMANDA CONTRATADA (kW)	Demanda medida (kW)	
	PONTA	FORA DE PONTA	TOTAL		PONTA	FORA DE PONTA
set/21	208	5414	5622	50	18,4	45,51
out/21	183	6054	6237	50	17,61	48,16
nov/21	172	6184	6356	50	18,15	47,97
dez/21	131	5847	5978	50	15,35	44,18
jan/22	104	5303	5407	50	13,13	46,54
fev/22	189	5424	5613	50	25,48	39,06
mar/22	73	3411	3484	50	10,77	36,26
abr/22	77	4346	4423	50	11,61	39,7
mai/22	120	3568	3688	50	33,6	42,5
jun/22	190	4652	4842	50	37,53	42,7
jul/22	171	4160	4331	50	35,57	40,73
ago/22	62	2448	2510	50	25,43	32,07

Tabela A2: Histórico de consumo e demanda da UC 2

MÊS/ANO	CONSUMO (kWh)			DEMANDA CONTRATADA (kW)	Demanda medida (kW)	
	PONTA	FORA DE PONTA	TOTAL		PONTA	FORA DE PONTA
jan/13	7320	51748	59068	280	273	302
fev/13	4399	48917	53316	280	203	226
mar/13	9888	62772	72660	280	259	288
abr/13	11317	67812	79129	280	225	250
mai/13	10805	67073	77878	280	220	244
jun/13	10533	70602	81135	280	221	246
jul/13	13492	77814	91306	280	232	257
ago/13	9865	70106	79971	280	216	240
set/13	14370	84313	98683	280	269	299
out/13	12196	73732	85928	280	239	266
nov/13	12826	77008	89834	280	287	319
dez/13	14320	83975	98295	340	320	355
jan/14	9101	66272	75373	340	305	339
fev/14	12411	82939	95350	340	369	410
mar/14	13124	83025	96149	360	393	437
abr/14	13209	84031	97240	360	279	311
mai/14	10199	72438	82637	360	357	397
jun/14	14667	87956	102623	360	290	322
jul/14	7056	58536	65592	360	238	264
ago/14	11179	75511	86690	360	294	326
set/14	13022	79983	93005	360	239	264
out/14	13563	85087	98650	420	268	298
nov/14	16130	97994	114124	420	437	485
dez/14	16989	101354	118343	420	401	446
jan/15	8693	70574	79267	420	433	-
fev/15	5801	64262	70063	420	243	-
mar/15	9516	71486	81002	450	423	-
abr/15	16585	98253	114838	450	425	-
mai/15	12193	77765	89958	450	351	-
jun/15	14709	86390	101099	450	297	-
jul/15	11851	77712	89563	450	285	-
ago/15	6044	56079	62123	450	174	-
set/15	14252	83426	97678	450	397	-
out/15	13883	85106	98989	450	451	-
nov/15	16565	97221	113786	450	474	-
dez/15	15499	94309	109808	450	428	-