

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CAMPUS CORNÉLIO PROCÓPIO
ENGENHARIA ELÉTRICA

BRUNO EDUARDO ESTEVES DE LIMA

**UMA PROPOSTA PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO PSO EM PROGRAMAS DE
GERENCIAMENTO DE CARGA PELO LADO DA DEMANDA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2020

BRUNO EDUARDO ESTEVES DE LIMA

UMA PROPOSTA PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO PSO EM PROGRAMAS DE GERENCIAMENTO DE CARGA PELO LADO DA DEMANDA

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel.

Orientador: Prof. Dr. Edson A. R. Theodoro



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento Acadêmico de Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Bruno Eduardo Esteves de Lima

UMA PROPOSTA PARA APLICAÇÃO DO MÉTODO PSO EM PROGRAMAS DE GERENCIAMENTO DE CARGA PELO LADO DA DEMANDA

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 14:00hs do dia 04/09/2020 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Edson Aparecido Rozas Theodoro - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Luiz Francisco Sanches Buzachero - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Murilo da Silva - (Membro)

Dedico este trabalho à Deus, à minha família, à minha namorada e meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me dar o prazer da vida.

Em segundo, agradeço a minha família, que sempre me ensinou os valores da vida, ter respeito, ser honesto e sempre manter a humildade. Em especial ao meu pai, Rogério Eduardo de Lima, que sempre foi minha referência e sempre me incentivou aos estudos, sei que ele está orgulhoso de mim, e está sempre comigo. À minha mãe, Sônia Margarete Esteves de Lima, por sempre me dá todo apoio e aos meus irmãos, Karine e Eduardo, por todo suporte a nossa família e por não me deixar desistir quando fracassei.

Em terceiro, ao meu orientador Prof. Dr. Edson Aparecido Rozas Theodoro, pelos anos de trabalho que fizemos, e por compartilhar um pouco de sua sabedoria com que me guiou nesta trajetória.

Agradeço aos meus colegas de sala, em especial ao Dream Team.

A Secretaria do Curso, pela cooperação.

Enfim, a todos os que por algum motivo contribuíram para a realização desta pesquisa.

“No que se diz respeito ao empenho, ao compromisso, ao esforço e à dedicação, não existe meio termo. Ou você faz uma coisa bem feita, ou não faz.”
(Ayrton Senna).

RESUMO

LIMA, B. E. E. **Uma proposta para aplicação do método PSO em programas de GLD**. 2020. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

As técnicas de Redes Elétricas Inteligentes (*Smart Grid*) e as atividades da resposta da demanda estão possibilitando que consumidores consigam criar meios para que diminuam sua conta de energia elétrica, seja pela capacidade de possuir uma geração distribuída ou simplesmente pelo gerenciamento de carga. Graças ao avanço de pesquisas em métodos de gerenciamento pelo lado da demanda (GLD) e por incentivos governamentais, estão surgindo alternativas para aliviar a demanda do sistema elétrico em momentos específicos.

Através destes programas de GLD, os consumidores podem alterar seu instante de acionamento de acordo com o preço da tarifa no momento e assim modificar sua curva de carga. Métodos de otimização estão sendo desenvolvidos para gerenciar as cargas das residências de modo a otimizar o consumo de energia elétrica.

Neste trabalho o método de otimização (PSO, do inglês *particle swarm optimization*), será aplicado para o gerenciamento de carga em uma residência. O comportamento das cargas será aproximado a uma função gaussiana a fim de permitir uma modelagem da carga variável no tempo mais fidedigna às suas inércias. Também será inserido na função custo o fator de inconveniência, estipulado de acordo com o conforto do consumidor com o objetivo de propiciar a personalização da ferramenta por cada usuário.

Palavras-chave: Gerenciamento pelo Lado da Demanda. Otimização por Enxame de Partículas. Deslocamento de carga. Tarifa Branca. Redes Elétricas Inteligentes.

ABSTRACT

LIMA, B. E.E. **A proposal for the PSO method application in GLD programs.** 2020. 56 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Engenharia Elétrica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2020.

Smart grid techniques and demand response actions are enabling consumers to create ways to reduce their electric bills, either through installing distributed generation or simply through load management. By the advances in demand side management (GLD) and incentives from governments, alternatives are emerging to alleviate the electrical system at specific times.

Through these GLD programs, consumers can change their triggering moment according to the tariff price at the moment and thus modify their load curve. Optimization methods are being developed to manage loads in homes in order to optimize energy consumption.

In this work, the particle swarm optimization method will be applied for load management at a single residence. The behavior of the loads will be approximate to a Gaussian function in order to model the time response more reliably with respect to their inertia. The inconvenience factor will be inserted in the cost function, stipulated according to the consumer's comfort, allowing to personalize the proposed tool to each individual necessity.

Keywords: Demand Side Management. Particle Swarm Optimization. White Tariff. Load Displacement. Smart Grid.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Intervalo de Conforto para acionamento das cargas	22
Tabela 2 - Posição das partículas ao longo das iterações no PSO tradicional para a solução ótima da função	28
Tabela 3 - Funções Benchmark.....	29
Tabela 4 - Dados obtidos com a melhor partícula do enxame.....	30
Tabela 5 - Características das cargas.....	40
Tabela 6 - Perfil de Consumidor - Trabalhador(a) Diurno.....	42
Tabela 7 - Perfil de Consumidor - Trabalhador(a) Noturno.....	42
Tabela 8 - Perfil de Consumidor – Trabalhador(a) do lar.....	43
Tabela 9 - Patamares da tarifa Branca ao longo do dia.....	44
Tabela 10 - Tarifa Branca B1 – Residencial.....	45
Tabela 11 - Ciclo diário para clientes Baixa Tensão.....	45
Tabela 12 - Preços Tarifários Alfa Energia.....	46
Tabela 13 - Períodos do ToU Alectra Utilities.....	46
Tabela 14 - Valor pago por dia de uso das instalações sem gerenciamento de carga pelo lado da demanda	49
Tabela 15 – Média, mínimo e desvio padrão do valor pago pelo consumo de energia elétrica com o gerenciamento de carga pelo lado da demanda nas 1000 repetições	50
Tabela 16 – Média, mínimo e desvio padrão do valor pago pelo consumo de energia elétrica com o gerenciamento de carga pelo lado da demanda e inserido o fator de inconveniência nas 1000 repetições	51
Tabela 17 - Instante de acionamento utilizando gerenciamento (PSO) na tarifa brasileira	52
Tabela 18 - Instante de acionamento utilizando gerenciamento (PSO) na tarifa portuguesa.....	52
Tabela 19 - Instante de acionamento utilizando gerenciamento (PSO) na tarifa canadense.....	53
Tabela 20 - Instante de acionamento utilizando gerenciamento (PSO) com o fator de inconveniência na tarifa brasileira	54
Tabela 21 - Instante de acionamento utilizando gerenciamento (PSO) com o fator de inconveniência na tarifa portuguesa	55
Tabela 22 - Instante de acionamento utilizando gerenciamento (PSO) com fator de inconveniência na tarifa canadense	55
Tabela 23 - Redução percentil do valor pago pelo consumo de energia elétrica com o gerenciamento de carga.....	56
Tabela 24 - Redução percentil do valor pago pelo consumo de energia elétrica com o gerenciamento de carga e inserido o fator de inconveniência.....	57
Tabela 25 - Resultado da pesquisa para o perfil trabalhador(a) noturno	77

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	9
2 PROPOSTA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO	13
2.1 Objetivo geral	13
2.2 Objetivos específicos	13
3 METODOLOGIA	14
3.1 Conceito de Smart Grid	14
3.2 Gerenciamento pelo Lado da Demanda	15
3.3 Tipos de programas de GLD	16
3.4 Tarifa Branca	17
3.5 Comportamento de cargas em unidades residenciais	18
3.6 Função objetivo para aplicação de GLD	19
3.7 Fator de Inconveniência	21
3.8 Métodos de otimização para o GLD	23
4 PARTICLE SWARM OPTIMIZATION	24
4.1 Demonstração do Funcionamento do método PSO	26
4.1.1 Cálculo numérico utilizando um enxame de 2 partículas	27
4.1.2 Cálculo numérico utilizando MATLAB para o enxame de 2 partículas.....	28
4.1.3 Aplicação do PSO em outras funções	29
5 VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO PSO	31
5.1 Realocar uma carga do instante de maior valor da tarifa para o instante de menor valor	32
5.2 Realocar uma carga inserindo o intervalo de restrição.....	33
5.3 Realocar duas cargas do instante de maior valor da tarifa para o instante de menor valor	34
5.4 Realocar duas cargas inserindo o intervalo de restrição.....	35
5.5 Realocar a carga com tempo preferencial no horário de pico	36
5.6 Validação do algoritmo PSO aplicado na função de Vidal e Batsita (2014)	37
6 CENÁRIO DE ESTUDO DA APLICAÇÃO DO GLD	40
6.1 Cargas de Residências	40
6.2 Perfil de consumidores	41
6.3 Tarifa variável	43
6.3.1 Tarifa brasileira	44

6.3.2 Tarifa portuguesa.....	45
6.3.3 Tarifa canadense	46
7 RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
REFERÊNCIAS.....	61
APÊNDICE A – Resultado da Pesquisa de perfil de consumidor	64

1 INTRODUÇÃO

O aumento do consumo de energia elétrica oriundo do elevado avanço tecnológico, e a busca por fontes alternativas de energia, estão fazendo com que os sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica fiquem sobrecarregados (MEYABADI, DEIHIMI, 2017; MOSTAFA, SHATSHAT, 2014).

Sendo assim, há duas estratégias na operação do sistema de energia para suprir a demanda total prevista: expandir a geração de eletricidade que fornece novas fontes de energia pelo lado do fornecedor, ou empregar medidas gerenciais sobre os recursos utilizados pelo lado da demanda (MOSTAFA, SHATSHAT, 2014).

Tratando de medidas gerenciais pelo lado da demanda, surgiu o conceito mais geral de *Smart Grid*. Este conceito engloba o setor de Tecnologia da Informação (TI) e automação aplicado na tecnologia de monitoramento e proteção da rede, assim como possibilita a comunicação interativa entre fornecedores e consumidores de energia em tempo real, sendo assim, ambos são capazes de acompanhar o consumo de energia, sendo possível tomar providências quando necessário (MOSHARI, FREIRE et al, 2011; MOSLEHI, KUMAN, 2010).

O termo gerenciamento de energia, do inglês *energy management*, é uma importante ferramenta dentro do conceito de smart grid e pode ser entendido como “processo de monitoramento, controle e conservação de energia em uma edificação, organização e em sistema de distribuição”, e seu principal objetivo é otimizar a utilização da energia, reduzir custos e desperdício sem afetar a produção e a qualidade, de modo a minimizar os efeitos nocivos ao meio ambiente (MEYABADI, DEIHIMI, 2017).

No mercado elétrico, a resposta da demanda, DR – do inglês *demand response*, têm recebido cada vez mais atenção dos consumidores e das concessionárias de energia. A resposta da demanda pode ser classificada em duas categorias: programas por base do preço e programas a base de incentivos (WANG et al, 2015).

No programa à base de incentivos, é possível subdividir o programa em: controle de carga direta, licitação de demanda, programa de resposta a demanda emergenciais, entre outros. Enquanto no programa à base do preço, é subdividido em preço variante em tempo real - Real Time Pricing, preço de pico crítico - Critical Peak

Pricing e preço em patamares por uso no tempo - Time of Use (SARIFI, FATHI, VAHIDINASAB, 2017).

Neste trabalho, o programa de gerenciamento de carga pelo lado da demanda (GLD) adotado será um método à base do preço que envolve planejamento, análise e implementação de atividades que influenciem o consumidor a modificar a sua curva de carga. Assim, o GLD aqui proposto implica em reduzir ou postergar o investimento em infraestrutura pela concessionária de energia elétrica, como observado na literatura (SILVA, AFFONSO, 2015).

Como justificativa ao presente estudo, observa-se que no Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) criou, com base nos programas de incentivos, a tarifa branca. Este programa sinaliza aos consumidores a variação do valor da energia conforme o dia e o horário de consumo, ou seja, o valor da tarifa varia em três horários: ponta (aquele com maior demanda de energia), intermediário (via de regra, uma hora antes e uma hora depois do horário de ponta) e fora de ponta (aquele com menor demanda de energia) (ANEEL, 2019).

A tarifa branca foi aprovada em 2016, mas há um cronograma a ser seguido para beneficiar os consumidores em geral. Desde janeiro de 2018, a tarifa branca foi autorizada para novas ligações e para unidades consumidoras com média anual de consumo mensal superior a 500 kW/h, em janeiro de 2019 para unidades consumidoras com média anual de consumo mensal superior a 250 kW/h e a partir de janeiro de 2020 para todas as unidades consumidoras (ANEEL, 2019).

Com o objetivo de otimizar o consumo e minimizar o custo, estão sendo desenvolvidos diversos métodos de gerenciamento do consumo de energia elétrica utilizando a nova modalidade tarifária da ANEEL (SILVA, AFFONSO, 2015).

Métodos computacionais heurísticos evolutivos, como algoritmos genéticos GA – do inglês *genetic algorithm*, redes neurais artificiais ANN – do inglês *artificial neural networks*, e otimização por enxame de partículas PSO – do inglês *particle swarm optimization*, estão sendo aplicados para o desenvolvimento do gerenciamento de carga por possuírem uma inteligência computacional capaz de obter soluções para problemas de grande dimensão em um tempo aceitável. Como exemplo de tais aplicações, citam-se nas referências (JAYADEV V, SWARUP, 2013; MORGAN et al, 2013; SIEBERT et al, 2012) o gerenciamento de carga utilizando o algoritmo genético, nas referências (KUNWAR, YASH, KUMAR, 2013; NAZARKO, STYCZYNSKI, 1999)

é utilizado redes neurais e em (FARIA et al, 2013; LOGENTHIRAN, SRINIVASAN, PHYU, 2015) é utilizado o método PSO.

O método PSO tem chamado a atenção dos pesquisadores, por ser de fácil implementação, necessitar o ajuste de poucos parâmetros, ter baixa complexidade computacional e ainda assim ser eficiente quando comparado a outros métodos de otimização heurísticos, tal como o GA (HASSAN, COHANIM, WECK, 2004; KENNEDY, EBERHART, 1995).

No grupo de baixa tensão, os consumidores podem ser divididos em consumidores industriais, comerciais e residenciais (MOSTAFA, SHATSHAT, 2014). Na residência, as cargas podem ser classificadas em cargas controláveis e cargas não controláveis (LOGENTHIRAN, SRINIVASAN, PHYU, 2015).

As cargas não controláveis são aquelas em que o consumidor não possui controle sobre elas, e não devem ser consideradas para o gerenciamento de carga (LOGENTHIRAN, SRINIVASAN, PHYU, 2015).

Já as cargas controláveis são modeladas em: cargas controláveis básicas BLS – do inglês *basic load shift*, no qual o ciclo de trabalho não pode ser interrompido, cargas controláveis interruptas ILS – do inglês *interruptible load shift*, para cargas que permite a interrupção de seu ciclo de operação e o modelo de chaveamento contínuo CS – do inglês *continuous switching*, como por exemplo a baixa ou alta de temperatura em sistema de refrigeração (GRADITI et al, 2015; VLOT, KNIGEE, HANSLOOTWEG, 2013).

Diversas aproximações para o comportamento de cargas são feitas na literatura. Em alguns, este comportamento é expresso apenas pela potência máxima ou média do equipamento enquanto estiver em trabalho, para esta aproximação deve considerar todos os momentos em que o equipamento está em uso (VLOT, KNIGEE, HANSLOOTWEG, 2013). Enquanto em outras, o comportamento de carga pode ser aproximado a uma função gaussiana, no qual o início e fim da gaussiana é considerado pelo tempo de ciclo de trabalho (GRADITI et al, 2015).

A função objetivo utilizada no programa de GLD neste trabalho visa minimizar o custo total pago pelo consumo de energia elétrica respectivo às cargas acionadas em uma residência, considerando tarifas variantes no tempo, como a tarifa branca (VIDAL, BATISTA, 2014).

Neste trabalho a função objetivo será construída por duas abordagens distintas a fim de minimizar o custo total de energia consumida e seus resultados

comparados. Na primeira, a função objetivo será construída a fim de refletir o custo total de energia elétrica. Na segunda, uma curva de carga objetivo ótima será construída a fim de proporcionar um balizamento para o deslocamento de carga no tempo (LOGENTHIRAN, SRINIVASAN, SHUN, 2012; VIDAL, BATISTA, 2014).

Posteriormente será inserido um fator de inconveniência nas funções objetivo, a fim de modelar e possibilitar a minimização do desconforto do usuário da residência, causada pelo deslocamento das cargas (JAYADEV V, SWARUP, 2013).

2 PROPOSTA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Neste capítulo serão apresentados os objetivos propostos neste trabalho a fim de especificar o mapa de estudo e estabelecer os critérios de sucesso para presente trabalho.

2.1 Objetivo geral

Com base nos recentes estudos sobre tarifas variantes no tempo, em particular a tarifa branca, e com a oportunidade de conciliar o gerenciamento de carga com outras técnicas do Smart Grid, como geração distribuída, para que se diminua os gastos advindos do consumo de energia pela concessionária, este trabalho tem como objetivo elaborar uma ferramenta computacional que auxilie no gerenciamento da carga para o consumidor, minimizando o grau de alterações solicitado ao consumidor no controle de carga.

Esta ferramenta auxiliará o consumidor nas tomadas de decisões a respeito de seus equipamentos, podendo decidir os melhores horários para o funcionamento dos mesmos.

Para desenvolvimento desta ferramenta, o método de otimização *particle swarm optimization* será utilizado para a minimização da função objetivo. O desenvolvimento computacional será realizado no software de engenharia MATLAB.

2.2 Objetivos específicos

- Verificar o impacto de tarifas variantes no tempo sobre programas de GLD proposto ao consumidor;
- Avaliar, através do fator de inconveniência, as alterações propostas no controle de carga ao consumidor;
- Comparar a resposta dos programas de GLD utilizando duas abordagens distintas na composição da função objetivo.

3 METODOLOGIA

Para solucionar os problemas advindos do crescente consumo de energia elétrica e a possibilidade de saturação do setor de fornecimento desta energia, há duas estratégias a serem adotadas: aumentar a capacidade de geração de energia e, conseqüentemente, a capacidade de transmiti-la e adotar medidas gerenciais com fornecimento de recursos pelo lado da demanda. A primeira estratégia busca aumentar a capacidade de geração de energia para atender a crescente demanda, enquanto que a segunda estratégia vem de encontro a este argumento e visa medidas gerenciais no lado da demanda a fim de modificar a curva de carga e diminuir a energia requisitada das fontes principais do sistema (MEYABADI, DEIHIMI, 2017; MOSTAFA, SHATSHAT, 2014).

Alinhado as estratégias para atender a demanda, o conceito de *Smart Grid* vem trazendo soluções para tais problemas como congestionamento das linhas, altos preços pela tarifa, melhoria da qualidade de energia, entre outros (FREIRE et al, 2011).

3.1 Conceito de Smart Grid

O conceito de *Smart Grid*, envolve a aplicação da tecnologia de informação e da automação no setor de energia elétrica. Este conceito vem melhorando a operação e o controle do sistema elétrico, permitindo também a instalação de geração distribuída e resolvendo problemas como proteção, sincronismo e detecção de faltas.

Uma *Smart Grid* fornece automação ao longo da rede, desde a geração até o consumidor final, possibilitando a integração dos seguintes benefícios (FREIRE et al, 2011; MOSHARI et al, 2010):

- Monitoramento em tempo real de geração e consumo;
- Melhoria na qualidade da energia, tal como redução da interrupção do fornecimento de energia.
- Redução de perdas.
- Melhor gerenciamento do consumo e otimização do sistema de fornecimento (eficiência energética);

- Uso de medidores inteligentes e aplicação de tarifas diferenciadas em certos períodos para incentivar, por exemplo, o consumo em período de tarifa baixa, promovendo a otimização do uso do sistema;
- Surgimento de novos produtos e serviços mais inteligentes e eficientes para consumidores de baixa tensão (residencial, comercial e industrial);
- Investimento em geração de energia e armazenamento com menos impactos ambientais.
- Participação ativa dos consumidores no processo de formação de preço e gestão de reservas energéticas;
- Maior dinâmica no mercado elétrico, com expansões de atividades relacionadas a negociação através da venda de energia excedente na geração pelos consumidores para a rede de distribuição.

A implementação de *smart grid* vem tendo grandes avanços na atualidade, principalmente por tratar da adoção em programas de eficiência energética, desenvolvimento sustentável e fontes de energias renováveis.

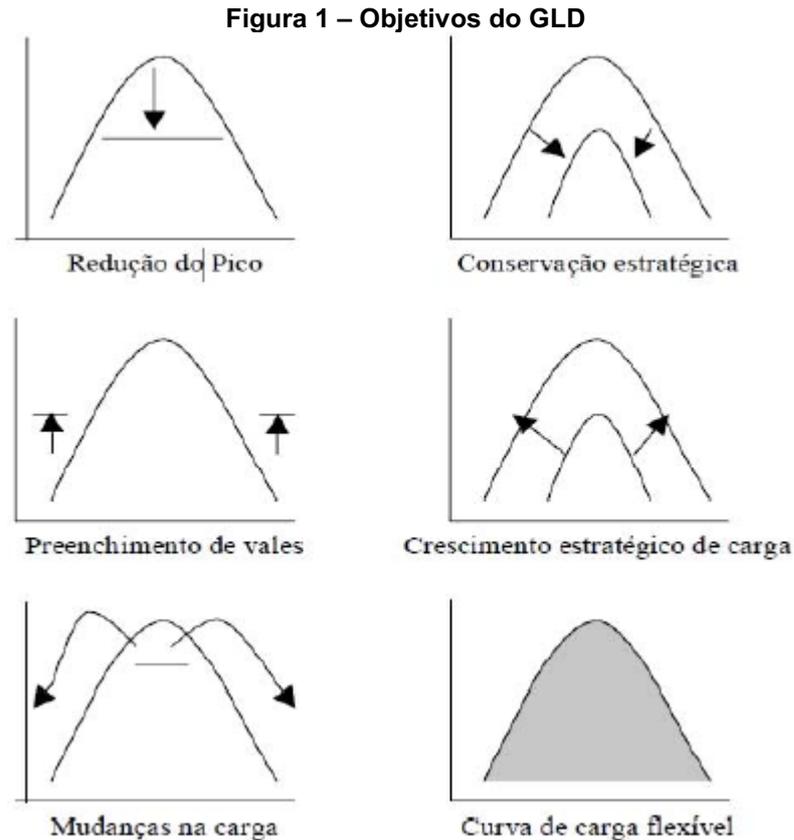
3.2 Gerenciamento pelo Lado da Demanda

Vislumbrando a possibilidade da integração entre a eficiência energética, o desenvolvimento sustentável e a possibilidade de redução do custo de energia elétrica ao consumidor, surgiu o conceito gerenciamento de carga pelo lado da demanda (GLD).

O termo gerenciamento pelo lado da demanda, do inglês *demand-side management* - DSM, foi criado por Clark. W. Gellings nos anos de 1980 (MEYABADI, DEIHIMI, 2017) e tem por objetivo a redução do pico da demanda de carga, remodelar o perfil de demanda e aumentar a sustentabilidade da rede, e por consequência a redução do custo de operação do sistema.

Há várias técnicas de GLD, entre as quais citam-se o deslocamento de carga, redução de pico, preenchimento de vales, conservação estratégica, crescimento estratégico e curva de carga flexível, como indicados na Figura 1.

Neste trabalho, a principal ação implementada pelo programa de GLD proposto será o deslocamento de carga controlada pela variação da tarifa, orientado à redução do custo total da energia consumida.



Fonte: Silva, 2015.

3.3 Tipos de programas de GLD

Por se tratar de uma medida de fácil implementação, baixo custo por parte das concessionárias e resposta imediata, as medidas gerenciais de controle de carga vêm recebendo atenção de pesquisadores tanto da academia quanto do setor privado, sendo assim, foram desenvolvidos muitos programas com este viés o quais podem ser divididos em duas frentes: programas a base de incentivos e programas a base de preço.

No programa a base de incentivo, o consumidor recebe recompensas por economizar energia em resposta a pedidos das companhias de energia. Este programa é custoso para ser implementado devido a dificuldade do cadastro dos consumidores nos programas.

Já no programa a base de preço, os consumidores ajustam seu consumo elétrico em resposta a uma tarifa variável. Assim, modificando a curva de carga de acordo com a intenção da concessionária. Um dos programas a base de preço mais utilizado é o *Time of Use* (ToU), no qual a tarifa da energia elétrica varia ao longo do dia e em períodos do ano na tentativa de modificar o pico curva de carga do

consumidor final. Em outras palavras, a programa ToU é a variação do preço da eletricidade em patamares e intervalos de tempo predefinidos a fim de melhorar o equilíbrio oferta-demanda que muda instantaneamente (UEHARA et al, 2015; WANG et al, 2015).

3.4 Tarifa Branca

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é uma autarquia em regime especial vinculado ao Ministério de Minas e Energia. É através da ANEEL que são criadas normas para a aplicação dos métodos que irão compor as futuras *Smart Grid* e programas de GLD, como por exemplo a introdução da geração distribuída, a programa *Time of Use*, entre outros.

Com base nesses conceitos, em 2016 foi aprovado o programa Tarifa Branca, que está em vigor desde 2018, no entanto o consumidor residencial com consumo mensal abaixo de 250 kWh só pôde usufruir desta tarifa desde de janeiro de 2020 (ANEEL, 2019).

Com a tarifa branca, o consumidor passa a ter a possibilidade de pagar valores diferentes em função da hora e do dia da semana em que consome a energia elétrica (ANEEL, 2019; SILVA, AFFONSO, 2015).

Em dias uteis, a tarifa branca possui três valores: ponta, intermediário e fora de ponta, sendo diferentes para cada concessionária distribuidora. Segundo a ANEEL, o período de ponta corresponde ao período com maior demanda de energia, o período intermediário a via de regra, é uma hora antes e uma hora após do horário de ponta e o valor fora de ponta corresponde aquele com menor demanda de energia.

Antes da tarifa branca, para o consumidor residencial havia apenas a tarifa convencional, com um valor único (em R\$/kWh) cobrado pelo total de energia consumida em todos os dias e horário do mês calendário.

Neste trabalho, além da tarifa branca, iremos abordar mais duas novas tarifas em uso atualmente, sendo elas a tarifa ToU utilizada pela Alfa Energia, uma concessionária de energia elétrica portuguesa, e a tarifa variável utilizada pela Alectra Utilities, concessionária atuante no Canadá.

3.5 Comportamento de cargas em unidades residenciais

Neste trabalho consideram-se a existência de três tipos de modelos de cargas controláveis em uma residência (GRADITI et al, 2015; VLOT, KNIGEE, HANSLOOTWEG, 2013):

- Modelos de cargas variáveis básicas: A partir do momento que liga, o ciclo deve ser completado de modo ininterrupto, no entanto, o instante de inicialização pode ser modificado. Sua potência é contínua e geralmente linear, do início ao fim do ciclo, curva de carga semelhante a um retângulo. Ex.: Máquina de lavar, lava louça.
- Modelo de carga interrupta: O comportamento da carga é semelhante à carga variável básica, porém ciclo permite a interrupção de trabalho. Ex.: Secadora.
- Modelo de cargas de comutação contínua: A potência varia ao longo do tempo, muito difícil de ser modelada, pois sofre facilmente distúrbios e alteração de seu ciclo de trabalho. Ex.: Geladeira, freezer, ventilador.

Neste trabalho, o comportamento das cargas será modelado como uma função gaussiana, Equação 1, de modo que servirá tanto para cargas variáveis básicas quanto para cargas interrompidas e cargas de comutação contínua. Para adotar este modelo, o desvio padrão da função gaussiana é representado pelo tempo de ciclo de trabalho para cada aparelho, o valor de pico é tomado como a potência máxima fornecida pelo equipamento e o parâmetro do valor médio pode ser comparado com a metade do tempo de ciclo de trabalho da carga (GRADITI, 2015).

$$P_a(t) = a e^{-\frac{(t-b)^2}{2c^2}} \quad (1)$$

Onde:

a = valor de pico de potência

b = instante de tempo no qual a potência é máxima

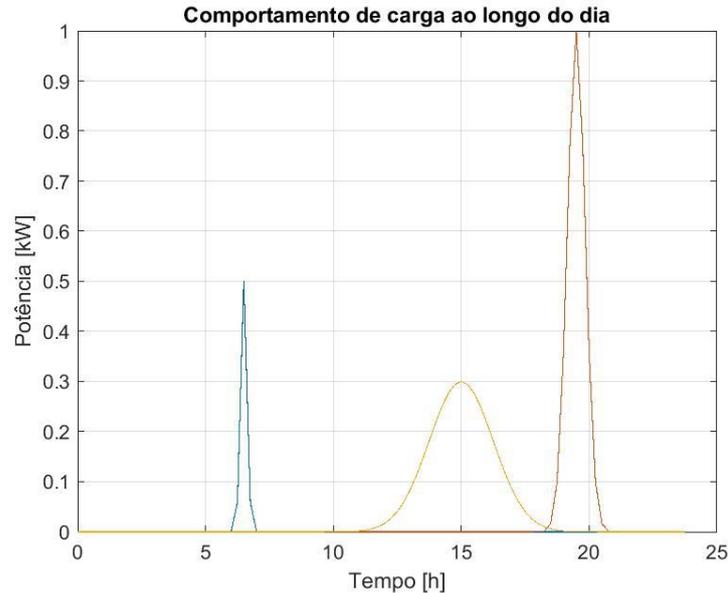
$2c^2$ = equivale ao tempo de ciclo de trabalho

$P_a(t)$ = potência consumida no instante de tempo

A Figura 2 representa a modelagem gaussiana do comportamento de 3 cargas residenciais ao longo do dia. É possível verificar que cada carga doméstica

possui uma potência e ciclo de trabalho específico. A curva azul, laranja e vermelho corresponde a lavadora de roupa, a geladeira e o ferro de passar, respectivamente.

Figura 2 – Comportamento de cargas



Fonte: Autoria própria.

A estratégia de modelagem de carga proposta pode ser usada tanto para resolver problemas de otimização para controle de carga direta em grandes blocos de cargas como pode ser usado facilmente para resolver problemas para controle de cargas em unidades individuais (GRADITI et al, 2015).

3.6 Função objetivo para aplicação de GLD

A proposta para o gerenciamento de carga pelo lado da demanda estipula um horário de acionamento para cada equipamento controlável, sendo assim, este trabalho utiliza duas funções objetivos conhecidas na literatura, a fim de avaliar o êxito do gerenciador perante diferentes situações.

A primeira função objetivo, se resume a somatória das potências multiplicadas pela tarifa ao longo do dia e visa refletir o custo total pago pelo consumo, Equação 2 (RAHATE, 2017).

$$F_{obj} = \sum_{t=1}^{N=24} (P_{carga}(t) * C(t)) \quad (2)$$

Onde:

F_{obj} = função objetivo proposta;

$P_{carga}(t)$ = consumo atual da carga no tempo t;

$C(t)$ = preço da tarifa no instante de tempo t.

Enquanto a segunda função objetivo, visa aproximar a curva de carga da residência da curva objetivo tida como ótima para o problema proposto. A formulação desta proposta está expressa na Equação 3 (LOGENTHIRAN, SRINIVASAN, SHUN, 2012; VIDAL, BATISTA, 2014).

$$F_{obj} = (\min \sum_{t=1}^{N=24} (P_{carga}(t) - P_{obj}(t))^2 + Inc) \quad (3)$$

Onde:

F_{obj} = função objetivo proposta;

$P_{carga}(t)$ = consumo atual da carga no tempo t;

$P_{obj}(t)$ = curva objetivo para o consumo da carga no tempo t;

Inc = fator inconveniência.

Nota-se na Equação 03 que foi adicionado o fator de inconveniência que será abordado posteriormente a fim de proporcionar ao usuário certa personalização do gerenciamento de carga obtido a fim de obter uma maior comodidade.

O consumo atual pode ser definido como a somatória de todos os equipamentos ligados no tempo t, expresso pela Equação 4.

$$P_{carga}(t) = P_{básica}(t) + P_{inint}(t) + P_{chav}(t) + P_{nc}(t) \quad (4)$$

Nesta equação, $P_{básica}(t)$ corresponde as cargas variáveis básicas conectadas no tempo t, $P_{inint}(t)$ corresponde as cargas ininterruptas que estão ligadas no tempo t e $P_{chav}(t)$ representa as cargas de chaveamento contínuo e $P_{nc}(t)$ representa as cargas não controláveis.

A curva objetivo, utilizada na Equação 3, tem como intuito minimizar os custos da energia dos consumidores, por isso é modelada como uma curva inversamente proporcional aos preços de energia, conforme a Equação 5.

$$P_{obj}(t) = \frac{C_m}{C_{max}} \times \frac{1}{C(t)} \times \sum_{s=1}^{N=24} P_{not}(s) \quad (5)$$

Onde:

C_m = média do valor da tarifa ao longo do dia

C_{max} = preço máximo da tarifa no período

$C(t)$ = preço da tarifa no instante de tempo t

3.7 Fator de Inconveniência

A função do fator de inconveniência é diminuir o desconforto causado ao consumidor pelo deslocamento de carga. Este desconforto depende da preferência de acionamento das cargas pelo consumidor e do intervalo do deslocamento destas cargas. É notável que este desconforto é um sentimento humano e varia de consumidor para consumidor, por isso não é possível representar exatamente sua variação através de uma expressão matemática, mas é possível ter uma medição comparativa do quanto este desconforto influencia no custo total de energia elétrica (JAYADEV V, SWARUP, 2013).

A inconveniência causada pelo deslocamento de cada carga pode ser modelada como o quadrado da diferença entre o tempo de acionamento proposto pelo algoritmo e o tempo desejado pelo consumidor, multiplicado por um fator de proporcionalidade, sendo modelado pela Equação 6.

Este fator de proporcionalidade possui a função de tornar o fator de inconveniência proporcional com o resultado da função objetivo, visto que há duas funções objetivo distintas.

$$Inc = k * (\sum_{i=1}^K (t_{ac}(i) - t_{des}(i))^2) \quad (6)$$

Onde:

$t_{ac}(i)$ = tempo de acionamento da carga i

$t_{des}(i)$ = tempo de acionamento desejado pelo consumidor para a carga i

k = constante de proporcionalidade

Com base na pesquisa realizada para identificar os perfis de consumidores, foi possível também identificar intervalos no qual seria mais apropriado e mais confortável acionar os equipamentos, sendo assim, considerado estes intervalos como sendo os de comodidade. Esta pesquisa foi realizada via questionário online, no qual contemplou 56 pessoas, e dentre elas, mais de 80% informaram que possui trabalho durante o dia, 17,3% informaram que não trabalham, e apenas 1,9% informaram que trabalham durante a noite.

Esta pesquisa será melhor explicada posteriormente, no capítulo sobre os perfis de consumidores.

Abaixo, segue a Tabela contendo o intervalo de comodidade para os perfis de consumidores definidos, sendo eles, trabalhadores noturnos, trabalhadores diurnos e do lar.

Tabela 1 - Intervalo de comodidade para acionamento das cargas

CARGA	Trabalhador(a) Noturno		Trabalhador(a) Diurno		Do lar	
	INÍCIO	FIM	INÍCIO	FIM	INÍCIO	FIM
Lavadora de roupa	15:00	20:00	18:00	21:00	09:00	15:00
Secadora de roupa	15:00	20:00	18:00	21:00	09:00	16:00
Ar condicionado	05:00	08:00	00:00	00:30	00:30	00:30
Bomba de piscina	12:00	17:00	05:00	08:00	08:00	14:00
Chuveiro	12:00	20:00	18:00	22:00	14:00	21:00
Lavadora de louça	12:00	20:00	18:00	22:00	13:00	16:00
Ferro de passar	12:00	18:00	17:00	22:00	08:00	20:00
Aspirador de pó	12:00	18:00	18:00	20:00	09:00	19:00
Lâmpadas fluorescente	16:00	20:00	18:00	23:30	18:00	23:00
Microondas	11:00	15:00	18:00	22:00	18:00	22:00

Fonte: Autoria própria.

Horários de acionamentos fora deste intervalo de comodidade são considerados incômodos, e assim, penalizados de acordo com o fator de inconveniência.

3.8 Métodos de otimização para o GLD

Métodos de otimização para solução de problemas de minimização ou maximização de certas funções são utilizados para obtenção de planos de gerenciamento de carga em GLD.

Inserindo o conceito de tarifa variável no tempo com os objetivos do gerenciamento de carga pelo lado da demanda, foram desenvolvidas propostas para agendamento de consumo (deslocamento de carga).

O agendamento de carga pode ser feito de dois modos, o agendamento para o dia seguinte que será o foco deste trabalho e o agendamento em tempo real. O agendamento de carga para o dia seguinte executa o deslocamento de carga para obter um cronograma otimizado de consumo das cargas controláveis para o dia seguinte.

Várias opções de tecnologia estão sendo desenvolvidas para tratar destes problemas, entre elas está o uso de algoritmo computacional capaz de determinar o melhor horário para o acionamento das cargas afim de obter a melhor redução de custo possível.

Métodos heurísticos computacionais como algoritmos genéticos (GA), redes neurais artificiais (ANN) e otimização por enxame de partículas (PSO), estão sendo utilizados no projeto de agendamento de carga, citam se como exemplo as referências (JAYADEV V, SWARUP, 2013; MORGAN et al, 2013; SIEBERT et al, 2012) para o gerenciamento de carga utilizando o algoritmo genético, as referências (KUNWAR, YASH, KUMAR, 2013; NAZARKO, STYCZYNSKI, 1999) para redes neurais e (FARIA et al, 2013; LOGENTHIRAN, SRINIVASAN, PHYU, 2015) para o método de otimização por enxame de partículas. Para exercer o gerenciamento pelo lado da demanda, algoritmo escolhido deve ser capaz de deslocar a carga e ser capaz de diferenciar os vários tipos de cargas e suas prioridades.

4 PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

O método de otimização por enxame de partículas (PSO), do inglês *Particle Swarm Optimization*, foi originalmente proposto por Kennedy e Eberhart em 1995 e foi criado a partir da observação do comportamento de grupos de pássaros na busca por alimento. Este método consiste em solucionar problemas de otimização lineares e não lineares em larga escala utilizando um grupo de partículas (enxame) que explora o espaço amostral em busca do valor ótimo desejado (KENNEDY, EBERHART, 1995).

O algoritmo PSO pode ser dividido em três passos, sendo estes a geração da posição e velocidade iniciais das partículas, a atualização da velocidade das partículas e, finalmente, a atualização da posição das partículas. Entende-se como partícula uma solução no espaço amostral que modifica sua posição com base na sua própria velocidade variante durante as iterações.

Com base nas informações acima, o método PSO tradicional inicia gerando a posição de cada partícula X_i^0 aleatoriamente com distribuição uniforme, limitando o espaço amostral com o valor máximo $X_{máx}$ e mínimo X_{min} , sendo assim, todas as partículas devem ter a posição inicial definida com valores aleatórios dentro do espaço de busca amostral, como analisado na Equação 7, onde rd é um valor aleatório entre 0 e 1 com distribuição uniforme.

A velocidade inicial das partículas V_i^0 é gerada de modo semelhante a posição inicial das partículas, conforme Equação 8.

Analisando as Equações 7 e 8, é possível notar que o subscrito i refere à partícula, variando de 1 a número máximo de partículas, enquanto que o sobrescrito k refere-se à iteração variando de 1 a número máximo de iterações. Para efeito de cálculo, a variação do tempo (Δt) é definido como unitário e equivale a uma iteração.

$$X_i^k = X_{min} + rd(X_{máx} - X_{min}) \quad (7)$$

$$V_i^k = \frac{X_{min} + rd(X_{max} - X_{min})}{\Delta t} \quad (8)$$

Com base na velocidade V_i^k e posição X_i^k atuais de cada partícula, ao longo das iterações é possível determinar a melhor posição histórica de cada partícula P_b ,

com base na avaliação da função custo, é possível determinar a posição da melhor partícula do enxame, G_b .

Definido todos os parâmetros iniciais, o segundo passo é atualizar a velocidade das mesmas através da somatória da velocidade atual com a diferença de P_b com X_i^k , somado com a diferença entre G_b e X_i^k , como informado na Equação 9.

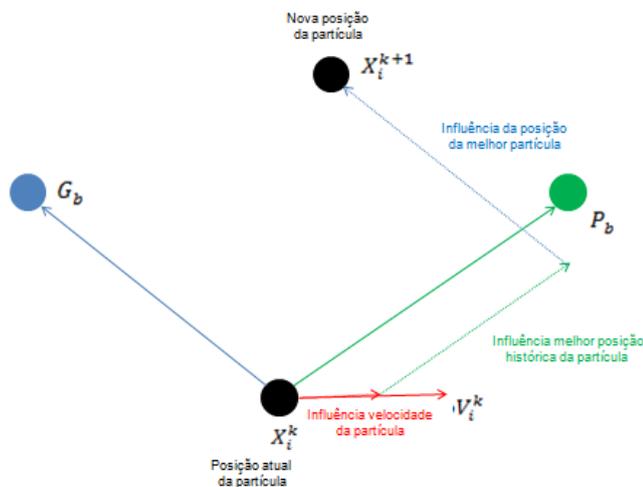
As variáveis ω , c_1 e c_2 representam o coeficiente de inércia, o coeficiente de aceleração pessoal e o coeficiente de aceleração do grupo, e possuem valores de 0.5, 1.5 e 1.5, respectivamente. Estes valores foram definidos com base na melhor resposta às funções desejadas, porém podem variar para cada implementação do PSO.

$$V_i^{k+1} = \omega V_i^k + c_1 rd \left(\frac{P_b - X_i^k}{\Delta t} \right) + c_2 rd \left(\frac{G_b - X_i^k}{\Delta t} \right) \quad (9)$$

O terceiro passo do PSO é a atualização da posição das partículas, para isso é necessário a nova velocidade V_i^{k+1} e a atual posição das partículas X_i^k , conforme a Equação 10. A Figura 3 ilustra o cálculo para determinar a nova posição da partícula.

$$X_i^{k+1} = X_i^k + V_i^{k+1} \Delta t \quad (10)$$

Figura 3 - Ilustração PSO canônico



Fonte: Hassan (Adaptado).

Após atualizada a nova posição de todas as partículas, a melhor posição histórica de cada partícula P_b e a posição da melhor partícula do enxame G_b devem ser atualizadas a partir da função custo para os valores de X_i^{k+1} em cada iteração.

Os passos 2 e 3 serão executados até que se atinja o critério de parada. O critério de parada é estabelecido quando se atinge o número máximo de iterações, $N_{máx}$, ou a diferença entre o valor da função custo da melhor partícula do enxame na iteração atual com seu valor anterior for menor do que a tolerância especificada. Para o algoritmo apresentado é definido o número máximo de iterações igual a 1000 e a diferença entre os valores de custo menor que 1.10^{-5} , demonstrado na Equação 11 e 12 (HASSAN, COHANIM, WECK, 2004).

$$i \geq N_{máx} = 1000 \quad (11)$$

$$|f_g^k - f_g^{k-1}| \leq 1.10^{-5} \quad (12)$$

Durante as iterações, é possível que a partícula saia do espaço de busca, e assim o PSO poderia divergir. Para solucionar o problema, é proposto neste caso, que a sua velocidade deve ser zerada e sua posição retornada a borda do espaço amostral na direção em que se evadiu $X_{máx}$ ou X_{min} .

4.1 Demonstração do Funcionamento do método PSO

Para validação do método PSO, é necessário a comprovação da sua eficiência na convergência ao ponto de mínimo ou máximo da função custo desejada. Esta validação se faz em duas partes, sendo elas pelo desenvolvimento das iterações manualmente validando a convergência, e posteriormente desenvolvendo o algoritmo em software de engenharia.

Para ambos os casos de aplicação foi utilizada a Função Rastrigin, apresentada a seguir pela Equação 13. Analisando a Equação, nota se que i representa o número de variáveis, e pode ser testado por qualquer quantidade de variáveis, sendo o máximo representado por n . A função em questão possui seu mínimo na origem do sistema de coordenadas (Pant,2009).

$$f(x) = \sum_{i=1}^n ((x_i)^2 - 10 \cos(2\pi x_i) + 10) \quad (13)$$

4.1.1 Cálculo numérico manual utilizando um enxame de 2 partículas

O teste será realizado com um enxame de 2 partículas e as equações referidas foram realizadas manualmente.

É determinado o campo de busca de -5 a 5 para as variáveis, no qual foi escolhido, segundo a Equação 6, as posições iniciais das partículas: $X_1^1 = (3,1472; 1,3236)$ e $X_2^1 = (4,0579; -4,0246)$.

Com base na posição inicial e aplicando a Equação 7, foi possível determinar a velocidade inicial das partículas, sendo estas iguais a $V_1^1 = (3,5992; -0,1513)$ e $V_2^1 = (4,9627; -2,4354)$.

A melhor posição histórica das partículas P_1 e P_2 para a primeira iteração é a própria posição inicial, pois não há histórico de posições para as partículas. Aplicando os valores das partículas na função, obteve-se o valor de $f(X_1) = 30,0989$ para a partícula 1 e $f(X_2) = 33,7608$ para a partícula 2, e com isso, definido a partícula 1 com a melhor partícula do grupo, G_b .

O passo seguinte é a atualização da velocidade, adquirida através da Equação 8, os valores randômicos foram sorteados, e assim, calculou-se a nova velocidade das partículas: $V_1^2 = (1,7996; -0,0756)$ e $V_2^2 = (1,4208; 4,9430)$.

O próximo passo é a atualização da posição das partículas, obtida através da Equação 9 que resulta na posição de $X_1^2 = (4,9468; 1,2480)$ e $X_2^2 = (5,0; 0,9184)$. Note que a posição da partícula 2 foi fixada em 5 na primeira coordenada pois ela saiu o campo de busca, e sua velocidade zerada na respectiva coordenada, portanto atualizada para $V_2^2 = (0,0; 4,9430)$.

Feito isso, aplica-se a nova posição das partículas na função custo examinada, obtendo o valor de $f(X_1) = 36,4529$ para a partícula 1 e $f(X_2) = 52,2303$ para a partícula 2.

Através deste resultado é possível atualizar a melhor posição histórica das partículas e a posição da melhor partícula do enxame. Porém, como não houve melhoria na convergência nesta iteração, a melhor posição histórica das partículas 1 e 2 não são atualizadas. Portanto, a melhor partícula do enxame se manteve sendo a partícula 1.

As atualizações da velocidade, posição Pb_i e G_b são realizados até que se atinja o critério de parada, descrito neste capítulo.

4.1.2 Cálculo numérico utilizando MATLAB™ para o enxame de 2 partículas

Realizado manualmente os passos do método de otimização PSO tradicional, esta parte visa implementar as etapas anteriores utilizando o software MATLAB™.

A Tabela 2 corresponde ao resultado da implementação realizada no software MATLAB™ para realização do método PSO na solução da função Rastrigin. As alterações nas posições das partículas ao longo das iterações demonstram as tentativas de convergência ao valor ótimo esperado. O sobrescrito n indica o número de iterações, e o subscrito numérico informa a partícula.

Tabela 2 - Posição das partículas ao longo das iterações no PSO tradicional para a solução ótima da função

Iteração	Posição partícula 1 (X_1^n)	Valor da função custo para a partícula 1 $f(X_1)$	Posição partícula 2 (X_2^n)	Valor da função custo para a partícula 2 $f(X_2)$
1	(0,3341; -2,6697)	37,1145	(0,5518; 0,8082)	26,8581
2	(-1,5282; 1,2443)	33,3661	(-0,1282; 0,3309)	18,0633
3	(1,4860; 2,6191)	46,3566	(-0,4682; 0,0922)	21,6608
4	(1,2791; 2,7914)	28,6734	(-0,2779; 0,2539)	22,1337
5	(0,7671; 0,5980)	28,0333	(-0,1403; 0,3657)	20,4407
6	(-0,2018; -0,5224)	27,23	(-0,0675; 0,4020)	19,2134
7	(-0,4925; -1,0725)	22,4014	(-0,0334; 0,3742)	17,3949
8	(-0,1060; -0,5427)	22,0849	(-0,0164; 0,3603)	16,5704
9	(0,2096; 0,5235)	27,6965	(-0,0079; 0,3533)	16,1824
10	(-0,2101; -0,4355)	26,9464	(-0,0036; 0,3498)	15,9028
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
60	(-0,0001; -0,0010)	0,0002	(0,0000; -0,0010)	0,0002
61	(-0,0001; -0,0010)	0,0002	(0,0000; -0,0010)	0,0002
62	(-0,0001; -0,0010)	0,0002	(-0,0000; -0,0010)	0,0002
63	(-0,0001; -0,0010)	0,0002	(-0,0002; -0,0010)	0,0002
64	(-0,0001; -0,0010)	0,0002	(-0,0002; -0,0010)	0,0002
65	(-0,0001; -0,0010)	0,0002	(-0,0000; -0,0010)	0,0002
66	(-0,0001; -0,0010)	0,0002	(0,0001; -0,0010)	0,0002
67	(-0,0001; -0,0010)	0,0002	(0,0001; -0,0010)	0,0002
68	(0,0000; -0,0010)	0,0002	(-0,0001; -0,0010)	0,0002

Fonte: Autoria própria.

Nota se que após várias iterações, as posições das partículas se agrupam e o valor da função custo tende ao mesmo resultado.

4.1.3 Aplicação do PSO em outras funções de benchmark

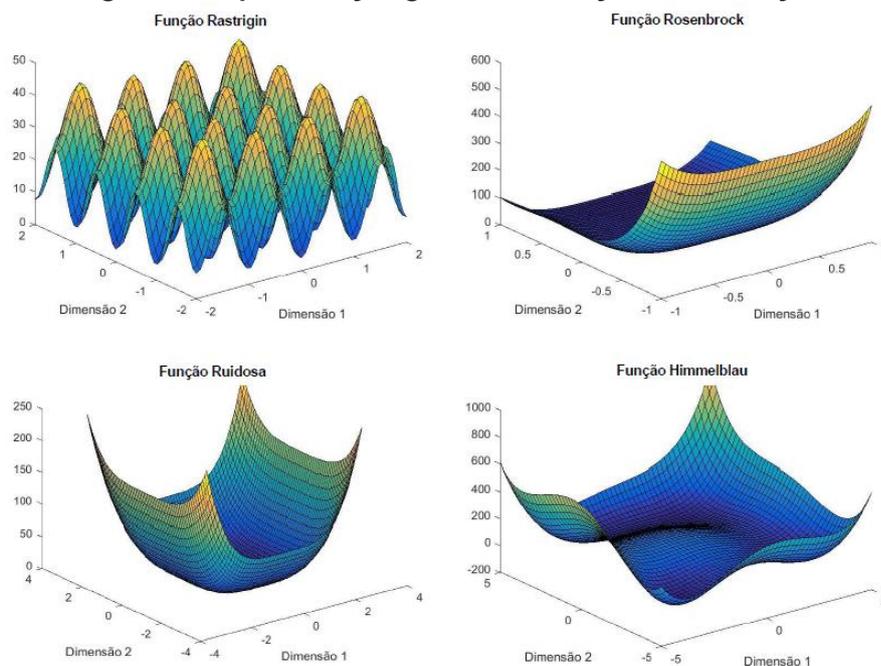
Assim como a função Rastrigin, foram utilizadas as funções numéricas da referência (Pant,2009) para validação do algoritmo PSO, expostas na Tabela 3. Analisando as equações, nota se que i representa o número de variáveis, e pode ser testado com qualquer quantidade de variáveis, sendo o máximo representado por n . Para cada função em análise, há um valor mínimo, considerado o valor de convergência, os quais estão listados também na Tabela 3.

Tabela 3 - Funções Benchmark

Nome da Função	Definição da Função	Campo de Busca	Valor esperado da função no mínimo
Rosenbrock	$f_1(x) = \sum_{i=0}^{n-1} 100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2$	[-30; 30]	0
Ruidosa	$f_2(x) = (\sum_{i=0}^{n-1} (i + 1) + x_i^4) + rand[0,1]$	[-1,28; 1,28]	0
Himmelblau	$f_3(x) = (x_2 + x_1^2 - 11)^2 + (x_1 + x_2^2 - 7)^2 + x_1$	[5; 5]	-3,78396

Fonte: Pant, 2009 (Adaptado).

Figura 4 - Representação gráfica das funções de avaliação



Fonte: Pant, 2009 (Adaptado).

As funções escolhidas propiciam um campo de testes adequados para um algoritmo de otimização heurístico.

O método PSO foi executado 1000 vezes para cada uma das 3 funções descritas acima e foram anotadas a melhor e a pior solução no enxame, assim como a média do melhor valor da função fitness em cada repetição do método com o objetivo de validar a convergência do método em análise. Todas as informações colhidas estão dispostas na Tabela 4.

Tabela 4 - Dados obtidos com a melhor partícula do enxame

Função	Melhor fitness do enxame	Pior fitness do enxame	Média do valor do mínimo custo obtido nas 1000 repetições
1	0,0000	0,0258	0,0002
2	0,0000	0,0251	0,0003
3	-3,7840	3,5823	-2,1552

Fonte: Autoria própria

Os critérios de validação do método PSO em análise para as funções testadas é a convergência da melhor partícula no enxame para o valor ótimo esperado e a média do mínimo valor da função custo obtido durante as repetições se manter próxima ao valor da melhor partícula, o que indica o quão robusto o método PSO é às suas condições iniciais.

Com base nas análises feitas com relação ao desempenho do método de otimização PSO, é possível determinar que o método em análise obteve bom resultado quando testado nas funções de avaliação e alcançou o objetivo de convergência para o valor ótimo esperado.

5 VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE OTIMIZAÇÃO PSO

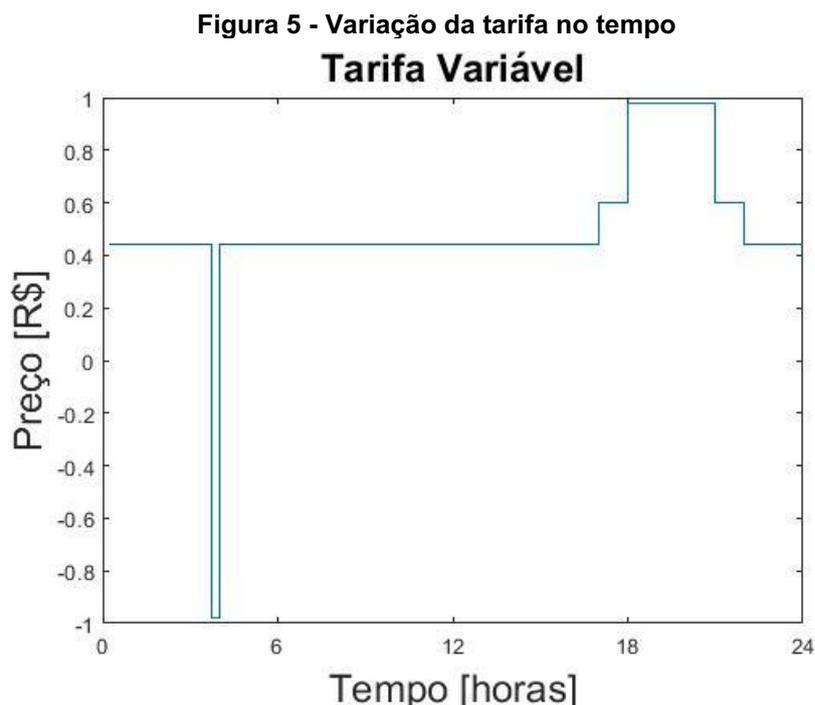
Para o teste de validação do gerenciador de carga em uma residência utilizando o algoritmo PSO, é necessário primeiramente aplicar o PSO em apenas uma carga e certificar de que o algoritmo atuará e deslocará a carga para a posição desejada.

O algoritmo PSO foi modelado com 40 partículas, seu coeficiente de inércia, coeficiente de aceleração do grupo e aceleração pessoal definidos em 0.5, 1.5 e 1.5, respectivamente.

O algoritmo PSO atuará de modo a determinar o melhor instante de acionamento das cargas de acordo com a variação da tarifa, a fim de se obter o menor valor pago pelo consumo desta carga. O algoritmo atuará minimizando a função custo objetivo, Equação 2.

A janela de tempo é definida em 15 minutos com instante inicial em 00h00min e instante final em 23h45min, completando um dia, obtendo assim, 96 intervalos.

Portanto, foi considerado uma única carga controlável de 2 [kW] com tempo de ciclo de 2h30min. A tarifa variável está distribuída de acordo com a Figura 5, no qual no intervalo das 18h00min às 20h00min contém o maior preço da tarifa, 0.98 [R\$/kWh].



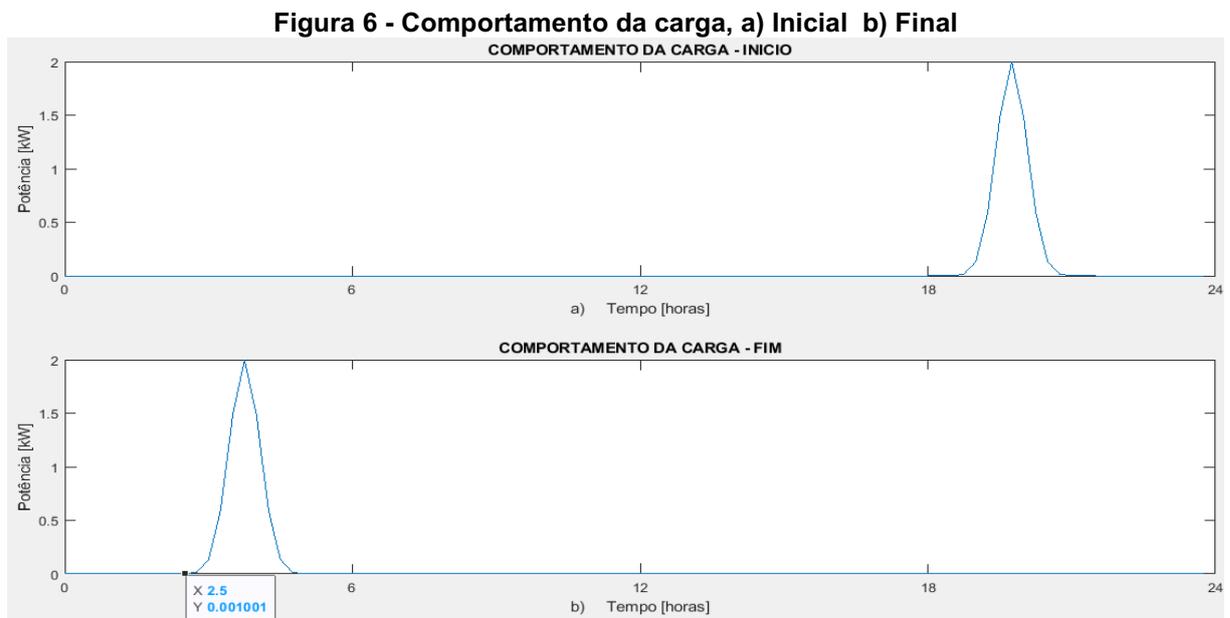
Fonte: Autoria própria.

5.1 Realocar uma carga do instante de maior valor da tarifa para o instante de menor valor

Para validação do PSO, a carga foi alocada inicialmente no intervalo de maior tarifa, forçando o PSO a retirá-la deste ponto e alocá-la no instante de menor valor da tarifa.

A Figura 6 ilustra este passo, no qual na Figura 6.a seria a condição inicial, com a carga alocada no intervalo de maior valor da tarifa e a Figura 6.b a condição final, com a carga alocada no intervalo de menor valor da tarifa.

No gráfico, o eixo das abcissas representa o tempo em decimal enquanto o eixo das ordenadas corresponde à potência de consumo da carga controlável.

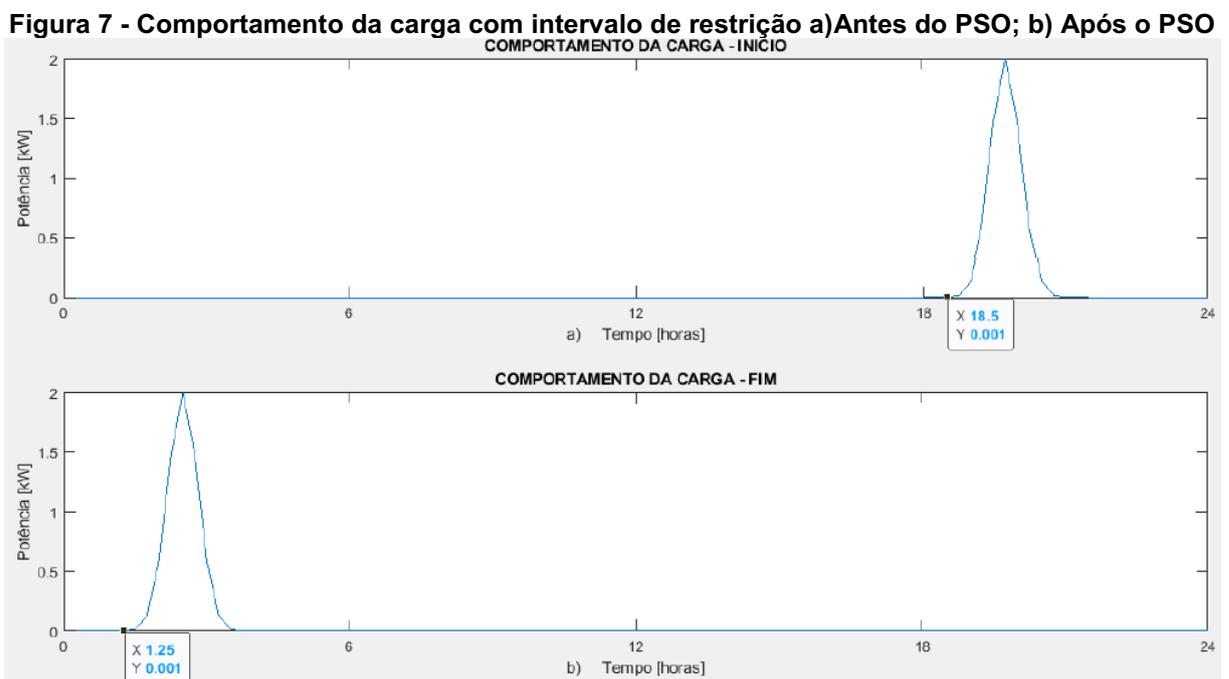


Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 6, é possível notar que o algoritmo PSO realocou a carga que inicialmente estava no intervalo de maior valor da tarifa, para o instante de acionamento tempo $t = 2\text{h}30\text{min}$, fazendo com que o pico da potência coincida com o instante de menor valor, ou seja em $t = 3\text{h}45\text{min}$. Portanto, para esta situação, o PSO está funcionando de acordo com a ideia proposta.

5.2 Realocar uma carga inserindo o intervalo de restrição

Nesta etapa do processo de validação, será inserido o intervalo de restrição para o acionamento da carga, este intervalo coincide com o intervalo no qual a tarifa será de menor valor. Portanto, o algoritmo PSO não poderá alocar a carga neste intervalo de tempo. O intervalo de restrição foi das 1h15min às 6h15min, e o instante de tempo com a tarifa mais baixo se manteve em 3h45min. A Figura 7 contém a aplicação do método PSO após ser inserido o intervalo de restrição.

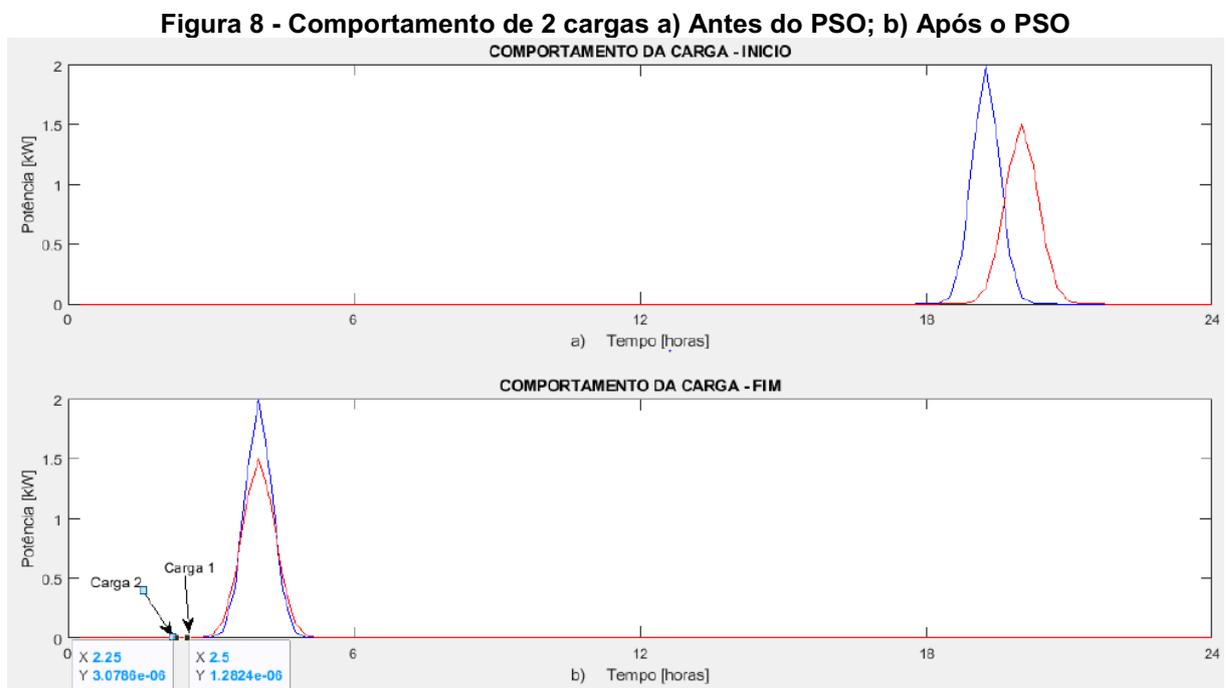


Fonte: Autoria própria.

Com base na análise da Figura 7, é possível notar que a carga não será mais acionada no intervalo onde o pico da potência coincide com a tarifa menor, mas seu acionamento foi alocado para o instante mais próximo desta tarifa, sendo este instante em $t = 1\text{h}15\text{min}$. Fato esperado, pois ao alocar o acionamento da carga no extremo esquerdo do intervalo de restrição, o ciclo de trabalho de $2\text{h}30\text{min}$ da carga se aproveita ao máximo do pico negativo da tarifa de energia elétrica, o que comprova a funcionalidade do algoritmo.

5.3 Realocar duas cargas do instante de maior valor da tarifa para o instante de menor valor

Nesta etapa, será inserido mais uma carga ao sistema, esta carga tem potência máxima de 1.5 [kW] e tempo de ciclo de 3 horas. Os valores das tarifas ao longo do dia mantem idêntico a Figura 5. Para a carga 1, o instante inicial de acionamento é $t = 18\text{h}00\text{min}$ com tempo de ciclo de trabalho de $2\text{h}30\text{min}$, enquanto para a carga 2, o ciclo de trabalho é de 3h e seu instante inicial de acionamento em $t = 18\text{h}30\text{min}$. Sendo assim, a Figura 8 corresponde ao comportamento das duas cargas.



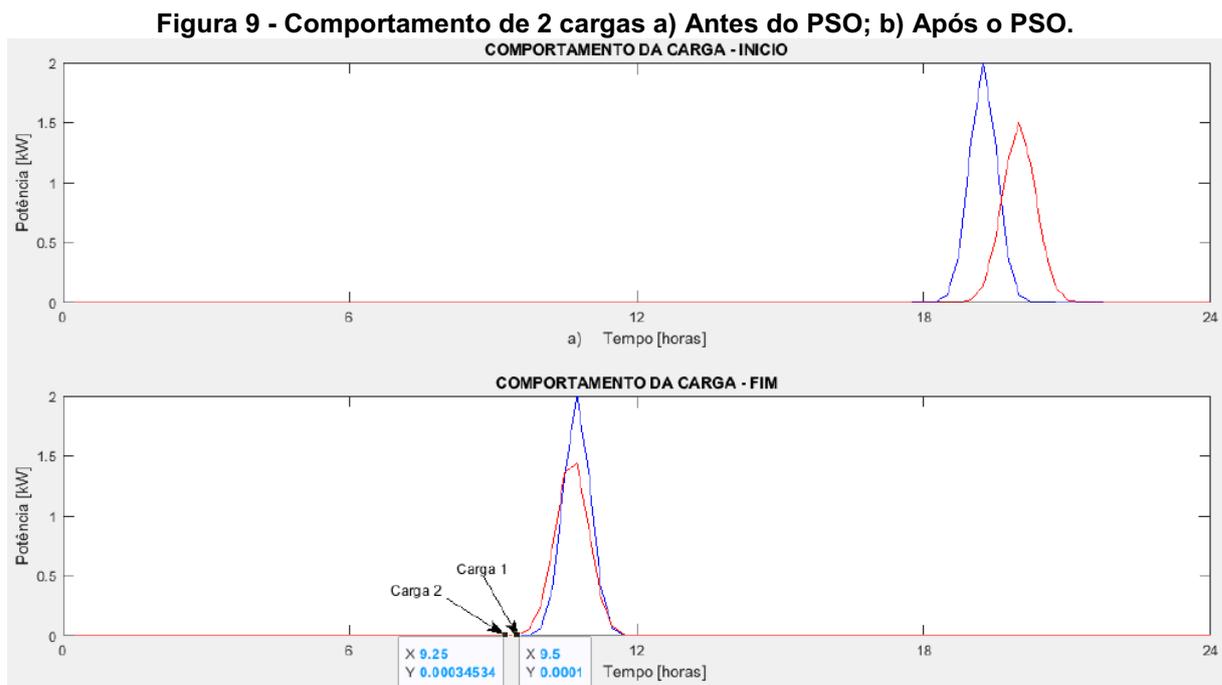
Fonte: Autoria própria.

Nota se na Figura 8 que no tempo $t = 3\text{h}45\text{min}$, a potência máxima dos dois equipamentos está coincidindo, ou seja, a soma das potências máximas está no instante em que a tarifa é mínima. Para tanto, o tempo de acionamento da carga 1 foi novamente definido para $t = 2\text{h}30\text{min}$, enquanto que para a carga 2, o tempo de acionamento foi definido para $t = 2\text{h}15\text{min}$.

5.4 Realocar duas cargas inserindo o intervalo de restrição

Nesta etapa do processo de validação, será inserido um intervalo de restrição para o acionamento de ambas as cargas, sendo tais intervalos distintos entre elas. Assim, o PSO deverá retirar as cargas do ponto no qual a tarifa está mais cara e realocá-las no instante mais próximo do intervalo de tempo em que a tarifa está mais barata.

Para esta etapa, o instante em que a tarifa atinge o pico de $-0,98$ [R\$/kWh] foi transferido de 3h45min para 11h. Para a carga 1, em azul, o intervalo de restrição foi definido das 9h30min às 12h, e para a carga 2, em vermelho, o intervalo de restrição foi definido das 9h15min às 13h. A Figura 9 nos mostra a carga alocada antes da aplicação do método PSO e após o algoritmo encontrar a solução para o sistema.



Fonte: Autoria própria.

Com base na análise da Figura 9, é possível notar que ambas as cargas foram realocadas pelo algoritmo de modo que o pico de potência de ambas as cargas coincida com o instante de acionamento mais próximo possível da menor tarifa, os instantes de acionamento das cargas foram determinados pelo algoritmo em 9h30 e 9h15 para a carga 1 e carga 2, respectivamente.

Fato esperado novamente, pois ao alocar os acionamentos das cargas no extremo esquerdo do intervalo de restrição, o ciclo de trabalho de 2h30min da carga

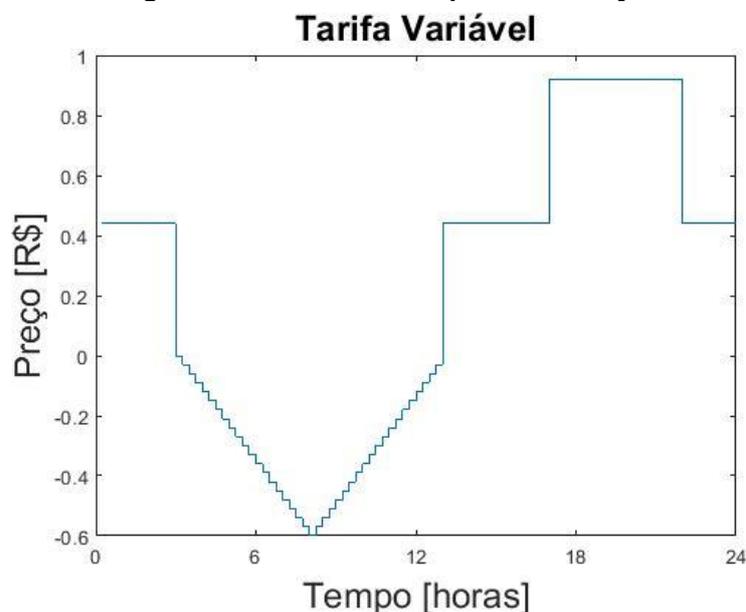
1 e de 3h da carga 2, se aproveitam ao máximo do pico negativo da tarifa de energia elétrica, o que comprova a funcionalidade do algoritmo.

Portanto, é possível concluir que o algoritmo PSO proposto é capaz de alocar as cargas para instantes que satisfaçam o objetivo proposto, no caso, o menor valor de custo pago pelo consumo, é possível concluir também que o algoritmo PSO determina o melhor instante de acionamento para as cargas mesmo quando há restrições no intervalo de acionamento.

5.5 Realocar as cargas com intervalo de acionamento preferencial no horário de pico

Nesta etapa de validação, a tarifa foi alterada de forma que decai proporcionalmente das 3h às 8h com valor de mínimo $-0,60$ [R\$/kWh] e então, aumentando até as 13h com valor de $0,44$ [R\$/kWh]. O gráfico do valor da tarifa ao longo do dia está exposto na Figura 10.

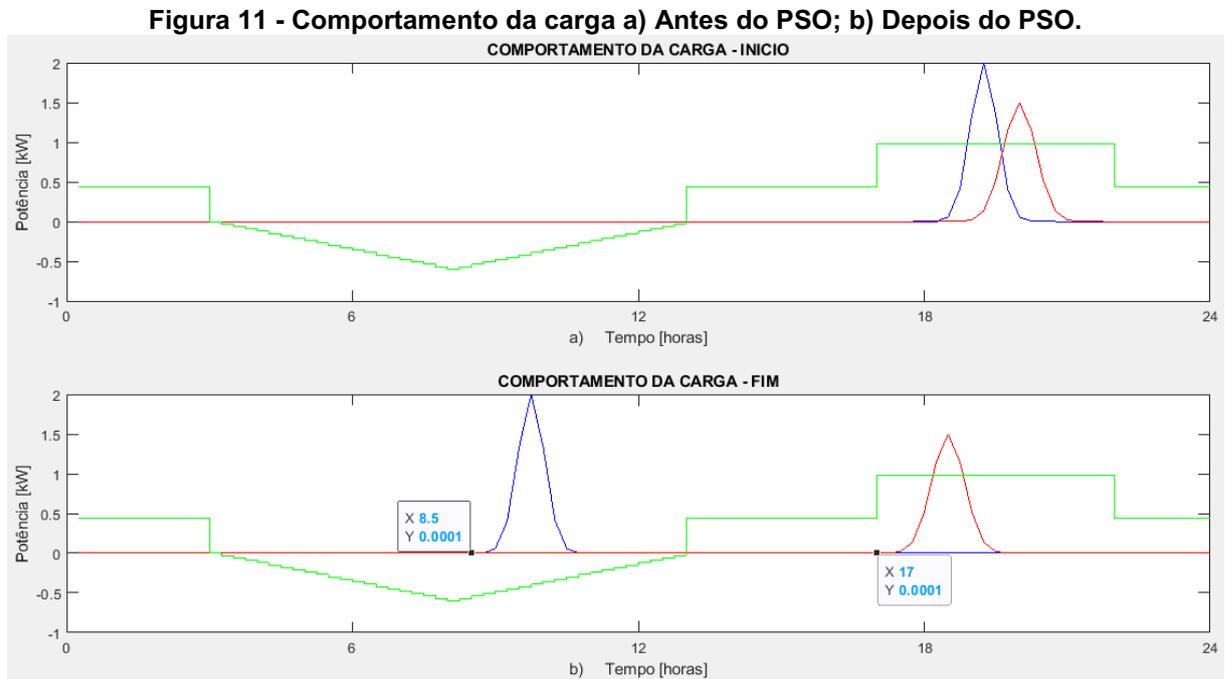
Figura 10 - Tarifa variável para a Validação 2



Fonte: Autoria própria.

O período preferencial para a carga 1 foi alterado para o intervalo das 8h30min às 17h, sendo assim, deve ser alocado no instante mais próximo do valor de mínimo da tarifa. Já para a carga 2, o período preferencial foi alterado para o intervalo das 17h às 21h30min, coincidindo com o intervalo de pico da tarifa variável, portanto a carga deve ser alocada no intervalo de máximo valor da tarifa.

O resultado da aplicação do método PSO nesta etapa pode ser analisado na Figura 11.



Fonte: Autoria própria.

Com base na análise da Figura 11, pode se notar que a carga 1, representada pela curva em azul, foi alocada para o instante mais próximo permitido do valor de mínimo da tarifa, enquanto que a carga 2, representada pela curva em vermelho, foi alocada de modo permanecer no intervalo no qual a tarifa é máxima, porém seu acionamento foi adiantado ao início do período preferencial. A curva em verde representa a tarifa variável ao longo do dia, inserida no gráfico para que ajude na compreensão do deslocamento das cargas.

Portanto, pode ser concluir o algoritmo PSO está atuando de forma a atender as exigências do consumidor e atua de forma a atenuar o preço final pago pelo usuário na conta de energia elétrica.

5.6 Validação do algoritmo PSO utilizando a função objetivo de Vidal e Batista (2014)

Esta etapa do teste de validação consiste em avaliar o desempenho do algoritmo para o gerenciamento de carga levando em consideração uma curva de cargas objetivo proporcional ao inversa da tarifa variável. Vidal e Batista (2014) trazem

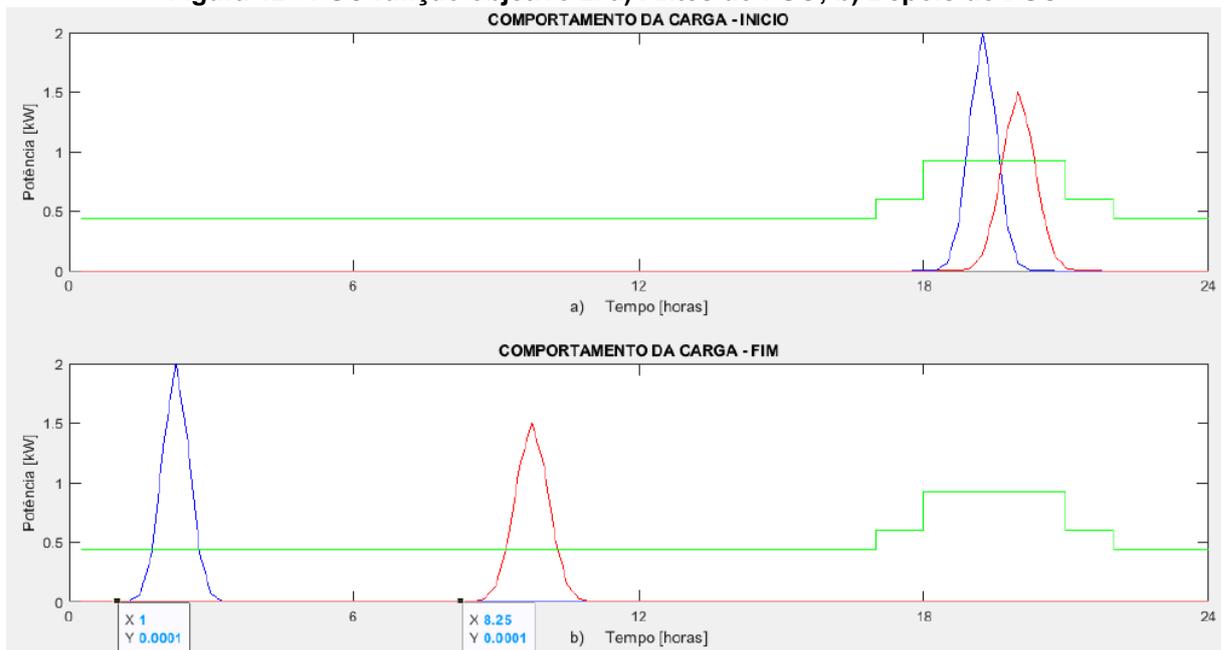
uma proposta de a função objetivo a fim de modelar a curva de carga da residência para deixá-la o mais próximo possível da chamada Potência Objetivo. A função objetivo pode ser analisada pela Equação 14.

$$\text{minimizar } \sum_{t=1}^{24} (P_{carga}(t) - P_{obj}(t))^2 \quad (14)$$

Esta proposta é semelhante a Equação 3, se diferenciando da ausência do fator de inconveniência. Sendo assim, $P_{obj}(t)$ é a Potência Objetivo, definida na Equação (5), para o instante de tempo t e $P_{carga}(t)$ é o consumo atual no tempo t . É relevante mencionar que $P_{obj}(t)$ depende do inverso do valor da tarifa variável, sendo portanto os valores utilizados para teste àqueles mostrados na curva verde da Figura 12.

Aplicando o gerenciamento de carga, o objetivo desta função é novamente realocar a carga do instante e maior preço da tarifa para o instante de menor valor. A solução encontrada pelo algoritmo PSO pode ser analisada pela Figura 12.

Figura 12 - PSO função objetivo 2. a) Antes do PSO; b) Depois do PSO



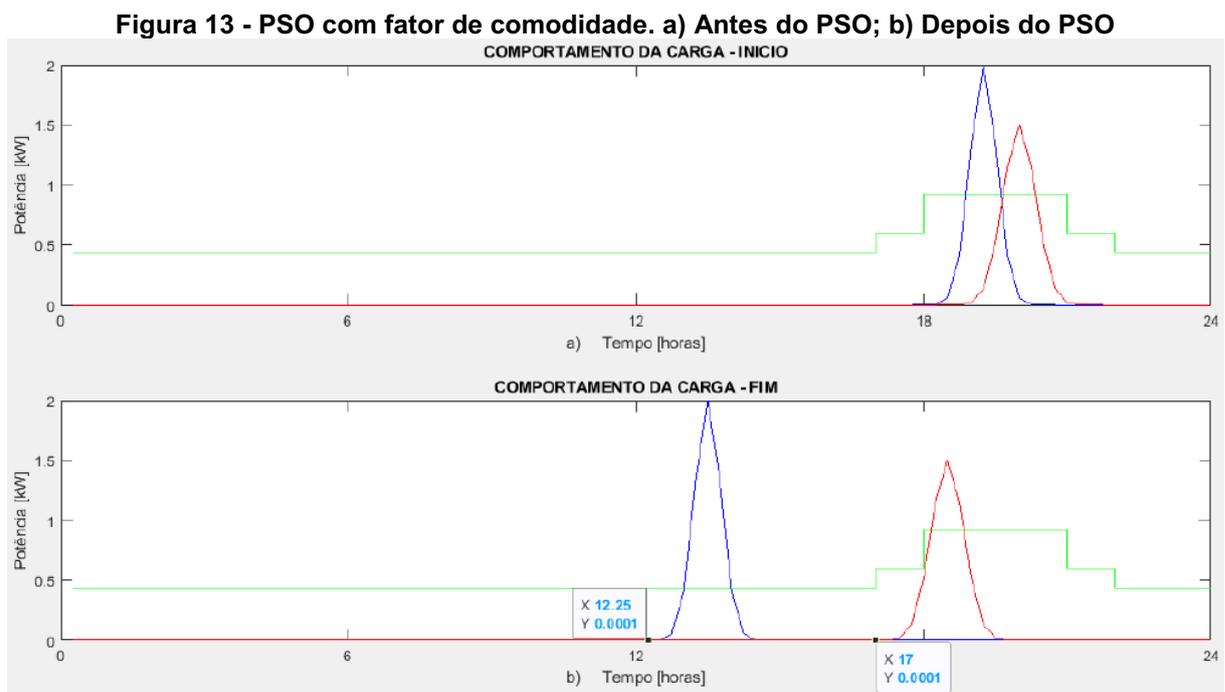
Fonte: Autoria própria.

A curva em azul representa o comportamento da carga 1, enquanto a curva em vermelho representa o comportamento da carga 2, a linha em verde condiz ao valor da tarifa ao longo do dia.

Pela análise da Figura 12 é possível concluir que o algoritmo PSO está conseguindo gerenciar as cargas, retirando do instante de maior preço da tarifa e inserindo a carga no momento em que a tarifa está mais baixa. Porém, por ter apenas duas cargas em um intervalo muito grande de tarifa de menor valor, o algoritmo escolhe momentos aleatórios dentro intervalo de menor preço da tarifa.

Uma maneira de tentar restringir os momentos de acionamento da carga é inserindo um fator de comodidade ao consumidor, no qual é informado o intervalo de preferência para acionamento para as cargas em questão.

A Figura 13 representa o comportamento do algoritmo no gerenciamento de carga quando inserido o fator de inconveniência na função objetivo do problema. Para a carga 1, o intervalo de comodidade foi das 8:30 às 17:00, enquanto para a carga 2 foi das 17:00 as 21:00.



Fonte: Autoria própria.

6 CENÁRIO DE ESTUDO DA APLICAÇÃO DO GLD

Para o desenvolvimento da aplicação do gerenciamento de cargas pelo lado da demanda em residências, é necessário saber quais equipamentos compõem uma residência, qual é o comportamento dos consumidores com relação aos acionamentos destes equipamentos e qual é a variação da tarifa aplicada pelas concessionárias que utilizam a tarifação variável.

6.1 Cargas de Residências

Para a aplicação do gerenciamento de carga em uma residência, foram extraídas de artigos 10 cargas que são encontradas em residências, estas cargas devem possuir suas potências e seu tempo de ciclo, para que seja possível modelar sua curva.

Sendo assim, as características da lavadora de roupa, a secadora de roupa, o ar condicionado, a bomba d'água, o chuveiro e a lavadora de louça foram extraídos da referência (SIEBERT, 2012).

Do artigo (LOGENTHIRAN, 2012), foram extraídas as características do ferro de passar roupa e do aspirador de pó. Já para o micro-ondas, sua característica foi extraída (ABOGALEELA, 2012).

Para as lâmpadas, serão utilizadas 5 lâmpadas fluorescentes de 30W, totalizando 150W e seu tempo de ciclo foi extraído de (LOGENTHIRAN, 2012). Vale ressaltar que, para efeito de estudo, todas as lâmpadas são acionadas e desligadas ao mesmo tempo.

Portanto, a Tabela 5 representa todas as cargas na residência utilizadas para o gerenciamento proposto, assim como suas respectivas potências e tempos de ciclo de trabalho.

Tabela 5 - Características das cargas

Equipamento	Potência [W]	Tempo de ciclo [h]
Lavadora de Roupa	500	1,000
Secadora de roupa	3500	1,000
Ar-condicionado	1000	8,000
Bomba d'água	552	0,500

Equipamento	Potência [W]	Tempo de ciclo [h]
Chuveiro elétrico	3500	0,750
Lavadora de louça	1500	0,750
Ferro de passar roupa	1000	3,000
Aspirador de pó	400	3,000
Lâmpadas fluorescente	150	3,000
Microondas	1000	1,000

Fonte: Aatoria própria.

Com base nos dados acima, a energia total consumida na residência foi de 21,676 kWh.

6.2 Perfil de consumidores

Para completar o estudo do gerenciador de carga, faz se necessário identificar perfis de consumidores nos quais o gerenciador se aplica e assim identificar para quais destes perfis, o gerenciador de carga será mais eficiente na redução de custos. Em outras palavras, para perfis diferentes de consumidores, as cargas serão acionadas em momentos diferentes, e assim, será possível identificar o impacto do gerenciamento de carga para cada tipo de consumidor.

Para identificar estes perfis, foi realizado uma pesquisa com 53 pessoas nas cidades de Piracicaba e região. Esta pesquisa tem o objetivo de identificar a rotina diária do consumidor e com isso identificar em quais períodos do dia o consumidor se encontra em sua residência e também, o momento corriqueiro em que as cargas residenciais são acionadas.

Desta amostra de 53 pessoas, 79,2% (42 pessoas) informaram que trabalham durante o dia, enquanto 16,98% (9 pessoas) informaram que não trabalham e possuem sua rotina em casa o dia inteiro e por fim, apenas 1,89% (1 pessoa) informou que trabalha durante a noite.

Com resultados desta pesquisa, foi possível identificar três perfis de consumidores, trabalhadores diurnos, trabalhadores noturnos e trabalhadores do lar. Para cada perfil de consumidor, foram identificados os intervalos de acionamento e os intervalos de restrição do acionamento das cargas. Sendo assim, as Tabelas 6, 7 e 8 correspondem ao perfil de consumidores para trabalhadores diurnos, trabalhadores noturnos e do lar, respectivamente.

Entende se como trabalhadores diurnos, pessoas que dormem das 00h00min até às 5h, trabalham fora de suas residências no período das 8h até às 17h e ficam em suas residências das 17h às 00h00min. Trabalhadores noturnos é definido sendo pessoas que dormem das 06h às 12h, trabalham das 21h até as 06h e ficam em sua residência nos horários excedentes. E por fim, perfis do lar é definido como pessoas que dormem das 00h00min às 08h e ficam em suas residências no resto do dia.

Entende se como intervalo de acionamento das cargas o período em que o consumidor se encontra em sua residência, e assim possibilitaria o acionamento das cargas. O intervalo de restrição se entende como o intervalo em que o consumidor não deseja que seja ligado seu equipamento, por motivos quaisquer. E o instante de acionamento é o horário em que o equipamento corriqueiramente é acionado.

Tabela 6 - Perfil de Consumidor - Trabalhador(a) Diurno

Cargas	Início do Intervalo de Acionamento	Fim do intervalo de acionamento	Início do intervalo de restrição	Fim do intervalo de restrição	Instante usual de acionamento da carga
Lavadora de roupa	05:00	24:00	08:00	17:00	21:00
Secadora de roupa	05:00	24:00	08:00	17:00	21:00
Ar condicionado	00:00	24:00	08:00	17:00	00:00
Bomba de piscina	05:00	24:00	08:00	17:00	05:00
Chuveiro	05:00	24:00	08:00	17:00	20:00
Lavadora de louça	05:00	24:00	08:00	17:00	20:00
Ferro de passar	05:00	24:00	08:00	17:00	21:00
Aspirador de pó	05:00	24:00	08:00	17:00	19:00
Lâmpadas fluorescente	05:00	24:00	08:00	17:00	19:00
Microondas	05:00	24:00	08:00	17:00	19:00

Fonte: Autoria própria.

Tabela 7 - Perfil de Consumidor - Trabalhador(a) Noturno

Cargas	Início do Intervalo de Acionamento	Fim do intervalo de acionamento	Início do intervalo de restrição	Fim do intervalo de restrição	Instante usual de acionamento da carga
Lavadora de roupa	06:00	21:00	06:00	12:00	15:00
Secadora de roupa	06:00	21:00	06:00	12:00	19:00
Ar condicionado	06:00	21:00	15:00	23:00	06:00
Bomba de piscina	06:00	21:00	06:00	11:00	14:00

Cargas	Início do Intervalo de Acionamento	Fim do intervalo de acionamento	Início do intervalo de restrição	Fim do intervalo de restrição	Instante usual de acionamento da carga
Chuveiro	06:00	21:00	08:00	12:00	15:00
Lavadora de louça	06:00	21:00	06:00	11:00	18:00
Ferro de passar	06:00	21:00	06:00	12:00	13:00
Aspirador de pó	06:00	21:00	06:00	12:00	14:00
Lâmpadas fluorescente	06:00	21:00	06:00	17:00	18:00
Microondas	06:00	21:00	06:00	11:00	18:00

Fonte: Autoria própria.

Tabela 8 - Perfil de Consumidor – Trabalhador(a) do lar

Cargas	Início do Intervalo de Acionamento	Fim do intervalo de acionamento	Início do intervalo de restrição	Fim do intervalo de restrição	Instante usual de acionamento da carga
Lavadora de roupa	00:00	24:00	00:00	07:00	09:00
Secadora de roupa	00:00	24:00	00:00	07:00	14:00
Ar condicionado	00:00	24:00	10:00	17:00	00:00
Bomba de piscina	00:00	24:00	00:00	07:00	13:00
Chuveiro	00:00	24:00	00:00	06:00	16:00
Lavadora de louça	00:00	24:00	00:00	07:00	18:00
Ferro de passar	00:00	24:00	00:00	07:00	08:00
Aspirador de pó	00:00	24:00	00:00	07:00	10:00
Lâmpadas fluorescente	00:00	24:00	06:00	17:00	20:00
Microondas	00:00	24:00	00:00	10:00	18:00

Fonte: Autoria própria.

Vale ressaltar que esta pesquisa não tem o intuito de mapear todos os tipos de consumidores, mas sim apenas identificar perfis diferentes, sendo assim, a quantidade de consumidores avaliados é suficiente para exemplificar diferentes perfis.

6.3 Tarifa variável

Com base nos estudos realizados pelas concessionárias de energia elétrica, foi constatado que a tarifa variável pode ter seu valor alterado em função do dia da semana e da estação do ano, além do horário do dia. Para definição no cenário em análise, foi padronizado que todos os testes de tarifa variável serão aplicados em dias normais de semana e no período sazonal de Verão, com isso, todos os perfis

serão comparados com as mesmas definições de patamares e o mesmo período sazonal.

Para tanto, foi identificado tarifas variáveis utilizadas em três países diferentes. São elas: no Brasil, sendo a tarifa branca utilizada pela Companhia Paranaense de Energia, a COPEL (COPEL, 2020). Em Portugal, a tarifa transitória utilizada pela Alfa Energia (ALFA, 2020) e a tarifa *Time of Use* utilizada pela Alectra Utilities no Canadá (ALECTRA, 2020). Cada tarifa será melhor detalhada a seguir.

6.3.1 Tarifa brasileira

No Brasil, a COPEL é a principal companhia responsável pela distribuição de energia elétrica no estado do Paraná, e desde janeiro de 2020 possibilita que consumidores de baixa tensão utilizem a tarifa variável, denominada Tarifa Branca.

Em dias úteis, a tarifa branca possui três patamares ao longo do dia, ponta, intermediário e fora de ponta. Na ponta a tarifa é mais cara enquanto fora de ponta a tarifa é mais barata, já a tarifa intermediária possui valor entre os patamares ponta e fora de ponta. Na Tabela 9, é possível identificar os patamares e os horários de cada patamar ao longo do dia (COPEL, 2020).

Tabela 9 - Patamares da tarifa Branca ao longo do dia

Patamar	Horário
Fora da Ponta	22:00 - 17:00
Intermediário	17:00 - 18:00 21:00 - 22:00
Ponta	18:00 - 21:00

Fonte: (COPEL, 2020).

No período das 22h às 17 do dia seguinte o preço da tarifa é fora de pico. No período das 17h às 18h e das 21h às 22h é o preço do patamar intermediário, e por fim, no período das 18h às 21h é o preço do patamar de ponta em vigor (COPEL, 2020).

Os preços de cada patamar podem ser identificados na Tabela 10. Onde no patamar fora de ponta o valor da tarifa é 0,68559 [R\$/kWh], enquanto no patamar intermediário o valor da tarifa é R\$0,93679, e por fim, para o patamar de ponta o valor da tarifa é de R\$1,45488 (COPEL, 2020).

Tabela 10 - Tarifa Branca B1 – Residencial

Patamar	Preço [R\$/kWh]
Fora da Ponta	0,68559
Intermediário	0,93679
Ponta	1,45488

Fonte: (COPEL, 2020).

6.3.2 Tarifa portuguesa

Em Portugal, a Alfa Energia é uma das companhias atuantes no mercado responsável pela distribuição de eletricidade à consumidores de baixa tensão para todo o país, e desde o começo de 2020 está em vigor que consumidores de baixa tensão possam solicitar a tarifa variável, também conhecida como tarifa transitória (ALFA, 2020).

Para consumidores de baixa tensão, a tarifa transitória possui três patamares, nomeados em ponta, cheia e vazio normal, estes patamares são distintos, porém se repetem ao longo do dia. Vale ressaltar que o período sazonal em análise neste trabalho é o verão. Vide Tabela 11.

Tabela 11 - Ciclo diário para clientes Baixa Tensão

Patamar	Horário
Vazio Normal	00:00 - 08:00
	22:00 - 24:00
Cheias	08:00 - 10:30
	13:00 - 19:30
	21:00 - 22:00
Pontas	10:30 - 13:00
	19:30 - 21:00

Fonte: (Alfa Energia, 2020).

Os preços de cada patamar podem ser identificados na Tabela 12, sendo assim, o valor da tarifa para o patamar vazio normal é 0,0972[€/kWh], enquanto para o patamar de cheias a tarifa é de 0,1626[€/kWh] e por fim, o valor da tarifa para o patamar de ponta é de 0,2728[€/kWh].

Tabela 12 - Preços Tarifários Alfa Energia

Patamar	Preço [€/kWh]
Pontas	0,2728
Cheias	0,1626
Vazio Normal	0,0972

Fonte: (Alfa Energia, 2020).

6.3.3 Tarifa canadense

No Canadá, a Alectra Utilities é responsável pela distribuição de energia elétrica para consumidores residenciais e pequenos comerciantes. Atualmente, ela é responsável pelo fornecimento de eletricidade para milhares de casas e comércios distribuídos em 17 cidades e povoados canadenses (ALECTRA, 2020).

Para a Alectra, na tarifação Time-of-Use, os valores das tarifas variam ao longo do dia, nos dias da semana e a estação do ano. Porém, como definido neste trabalho, a tarifa utilizada será em dias normais da semana e no verão.

Nesta tarifação, há três patamares distintos, on-peak, mid-peak e o off-peak. O período On-Peak corresponde das 11h às 17h, enquanto o período Off-Peak corresponde das 19h às 07h. Os períodos restante corresponde ao período Mid-peak, sendo eles das 07h às 11h e das 17h às 19h (ALECTRA, 2020).

O valor da tarifa on-peak é de 0,134 [C\$/kWh], enquanto que o valor da tarifa mid-peak é de 0,094 [C\$/kWh], já o valor da tarifa off-peak é de 0,065 [C\$/kWh]. Tanto os períodos das tarifas quanto seus respectivos valores podem ser analisados na Tabela 13.

Tabela 13 - Períodos ToU Alectra Utilities

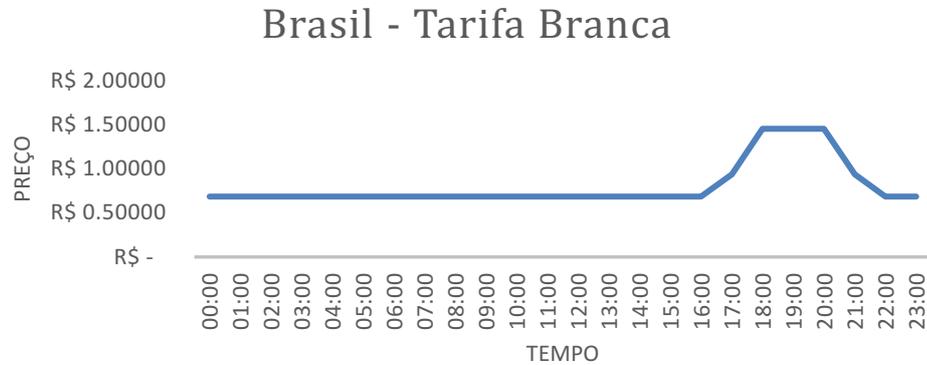
Patamar	Horário	Preço [C\$/kWh]
Off-Peak	19:00 - 07:00	0,065
Mid-Peak	07:00 - 11:00 17:00 - 19:00	0,094
On-Peak	11:00 - 17:00	0,134

Fonte: (Alectra Utilities, 2020).

Portanto, todas as tarifas variáveis mencionadas possuem três patamares, nos quais podem ser definidas como pico, intermediária e fora de pico. As Figuras 14, 15 e 16 correspondem a variação da tarifa ao longo do dia do Brasil, Portugal e

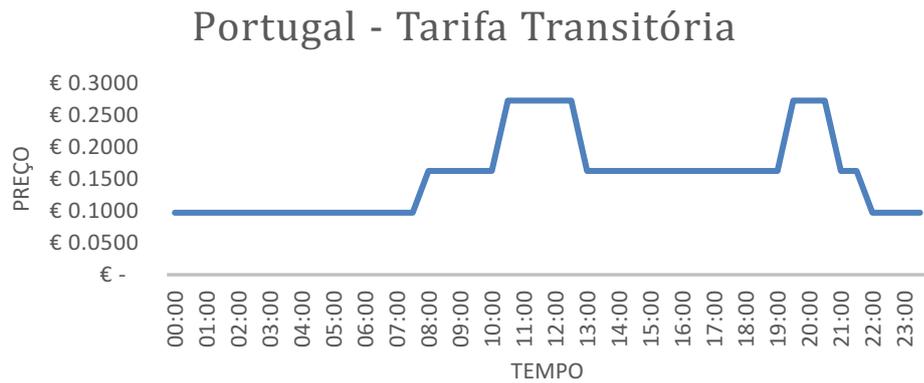
Canadá, respectivamente. Com isso, possibilita-se realizar o comparativo entre as tarifas.

Figura 14 - Variação da tarifa Branca ao longo do dia



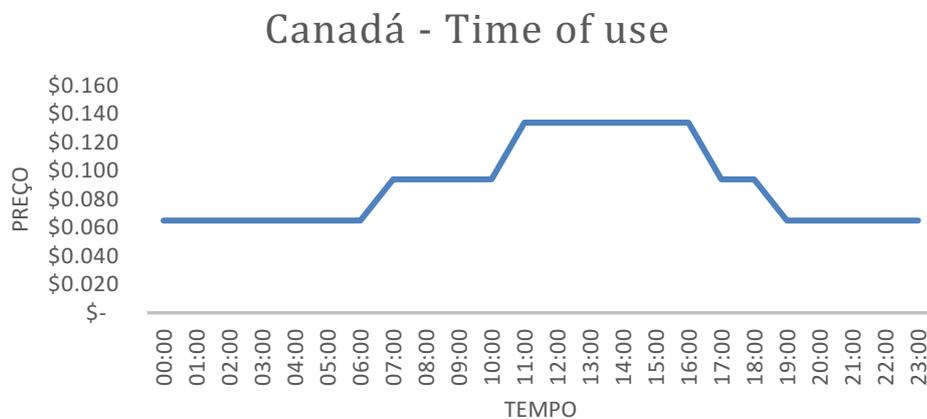
Fonte: Autoria própria.

Figura 15 - Variação tarifa Transitória ao longo do dia, Portugal.



Fonte: Autoria própria.

Figura 16 - Variação da tarifa Time of Use, Canadá.



Fonte: Autoria própria.

Com base nas figuras acima, é possível analisar que a tarifa variável no Brasil possui a menor distribuição de variação de preços no tempo, enquanto que a tarifa variável de Portugal possui a maior distribuição de variação de preços no tempo.

7 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para avaliar o desempenho do gerenciador de cargas residencial, é necessário obter um padrão comparativo, sendo assim, este valor padrão foi gerado a partir do instante de acionamento mencionado nas Tabelas 6, 7 e 8 para os perfis de trabalhadores diurnos, noturnos e do lar, respectivamente.

A partir destes instantes de acionamento, foi possível identificar o valor pago pelos perfis de consumidores ao dia para as tarifas brasileira, portuguesa e canadense. Sendo assim, a Tabela 14 corresponde ao valor pago ao final do dia pelos consumidores sem o gerenciamento de cargas.

Tabela 14 - Valor pago por dia de uso das instalações sem gerenciamento de carga pelo lado da demanda

	BRASIL	PORTUGAL	CANADÁ
Trabalhador(a) diurno	R\$ 27,4457	€4,6454	C\$1,8127
Trabalhador(a) noturno	R\$ 25,5594	€5,3343	C\$2,9442
Trabalhador(a) do lar	R\$ 22,1589	€4,0845	C\$2,7173

Fonte: Autoria própria.

Definido o padrão para comparação, a próxima etapa é aplicar o gerenciador, baseado no método PSO, na curva de carga da residência a fim de determinar o instante de acionamento no qual o valor acumulado da tarifa (custo de energia elétrica) ao final do dia seja mínimo.

O método de otimização PSO foi aplicado nas duas funções objetivos a fim de avaliar o melhor desempenho dentre as funções de custo para o problema, com o intuito de obter a maior redução no custo.

Visto que este trabalho utiliza duas funções distintas para minimização do custo total da energia elétrica, é possível avaliar o desempenho entre as funções objetivo.

Os parâmetros utilizados no método de otimização PSO foram os mesmos mencionados anteriormente, sendo um enxame de 40 partículas, com $\omega = 0.5$, $c_1 = 1.5$ e $c_2 = 1.5$ e com critério de parada segundo as Equações 11 e 12.

As variações do gerenciador foi em perfil de consumidor, em tarifa variável e em função de custo objetivo. Para perfis de consumidor há 3 variações, trabalhador(a) diurno, trabalhador(a) noturno e trabalhador(a) do lar. Para a tarifa

variável há 3 variações, tarifa brasileira, tarifa portuguesa e tarifa canadense. E por fim, para a função de custo objetivo há 2 variações, função de custo objetivo 1, Equação 2 e função de custo objetivo 2, Equação 3.

Foram realizadas 1000 repetições para cada iteração, nas quais com base nos instantes de acionamentos ótimo encontrado, foi calculado o valor diário pago pelo consumo de energia elétrica a partir da multiplicação da potência utilizada no instante de tempo pelo valor da tarifa neste instante, de acordo com a tarifa variável em questão.

Com isso, se pode extrair a média do valor pago ao dia pelo consumo da energia elétrica para as 1000 repetições do PSO, o menor valor pago ao dia pelo consumo dentre as 1000 repetições e o instante de acionamento das cargas respectivo ao menor valor encontrado pago pelo consumo ao dia.

Os resultados obtidos de média do valor pago ao dia pelo consumo da energia elétrica para as 1000 repetições, o menor valor pago ao dia pelo consumo de energia elétrica dentre as 1000 repetições e o desvio padrão para o gerenciador de cargas residencial com o algoritmo PSO podem ser analisados na Tabela 15.

Tabela 15 – Média, mínimo e desvio padrão do valor pago pelo consumo de energia elétrica com o gerenciamento de carga pelo lado da demanda para as 1000 repetições

		Brasil [R\$]		Portugal [€]		Canadá [C\$]	
		Função 1	Função 2	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2
Trabalhador(a) diurno	Média do valor pago ao dia	19,1698	22,6614	2,7241	2,8225	1,8128	1,8154
	Menor valor pago ao dia	19,1698	20,6996	2,7241	2,7241	1,8127	1,8127
	Desvio padrão	1,42E-05	0,8157	1,15E-05	0,0738	0,0005	0,0046
Trabalhador(a) noturno	Média do valor pago ao dia	19,5547	20,6927	4,6387	4,7031	2,2590	2,3161
	Menor valor pago ao dia	19,5546	19,6747	4,6180	4,6180	2,1542	2,1542
	Desvio padrão	0,0011	0,6133	0,0880	0,1485	0,0626	0,0776
Trabalhador(a) do lar	Média do valor pago ao dia	19,1275	19,2993	2,7264	3,0407	1,8141	1,8205
	Menor valor pago ao dia	19,1245	19,1245	2,7241	2,7280	1,8127	1,8127
	Desvio padrão	0,0080	0,1664	0,0173	0,1036	0,0013	0,0150

Fonte: Autoria própria.

Os resultados obtidos de média do valor pago ao dia pelo consumo da energia elétrica para as 1000 repetições, o menor valor pago ao dia pelo consumo de energia elétrica dentre as 1000 repetições e o desvio padrão para o gerenciador de cargas residencial com o algoritmo PSO inserido o fator de inconveniência podem ser analisados na Tabela 16.

Tabela 16 – Média, mínimo e desvio padrão do valor pago pelo consumo de energia elétrica com o gerenciamento de carga pelo lado da demanda e inserido o fator de inconveniência para as 1000 repetições

		Brasil [R\$]		Portugal [€]		Canadá [C\$]	
		Função 1	Função 2	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2
Trabalhador(a) diurno	Média do valor pago ao dia	20,5584	27,0314	3,0943	3,4232	1,8147	1,8194
	Menor valor pago ao dia	19,3254	21,7099	2,7647	3,0304	1,8127	1,8127
	Desvio padrão	0,3566	1,5259	0,0897	0,1583	0,0048	0,0080
Trabalhador(a) noturno	Média do valor pago ao dia	19,6775	22,7927	5,0658	5,1878	2,3513	2,4669
	Menor valor pago ao dia	19,5546	19,9440	4,8803	4,8827	2,2530	2,2784
	Desvio padrão	0,5093	1,2929	0,2009	0,2024	0,0713	0,0700
Trabalhador(a) do lar	Média do valor pago ao dia	19,7007	20,1380	3,8169	3,8291	2,1569	2,1758
	Menor valor pago ao dia	19,1245	19,1497	3,6970	3,5863	2,1119	2,1191
	Desvio padrão	0,6808	0,8279	0,0322	0,0471	0,0618	0,0753

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 17 expressa os instantes de acionamento ótimo das cargas residenciais para os três perfis de consumidores determinados e segundo a tarifa variável brasileira.

A funções objetivo denominadas como Função 1 e Função 2, nas tabelas de 17 a 24 e nas Figuras 17 a 19, correspondem a Equação 2 e Equação 3, respectivamente.

Vale ressaltar que, para todos os testes realizados, a janela de tempo é de 15 minutos com instante inicial em 00h00min e instante final em 23h45min, obtendo assim, 96 intervalos em um dia.

Tabela 17 - Instante de acionamento utilizando gerenciamento (PSO) na tarifa brasileira

Cargas	Trab. Diurno		Trab. noturno		Trab. do lar	
	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2
Lavadora de roupa	23:00	17:00	15:15	13:00	23:00	23:00
Secadora de roupa	23:00	06:45	12:00	12:30	23:00	14:45
Ar condicionado	00:00	00:00	06:00	06:00	00:00	00:00
Bomba de piscina	22:15	07:30	14:00	11:45	22:00	13:00
Chuveiro	23:00	23:00	07:00	06:00	23:00	12:00
Lavadora de louça	22:30	05:30	13:00	14:30	22:30	13:30
Ferro de passar	21:00	20:45	12:00	15:00	08:00	14:00
Aspirador de pó	21:00	19:15	12:00	12:45	08:15	07:00
Lâmpadas fluorescente	21:00	17:15	17:00	17:00	21:00	09:15
Microondas	23:00	06:15	11:45	12:00	23:00	21:00

Fonte: Autoria própria.

A Tabela 18 corresponde ao instante de acionamento ótimo das cargas para os três perfis residenciais segundo a tarifa portuguesa, novamente realizado o comparativo entre as funções objetivos.

Tabela 18 - Instante de acionamento utilizando gerenciamento (PSO) na tarifa portuguesa

Cargas	Trab. Diurno		Trab. Noturno		Trab. do lar	
	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2
Lavadora de roupa	23:00	05:30	13:15	13:15	23:00	21:30
Secadora de roupa	06:30	23:00	16:15	12:45	23:00	07:00
Ar condicionado	00:00	00:00	06:00	06:00	00:00	00:00
Bomba de piscina	22:45	23:30	13:45	15:15	23:30	23:30
Chuveiro	06:15	07:00	06:15	06:00	23:00	06:15
Lavadora de louça	22:30	06:00	15:15	17:00	22:30	22:30
Ferro de passar	21:00	21:00	14:45	13:15	21:00	21:00
Aspirador de pó	21:00	21:00	14:45	15:15	21:00	21:00
Lâmpadas fluorescente	21:00	21:00	17:00	17:00	21:00	21:00
Microondas	21:00	17:15	17:15	15:30	23:00	23:00

Fonte: Autoria própria.

E por fim, a Tabela 19 informa os instantes de acionamento ótimo para as cargas residenciais, novamente para os três perfis de consumidores e de acordo com a tarifa canadense.

Tabela 19 - Instante de acionamento utilizando gerenciamento (PSO) na tarifa canadense

Cargas	Trab. Diurno		Trab. noturno		Trab. do lar	
	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2
Lavadora de roupa	23:00	23:00	20:00	20:00	23:00	23:00
Secadora de roupa	23:00	18:45	20:00	20:00	23:00	19:30
Ar condicionado	00:00	00:00	06:00	06:00	00:00	00:00
Bomba de piscina	05:15	23:30	19:30	20:30	20:15	23:30
Chuveiro	23:00	19:30	19:45	06:00	23:00	18:45
Lavadora de louça	22:30	20:30	19:30	19:15	22:30	20:30
Ferro de passar	21:00	21:00	18:00	18:00	21:00	21:00
Aspirador de pó	21:00	21:00	18:00	18:00	21:00	21:00
Lâmpadas fluorescente	21:00	21:00	18:00	18:00	21:00	21:00
Microondas	23:00	20:00	20:00	20:00	23:00	20:00

Fonte: Autoria própria.

Os instantes de acionamento para as cargas foram distintos para as duas funções objetivos, pois, apesar de ambas visarem a redução de custo pago pela energia elétrica pelo consumidor, as abordagens são distintas, enquanto a função objetivo 1 reflete o custo pago pelo consumidor, a função objetivo 2 visa aproximar a curva de carga da residência da curva tida como ótima.

Portanto, de acordo com os dados informados nas Tabelas 17, 18 e 19, é possível determinar o instante de acionamento em que o consumidor irá pagar o menor valor pelo consumo de energia elétrica.

Porém, estes horários podem não ser conveniente para os consumidores, como por exemplo o acionamento do micro-ondas pelo trabalhador diurno sob a tarifa brasileira (Tabela 17), ou o trabalhar diurno se propor a acionar o chuveiro as 23h na tarifa portuguesa (Tabela 18), ou mesmo o acionamento do micro-ondas pelo trabalhador noturno na tarifa canadense (Tabela 19), se tornando sugestões de acionamento ineficaz para determinados consumidores.

Sendo assim, foi inserido o fator de inconveniência às funções objetivo, de acordo com a Tabela 1, no qual os instantes de acionamentos fora do intervalo de comodidade reflete em um fator que penaliza estes acionamentos, segundo a Equação 6.

O fator k foi ponderado com o objetivo de tornar o resultado do fator de inconveniência proporcional as funções custo, visto que o fator de inconveniência se obtém em função de intervalos de tempo, enquanto os resultados das funções custo se obtém através da somatória de potências instantâneas multiplicado pela tarifa variável em vigor. Sendo assim, o fator k possui valor de 1 para a tarifa brasileira, 2 para a tarifa portuguesa e 4 para a tarifa canadense.

Foram escolhidos estes valores foram capazes de conciliar o deslocamento de cargas em intervalos satisfatório e reduzir o valor pago pelo consumo.

Novamente aplicado o gerenciamento de cargas pelo lado da demanda. Com isso, foi possível determinar os instantes de acionamento convenientes aos consumidores e ao mesmo tempo reduzir o custo gasto pelo consumo de energia elétrica.

As Tabelas 20, 21 e 22 correspondem aos instantes de acionamento ótimo das cargas residenciais encontrado pelo GLD ao adicionar o fator de inconveniência na função objetivo. As tabelas contêm os instantes de acionamento para os três perfis de consumidores segundo a tarifa brasileira, tarifa portuguesa e tarifa canadense, respectivamente.

Tabela 20 - Instante de acionamento utilizando gerenciamento (PSO) com o fator de inconveniência na tarifa brasileira

Cargas	Trab. Diurno		Trab. noturno		Trab. do lar	
	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2
Lavadora de roupa	21:00	18:00	15:30	17:15	12:15	11:15
Secadora de roupa	23:00	20:00	15:00	16:15	12:15	14:30
Ar condicionado	00:30	00:30	06:00	06:00	00:00	00:00
Bomba de piscina	06:00	07:30	15:15	17:00	08:15	12:00
Chuveiro	22:00	23:00	12:00	12:00	14:30	16:00
Lavadora de louça	22:00	17:00	13:00	12:30	14:00	15:00
Ferro de passar	21:00	21:00	12:30	14:00	08:45	12:00
Aspirador de pó	21:00	21:00	12:30	12:45	12:15	09:00
Lâmpadas fluorescente	21:00	21:00	17:00	17:00	21:00	21:00
Microondas	22:00	19:15	14:15	11:30	22:00	21:30

Fonte: Autoria própria.

Tabela 21 - Instante de acionamento utilizando gerenciamento (PSO) com o fator de inconveniência na tarifa portuguesa

Cargas	Trab. Diurno		Trab. noturno		Trab. do lar	
	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2
Lavadora de roupa	18:00	18:30	16:00	17:30	13:45	14:00
Secadora de roupa	23:00	23:00	15:45	16:15	15:15	13:00
Ar condicionado	00:30	00:00	06:00	06:00	00:00	00:00
Bomba de piscina	05:00	07:30	15:30	12:45	13:15	09:45
Chuveiro	22:00	21:30	15:15	17:00	18:00	20:45
Lavadora de louça	22:00	20:30	13:45	18:15	14:15	15:00
Ferro de passar	21:00	21:00	14:30	13:00	20:00	21:00
Aspirador de pó	21:00	21:00	14:45	14:15	21:00	16:15
Lâmpadas fluorescente	21:00	21:00	17:00	17:00	21:00	21:00
Microondas	22:00	18:00	14:45	13:00	22:00	23:00

Fonte: Autoria própria.

Tabela 22 - Instante de acionamento utilizando gerenciamento (PSO) com fator de inconveniência na tarifa canadense

Cargas	Trab. Diurno		Trab. noturno		Trab. do lar	
	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2
Lavadora de roupa	23:00	19:15	19:15	17:15	09:00	09:00
Secadora de roupa	20:45	18:45	19:45	18:30	09:15	09:30
Ar condicionado	00:00	00:00	06:00	06:00	00:00	00:00
Bomba de piscina	05:45	05:00	17:00	17:00	09:00	08:30
Chuveiro	21:45	20:00	20:00	20:00	20:00	18:45
Lavadora de louça	22:30	20:30	19:00	19:30	16:00	16:00
Ferro de passar	21:00	21:00	18:00	18:00	21:00	20:00
Aspirador de pó	21:00	21:00	18:00	18:00	19:00	19:00
Lâmpadas fluorescente	21:00	21:00	18:00	18:00	21:00	21:00
Microondas	20:30	23:00	11:00	15:00	21:15	19:15

Fonte: Autoria própria.

O principal objetivo do GLD neste trabalho é reduzir o valor pago pelo consumo de energia elétrica de acordo com perfis de consumidores, época do ano e regiões onde estão localizados, e isto é realizado determinando os instantes de acionamento ótimo acima mencionado.

Com base no menor valor pago pelo consumo de energia elétrica encontrado em cada iteração, é possível realizar uma comparação percentual entre o padrão comparativo e os casos utilizando o gerenciador (PSO) com as funções custo propostas incluindo ou não o fator de inconveniência.

A Tabela 23 representa a redução percentual do valor diário pago pelo consumo de energia elétrica para os consumidores nas localidades referidas, após aplicado o método de otimização PSO no GLD, porém sem a inserção do fator de inconveniência na função objetivo.

Esta redução percentual é calculada segundo a Equação 15, no qual V_{GLD} corresponde ao valor pago pelo consumo obtido através do GLD, enquanto o V_{semGLD} corresponde ao valor padrão (sem uso de GLD) do consumo de energia elétrica.

$$V_{cons}(\%) = \frac{(V_{GLD} - V_{semGLD})}{V_{semGLD}} * 100 \quad (15)$$

Tabela 23 - Redução percentual do valor pago pelo consumo de energia elétrica com o gerenciamento de carga pelo lado da demanda

Perfil de Consumidor	Brasil (%)		Portugal (%)		Canadá (%)	
	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2
Trabalhador(a) diurno	-30,15	-24,58	-41,36	-41,36	0,00	0,00
Trabalhador(a) noturno	-23,49	-23,02	-13,43	-13,43	-26,83	-26,83
Trabalhador(a) do lar	-13,69	-13,69	-33,31	-33,21	-33,29	-33,29

Fonte: Autoria própria.

Pela análise da Tabela 23, e de acordo com a Tabela 15, é possível notar que a Função 1 foi mais robusta durante as simulações encontrando de modo consistente soluções melhores que a Função 2, em vários dos cenários simulados.

Estes valores são referentes à instantes de acionamento que podem não ser convenientes aos consumidores, sendo necessário a inserção do fator de inconveniência.

Sendo assim, a Tabela 24 corresponde a redução percentual do valor pago pelo consumo de energia elétrica por diferentes perfis de consumidores na referida localidade, após aplicado o fator de inconveniência na função objetivo.

Tabela 24 - Redução percentual do valor pago pelo consumo de energia elétrica com o gerenciamento de carga pelo lado da demanda e inserido o fator de inconveniência

Perfil de Consumidor	Brasil (%)		Portugal (%)		Canadá (%)	
	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2	Função 1	Função 2
Trabalhador(a) diurno	-29,59	-20,90	-40,49	-34,77	0,00	0,00
Trabalhador(a) noturno	-23,49	-21,93	-8,51	-8,49	-23,48	-22,61
Trabalhador(a) do lar	-13,69	-13,58	-9,49	-12,20	-22,28	-22,01

Fonte: Autoria própria.

Pela análise da Tabela 24 e de acordo com a Tabela 16, novamente é possível concluir que a Função 1 foi mais robusta durante as simulações encontrando de modo consistente soluções melhores que a Função 2 em vários dos cenários simulados.

Com base nos dados pelo gerenciador de carga proposto, foi possível realizar um comparativo entre perfis de consumidores a fim de determinar qual perfil se adequa melhor para cada tarifa variável.

Sendo assim, a Figura 17 corresponde aos perfis de consumidores no Brasil, ou seja, o valor pago por trabalhadores diurnos, trabalhadores noturno e perfis do lar segundo a tarifa branca.



Fonte: Autoria própria.

Avaliando este gráfico, é possível concluir que ambas as funções obtiveram resultados semelhantes, salvo perfil trabalhador(a) diurno, no qual a função objetivo 1 obteve melhor desempenho, e entre perfis é possível determinar que o perfil do lar obteve o menor valor pago pelo consumo, sendo o valor do perfil trabalhador diurno

muito próximo, enquanto o perfil noturno obteve o maior valor pago. Deste modo pode-se concluir que, com o uso do GLD, esta tarifa favorece a perfis com hábitos diurnos.

Já a Figura 18 corresponde ao desempenho do gerenciador de carga para os perfis em análise segundo a tarifa portuguesa.



Fonte: Autoria própria.

Analisando a Figura 18, é possível notar claramente que o perfil trabalhador noturno é o que possui o valor diário mais caro pelo consumo, enquanto que o perfil trabalhador diurno possui o menor valor, no qual possui uma pequena redução comparado ao perfil do lar. Isto se deve ao fato do perfil do lar exigir seu conforto antes das 07:00, enquanto o perfil trabalhador diurno aciona suas cargas a partir das 05:00 e a tarifa possui o menor valor até as 08:00, ou seja, o perfil trabalhador diurno possui mais tempo para alocar cargas no período de menor valor tarifário.

E por fim, a Figura 19 corresponde ao desempenho do gerenciador de carga para os perfis de consumidores localizado no Canadá.



Fonte: Autoria própria.

Com base na análise da Figura 19, é possível perceber que o perfil trabalhador diurno possui o mesmo valor diário sem e, com o uso do gerenciador independente da adição do fator de inconveniência, enquanto o perfil trabalhador noturno possui o maior valor pago pelo consumo.

Analisando a Tabela 19 e 22, é possível determinar que o gerenciador de carga alterou os instantes de acionamento para o perfil trabalhador diurno, e mesmo assim o valor pago foi o mesmo, e analisando o perfil da tarifa canadense, é possível notar que o maior valor da tarifa é o intervalo no qual o consumidor não está em sua residência, favorecendo-o. Sendo assim, é possível concluir que este valor é consistente.

O perfil trabalhador noturno obteve seu valor diário pago pelo consumo reduzido, porém teve o maior valor dentre os perfis de consumidores pois os instantes de acionamento considerado cômodo coincidem com instantes de alto valor da tarifa paga, porém, para a tarifa brasileira, seu consumo foi próximo aos demais, no qual o valor foi superior em R\$0,37 do perfil mais próximo, valor este obtido para a função objetivo 1.

Para trabalhos futuros, é possível pesquisar e determinar o comportamento de tarifas variáveis as quais favoreçam consumidores que trabalhem à noite.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devidos aos avanços tecnológicos e o crescente investimento no setor de energia elétrica, provocado pela busca por fontes renováveis e pelo desenvolvimento sustentável, estão surgindo cada vez mais alternativas para a contenção do crescente consumo de energia elétrica. Dentre as inúmeras alternativas, o GLD é o mais tangente aos consumidores no que se diz respeito ao custo de investimento e retorno financeiro esperado.

Pelo estudo realizado neste trabalho, podemos concluir que o método de otimização PSO é um algoritmo adequado que contribui para a redução de custo para o gerenciamento de cargas em função da tarifa variável. Podemos notar que, mesmo quando determinado intervalos considerados cômodos aos consumidores, o algoritmo teve um bom desempenho e pode contribuir para a redução de custo nas residências.

Espera-se que este trabalho sirva de base para trabalhos futuros, este trabalho possui uma base consolidada a respeito do algoritmo PSO, obteve bons resultados no gerenciamento de cargas residenciais e contribuiu para a redução de custo mesmo em intervalos de acionamento favoráveis aos consumidores.

A área de GLD possui muitos segmentos de pesquisa e muitos outros a serem estudados, estas áreas contribuem para o crescimento tecnológico no âmbito mundial sem degradar o meio ambiente.

Atrelado ao GLD, o desenvolvimento de fontes renováveis alternativas possibilitam aos consumidores além de gerenciar suas cargas residenciais, a inserção de energia limpa ao sistema, o que contribui para reduzir os custos advindos da concessionária e em alguns casos, a venda do excedente às concessionárias. Nesta perspectiva, propõem-se como desenvolvimentos futuros a inclusão de agendamento da geração nas unidades consumidoras e a possibilidade de inclusão de condensadores tanto em bancos de baterias fixos como em veículos elétricos.

REFERÊNCIAS

ALECTRA UTILITIES. **Tarifa Branca**. Disponível em: <https://alectrautilities.com/time-use-rates>. Acesso em 26/03/2020.

ALFA ENERGIA. **Planos Tarifários**. Disponível em: <https://www.alfaenergia.pt/tarifas?social=1>. Acesso em 26/03/2020.

ANEEL. **Aprenda a calcular o consumo do seu aparelho e economize energia**. Disponível em: http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/17-05_materia1_3.pdf. Acesso em 12/05/2020;

ANEEL. **Tarifa branca é a nova opção para quem tem consumo acima de 250 kW/h**. Disponível em: http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao-2/-/asset_publisher/zXQREz8EVIZ6/content/tarifa-branca-e-nova-opcao-para-quem-tem-consumo-acima-de-250-kwh/656877?inheritRedirect=false. Acesso em 16/05/2019;

ERSE. **Tarifas e preços para a energia elétricas e outros serviços em 2020**. Disponível em: https://www.erse.pt/media/ktidmb/c/diretiva-erse-12_2019tarifaspreece2020.pdf. Acesso em 26/03/2020.

FARIA, P., SOARES, J., MORAIS, H., SOUSA, T. **Modified Particle Swarm Optimization Applied to Integrated Demand Response and DG Resourcer Scheduling**. IEEE Transaction on Smart Grid, vol 4, 2013.

FREIRE, L. M. et al. **Perspectives of Smart Grid in the Brazilian Electricity Market**. 2011 IEE PES Conference on innovative smart grid technologies Latin America, Medelim, 2011.

GRANDITI, G. et al. **Heuristic-Based Shiftable Loads Optimal Management in Smart Micro-Grid**. IEEE Transactions on Industrial Informatics. vol. 11. pp. 271-280. IEEE, 2015.

HASSAN, R.; COHANIM, B.; WECK, O. **A comparison of particle swarm optimization and the genetic algorithm**. 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 2004.

JAYADEV V, K.; SWARUP, K. S.; **Optimization of Microgrid with Demand Side Management using Genetic Algorithm**. IET Conference on Power in Unity: a whole system approach. pp. 1-6. London, 2013.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. **Particle Swarm Optimization**, Proceeding of the IEEE International Conference on Neural Networks. pp. 1942-1945, Perth, Australia 1995.

KUNWAR, N.; YASH, K.; KUMAR, R.; **Area-Load Based Pricing in DSM Through ANN and Heuristic Scheduling**. IEEE Transactions on Smart Grid. vol.4. IEEE, 2013.

LOGENTHIRAN, T., SRINIVASAN, D., PHYU, E. **Particle Swarm Optimization for Demand Side Management in Smart Grid.** IEEE Innovative Smart Grid Technologies, Asia, 2015.

LOGENTHIRAN, T., SRINIVASAN, D., SHUN, T. Z. **Demand Side Management in Smart Grid Using Heuristic Optimization.** IEEE Transactions on Smart Grid. IEEE. vol 3. 2012.

MEYABADI, A. F.; DEIHIMI, M. H.; **A Review of demand-side management: Reconsidering theoretical framework.** Renewable and Sustainable Energy Reviews. 80 ed. p. 367-379. Iran, 2017.

MORGAN, M.Y. et al. **Matching Demand with Renewable Resources Using Artificial Intelligence Techniques.** Eurocon 2013. pp. 1011-1019. Croácia, 2013.

MOSHARI, A. et al. **Demand-Side Behavior in the Smart Grid Environment.** 2010 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe, Guthenberg, 2010.

MOSLEHI, K. KUMAN, R. **A Reability Perspective of the Smart Grid.** IEEE Transactions on Smart Grid. vol.1. IEEE. 2010.

MOSTAFA, H. A.; SHATSHAT, R. E.; **A Review on Energy Management Systems.** IEEE PES T&D Conference and Exposition, pp. 1-5. 2014.

NAZARKO, J.; STYCZYNSKI, Z. A.; **Application of Statistical and Neural Approaches to the Daily Load Profiles Modelling in Power Distribution System.** IEEE, 1999.

PANT, M., THANGARAJ, R., ABRAHAM. **Particle Swarm Optimization: Performance Tuning and Empirical Analysis.** Foundations of Computational Intelligence Volume 3. Studies in Computational Intelligence, vol 203. Springer, Berlin, Heidelberg,2009.

RAHATE, N. D. KINHEKAR, N. **Demand side management for household equipment's.** 2017 International Conference on Information, Communication, Instrumentation and Control (ICICIC), Indore, 2017, pp. 1-5.

SARIFI, R.; FATHI, S. H.; VAHIDINASAB, V. **A Review on Demand-side tools in electricity market.** Renewable and Sustainable Energy Review. 72. ed. p. 565-572. Iran, 2017.

SIEBERT, L. C. et al. **Gerenciamento pelo Lado da Demanda em Redes Inteligentes Utilizando Algoritmos Genéticos.** IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos. 2012.

SILVA, R. V.; AFFONSO, C. M.; **Demand Side Management of a Residential System using Simulated Annealing.** IEEE Latin America Transactions, vol.13. IEEE. 2015.

UEHARA, T. et al. **Frequency Control using Real-Time Pricing for Isolated Power Systems**. International Conference on Power Electronics. Korea, 2015.

VIDAL, A. R. S.; BATISTA, L. S. **Otimização Evolutiva do Gerenciamento pelo Lado da Demanda em Smart Grid**. XX Congresso Brasileiro de Automática. Belo Horizonte, 2014.

VLOT, M. C.; KNIGEE, J. D.; HANSLOOTWEG, J. G.; **Economical Regulation Power Through Load Shifting with Smart Energy Appliance**. IEEE Transactions on Smart Grid, vol.4. IEEE, 2013.

WANG, Y. et al. **Load Profiling and Its Application to Demand Response: A Review**. Tsinghua Science and Technology. vol. 20. pp. 117-129. China, 2015.

COPEL. **Tarifa Branca**. Disponível em:

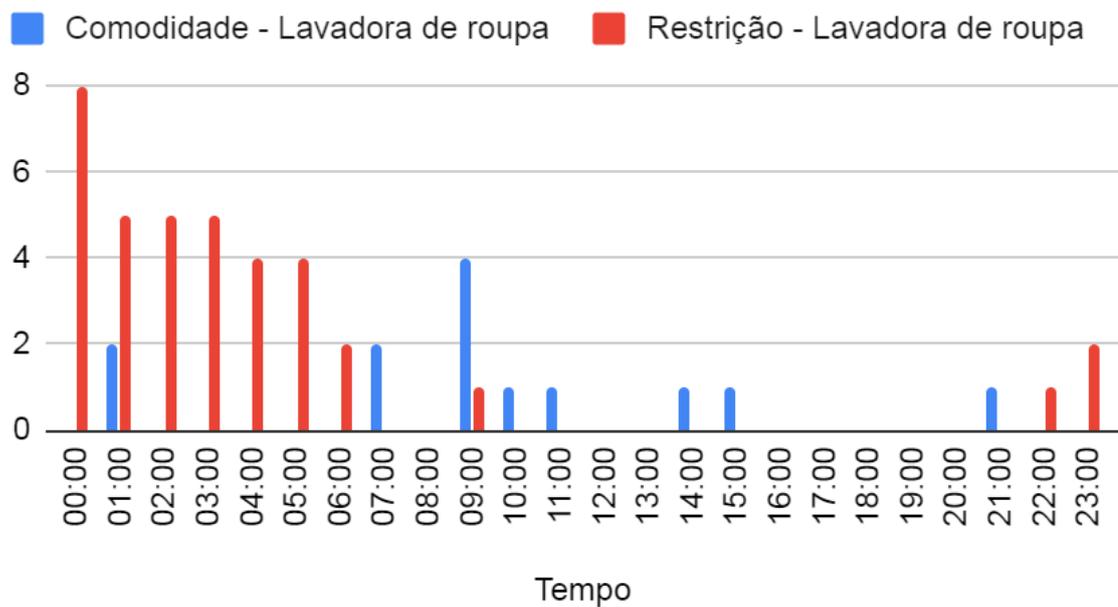
<https://www.copel.com/hpcopel/root/nivel2.jsp?endereco=%2Fhpcopel%2Findustrial%2Fpagcopel2.nsf%2Fdocs%2FB0CA4C8DF4B62F98832581F00058CCF9>. Acesso em 26/03/2020.

APÊNDICE A – RESULTADO DA PESQUISA DE PERFIL DE CONSUMIDOR

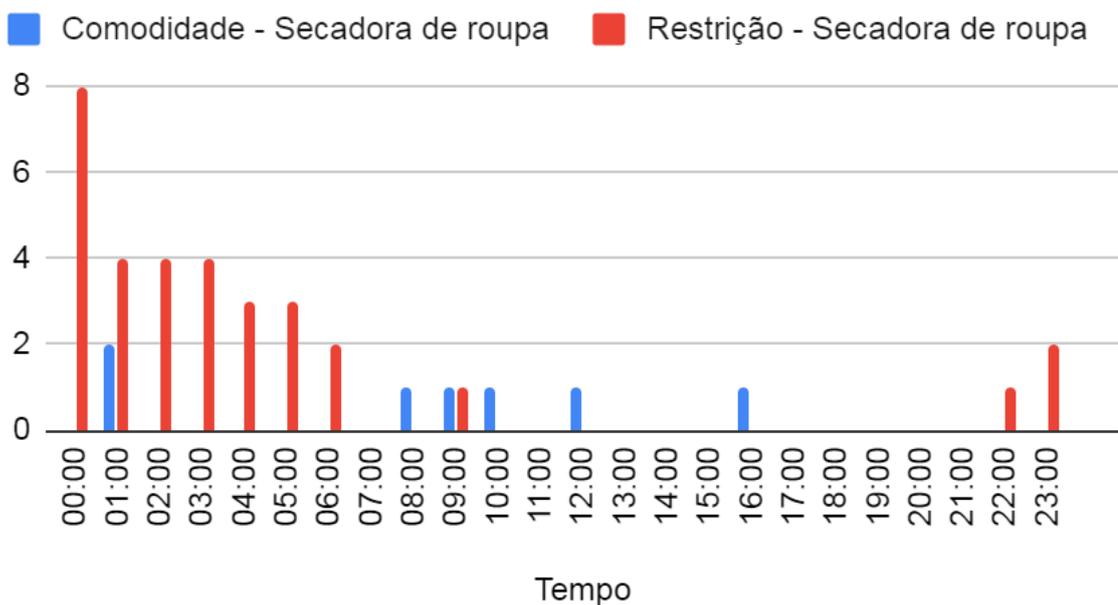
A pesquisa foi realizada com o intuito de determinar os instantes de acionamento para cada equipamento residencial de acordo com diferentes perfis de consumidores. Sendo assim, a pesquisa foi filtrada para perfis de trabalhadores diurnos, trabalhadores noturnos e perfis do lar.

Abaixo segue o resultado da pesquisa para perfil trabalhadores(as) do lar.

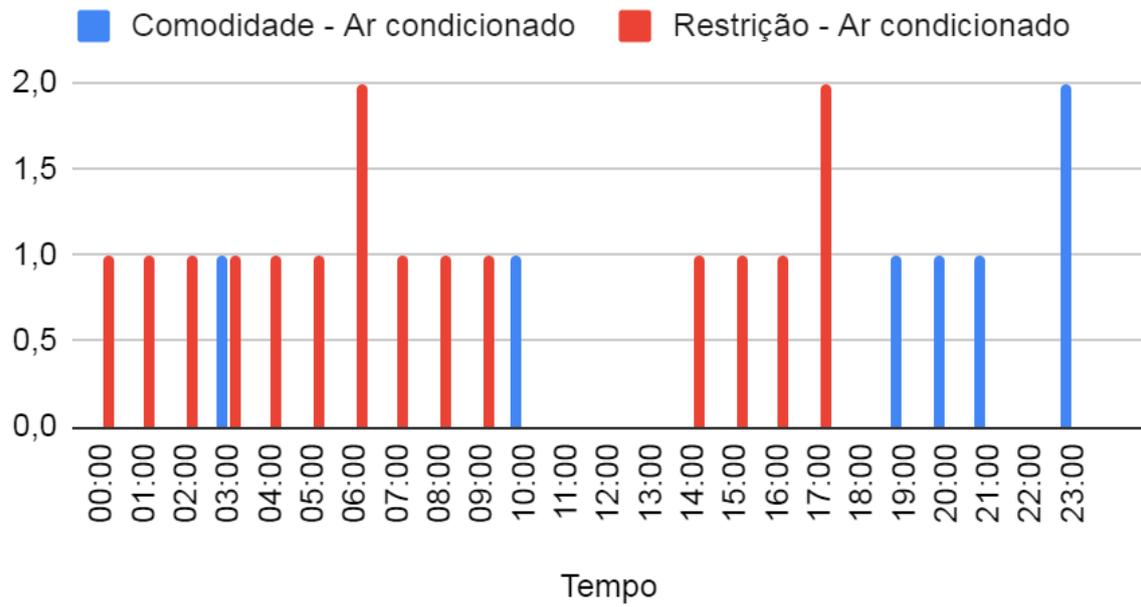
Lavadora de roupa



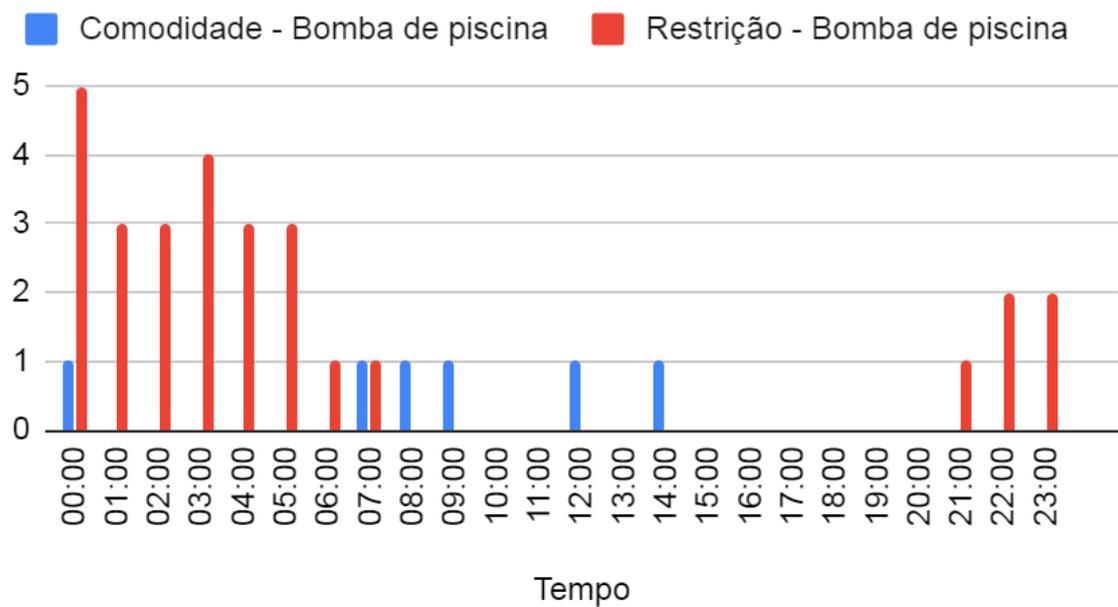
Secadora de roupa



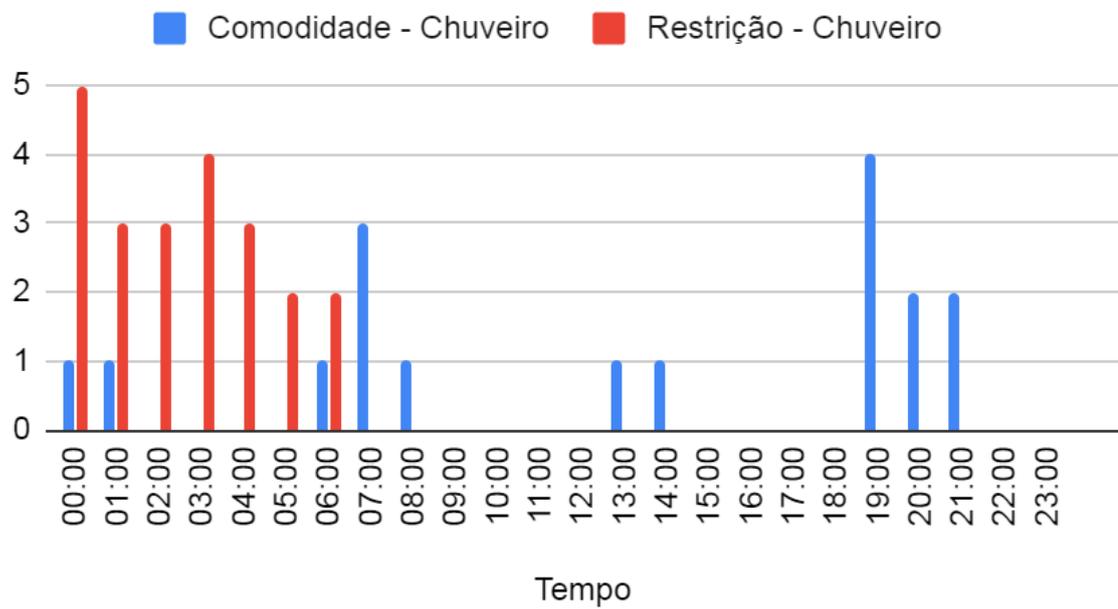
Ar condicionado



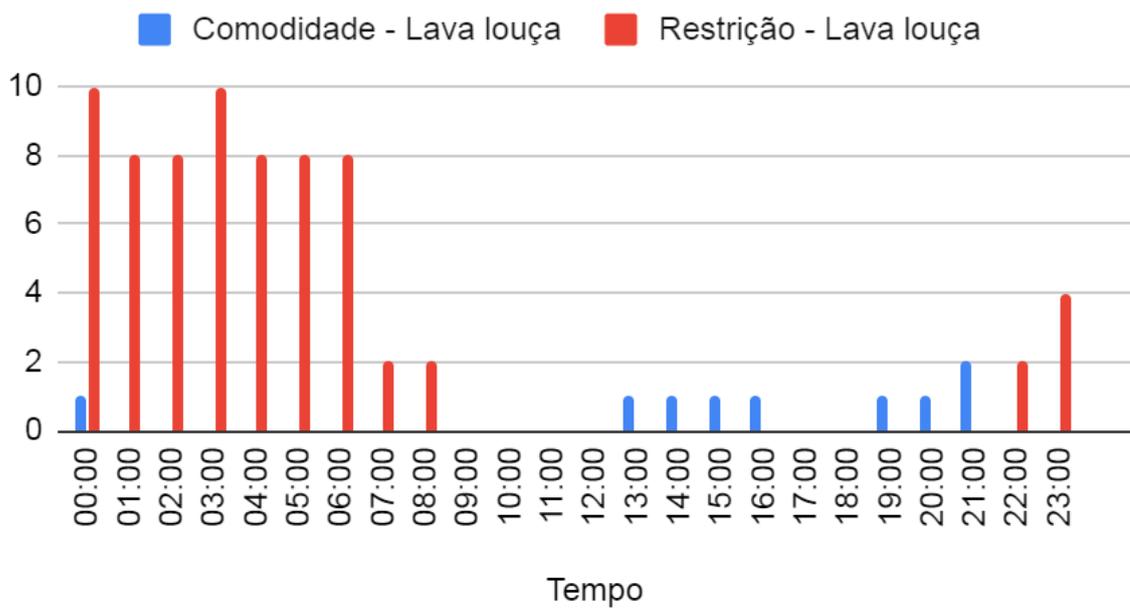
Bomba de piscina



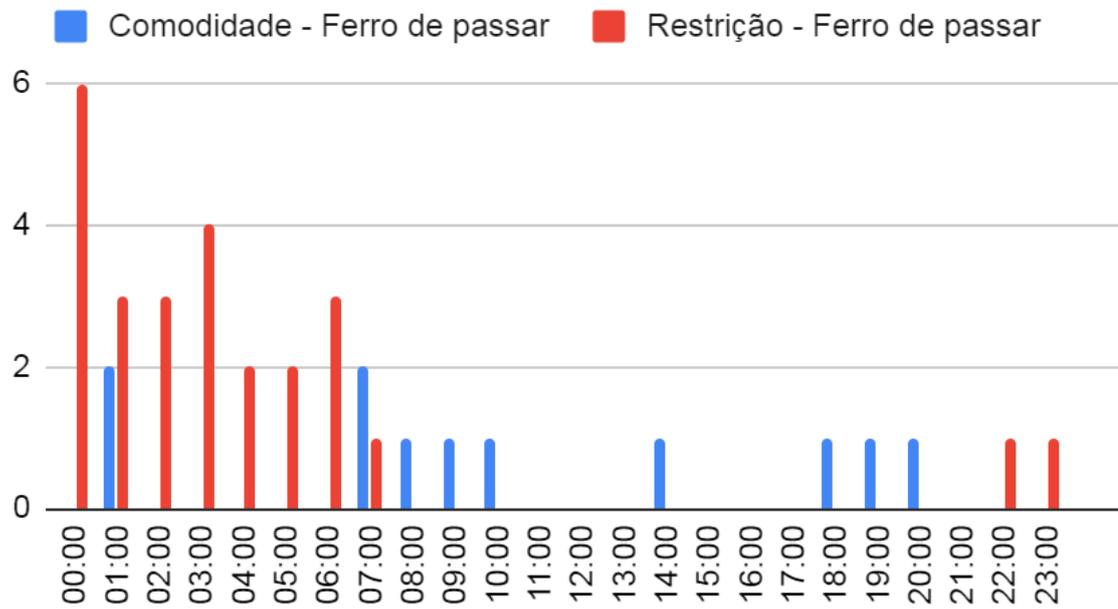
Chuveiro



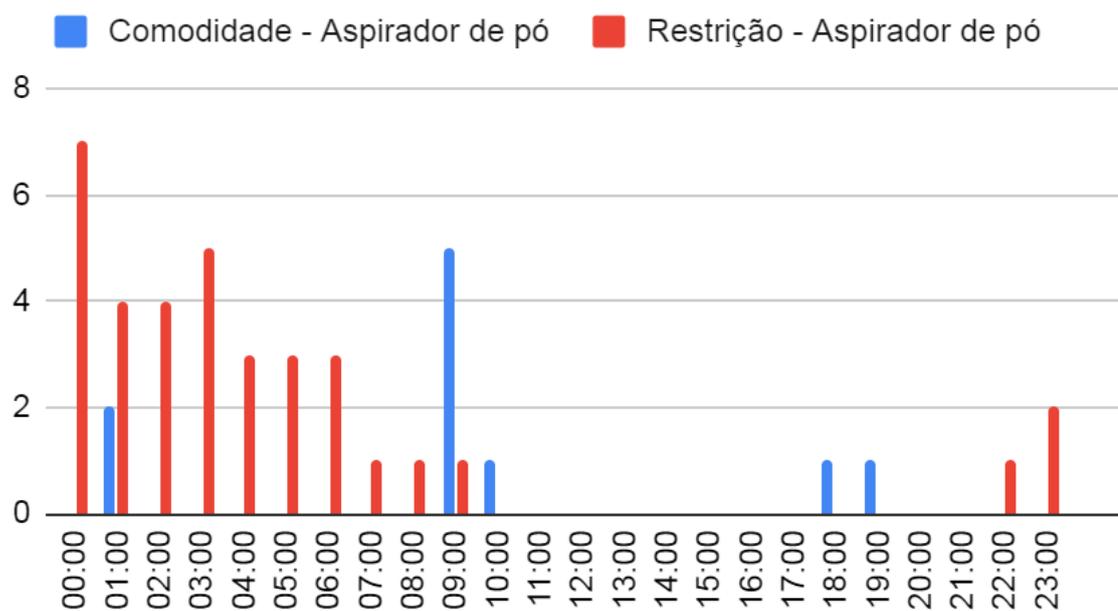
Lava louça



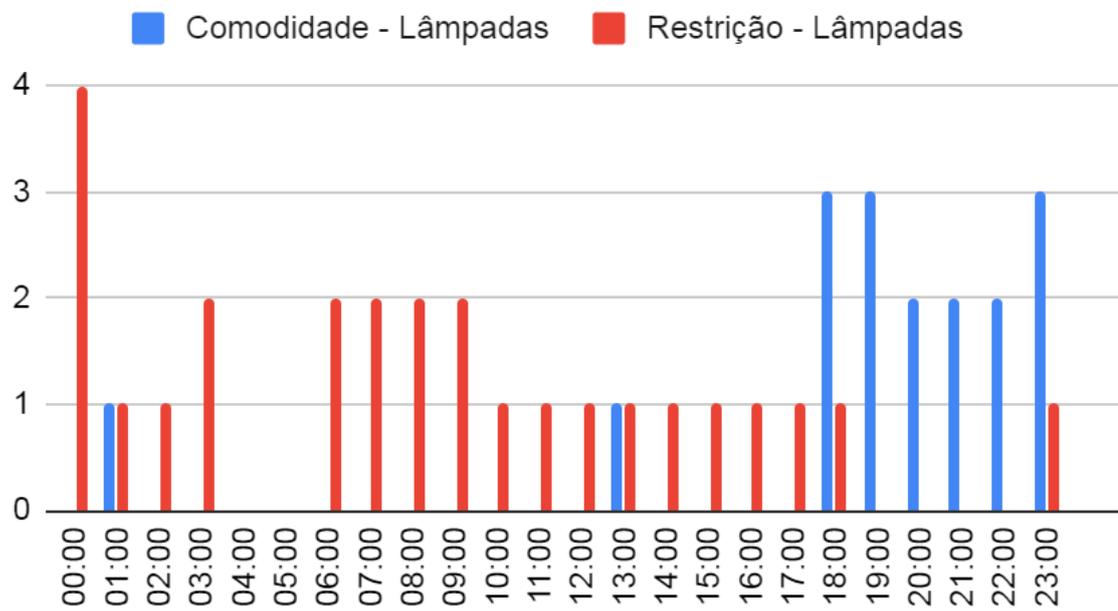
Ferro de passar



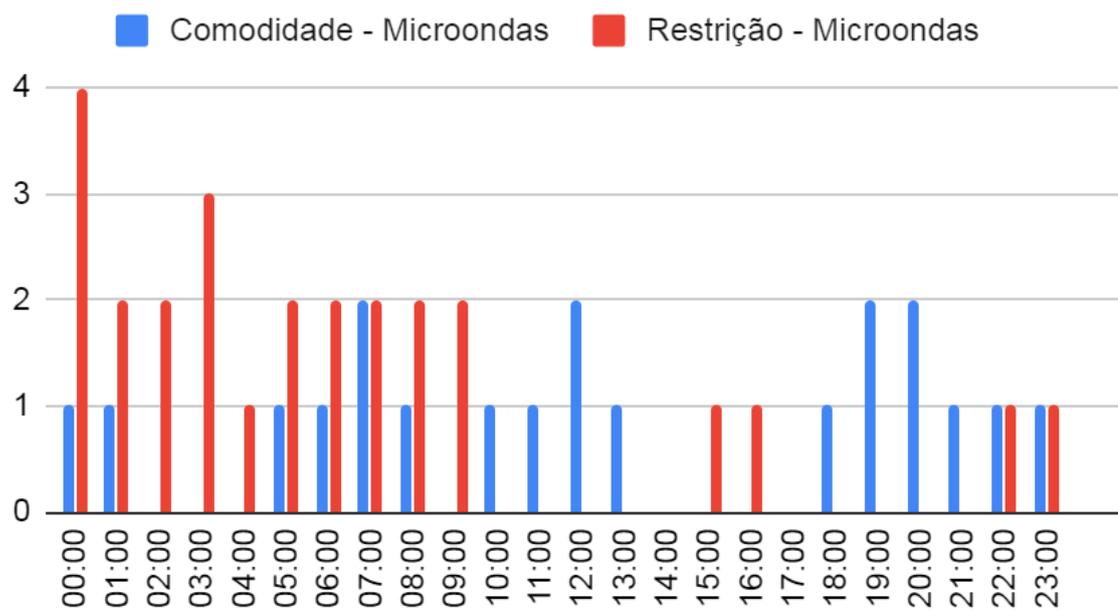
Aspirador de pó



Lâmpadas

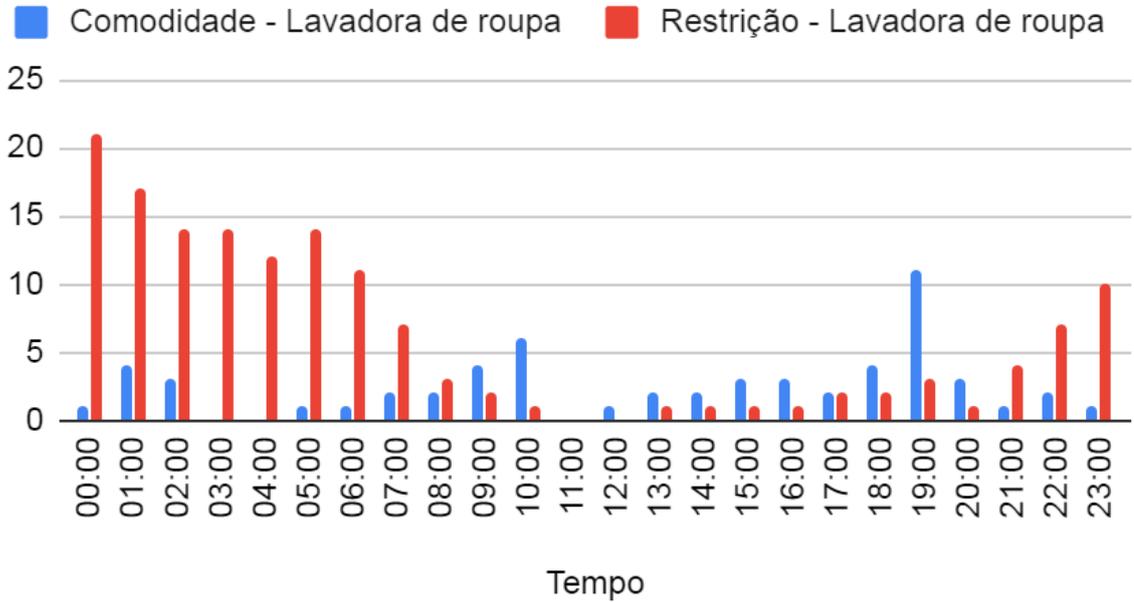


Microondas

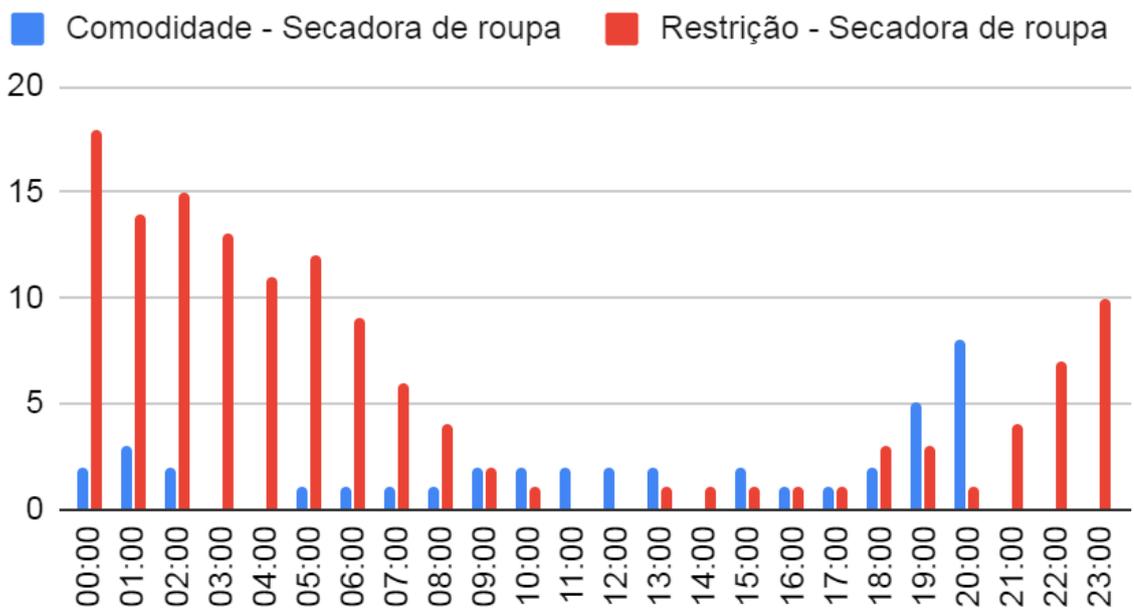


Abaixo segue o resultado da pesquisa para trabalhadores diurnos.

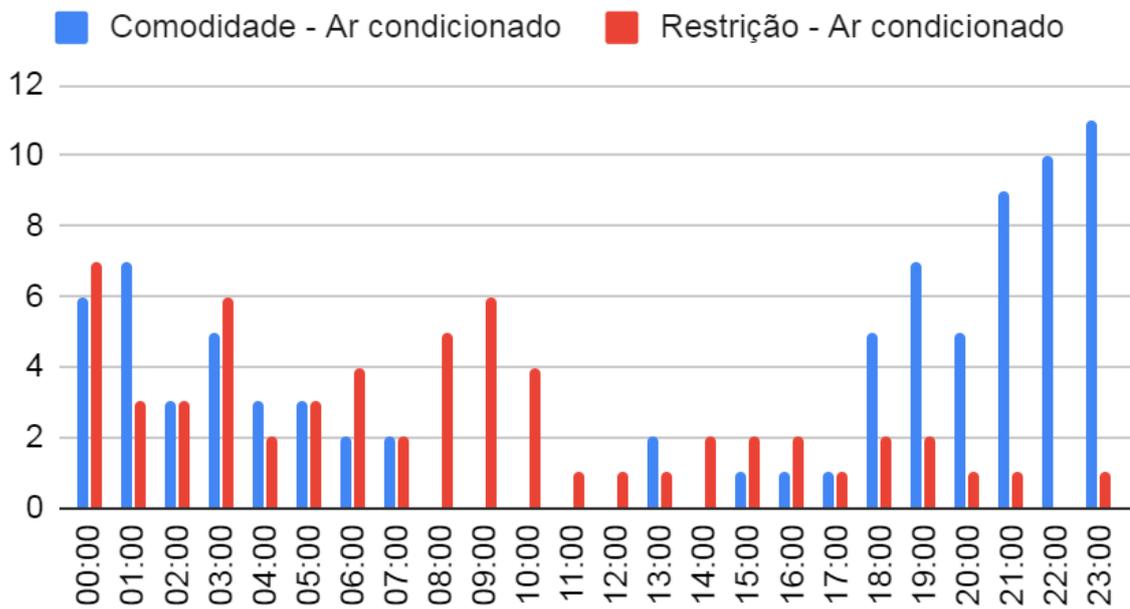
Lavadora de roupa



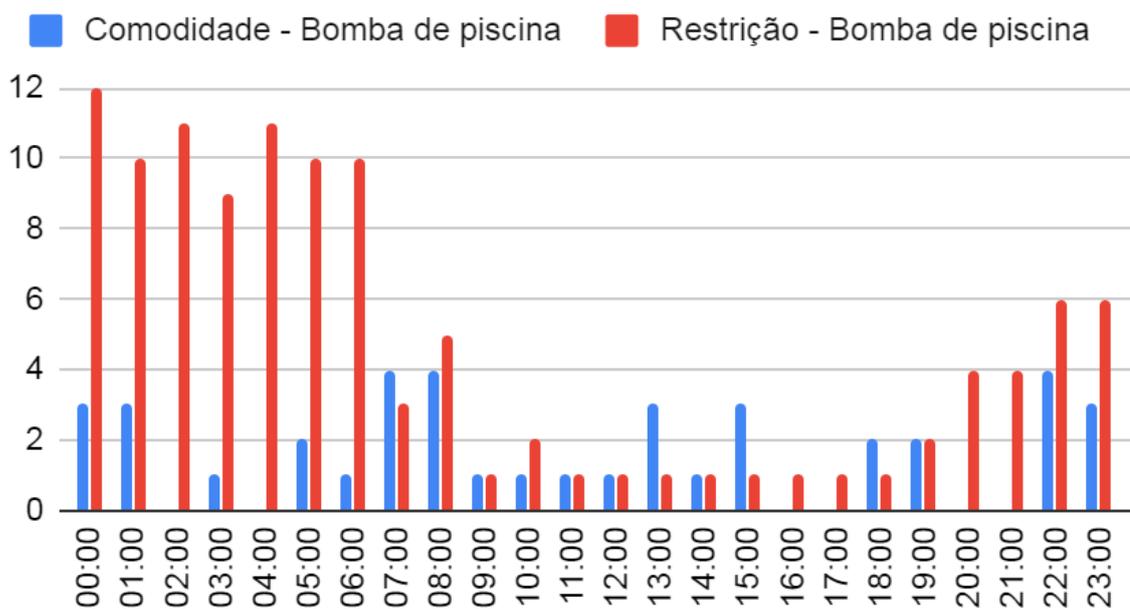
Secadora de roupa



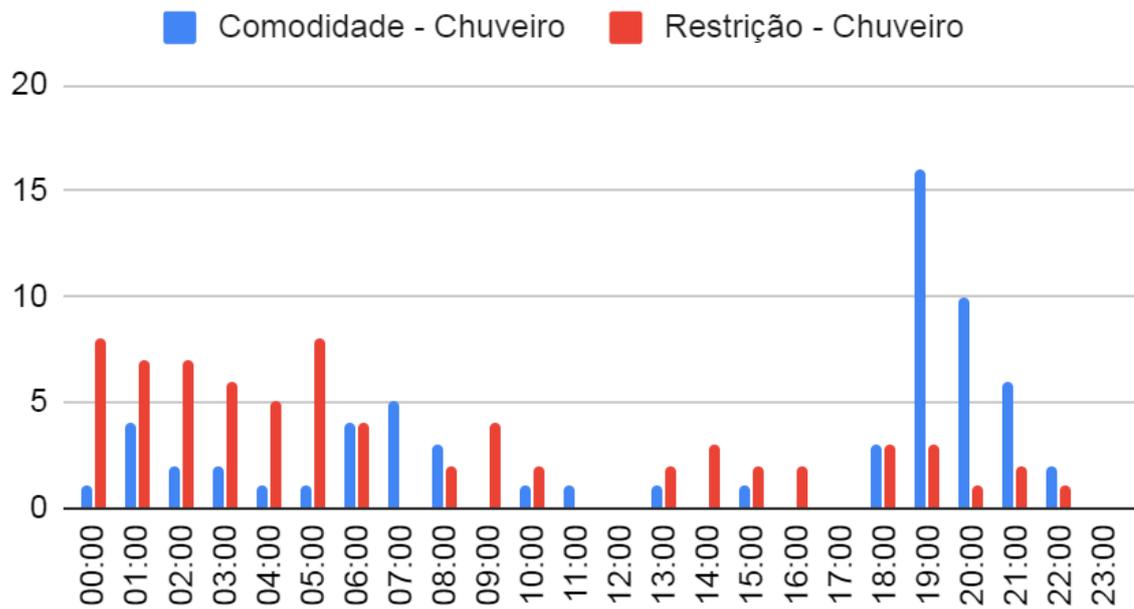
Ar condicionado



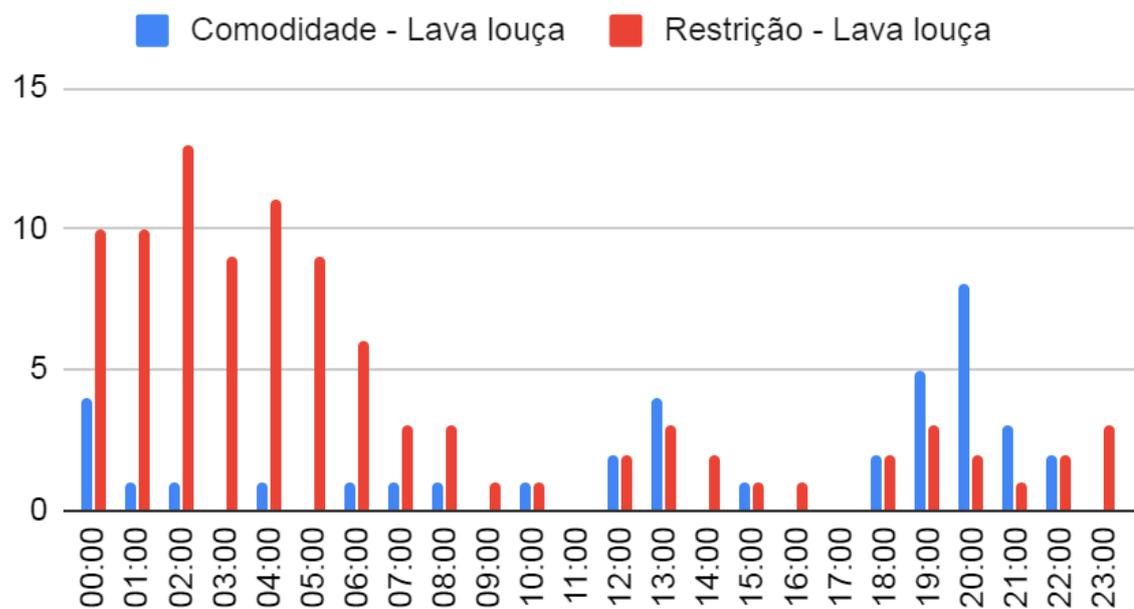
Bomba de piscina



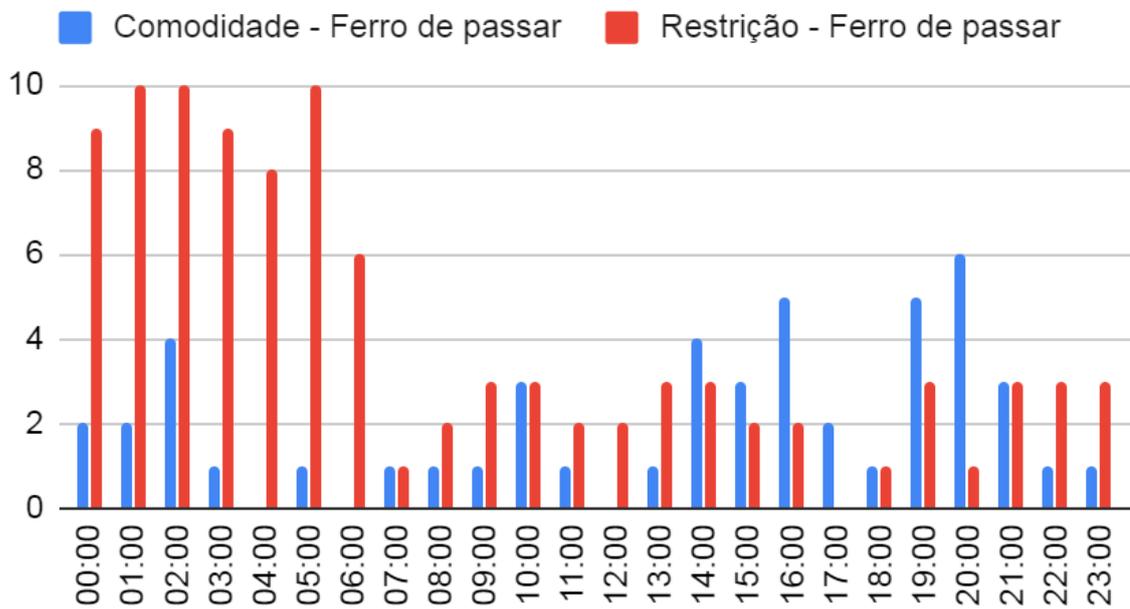
Chuveiro



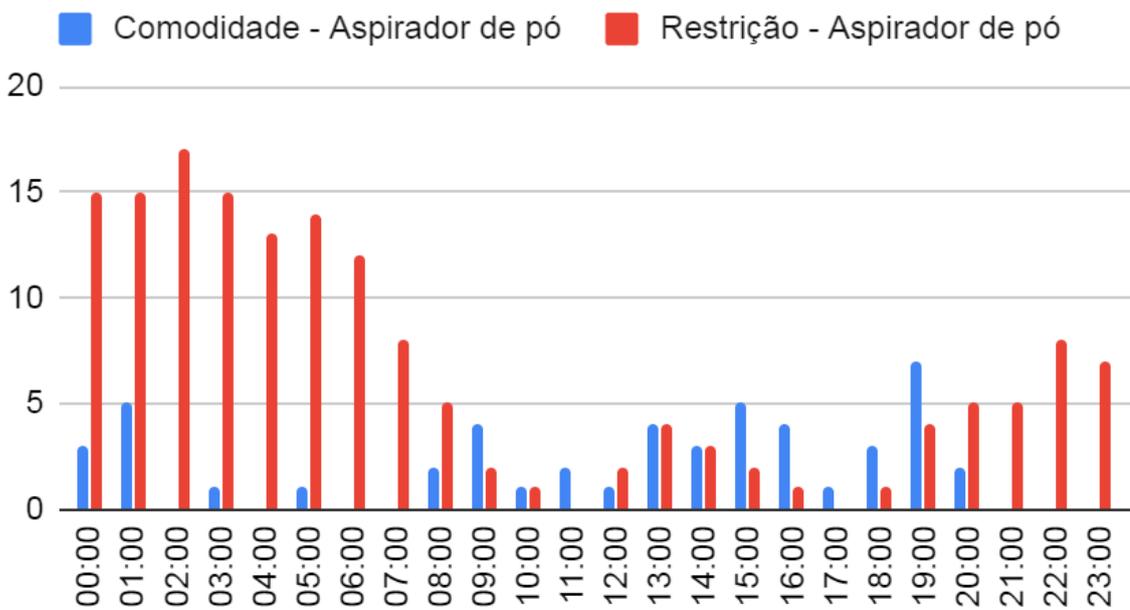
Lava louça



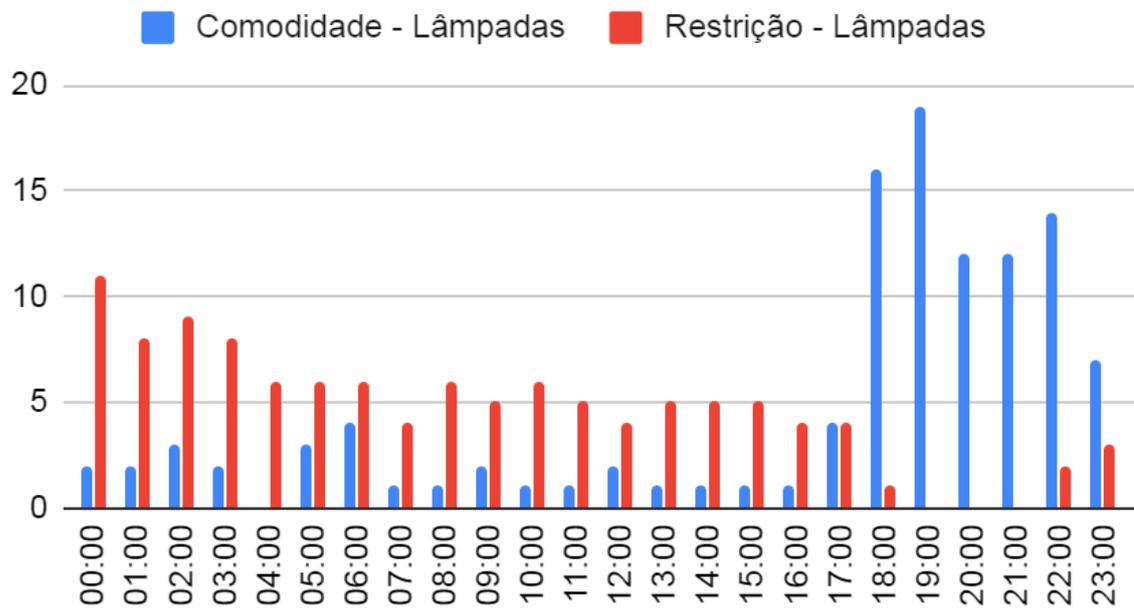
Ferro de passar



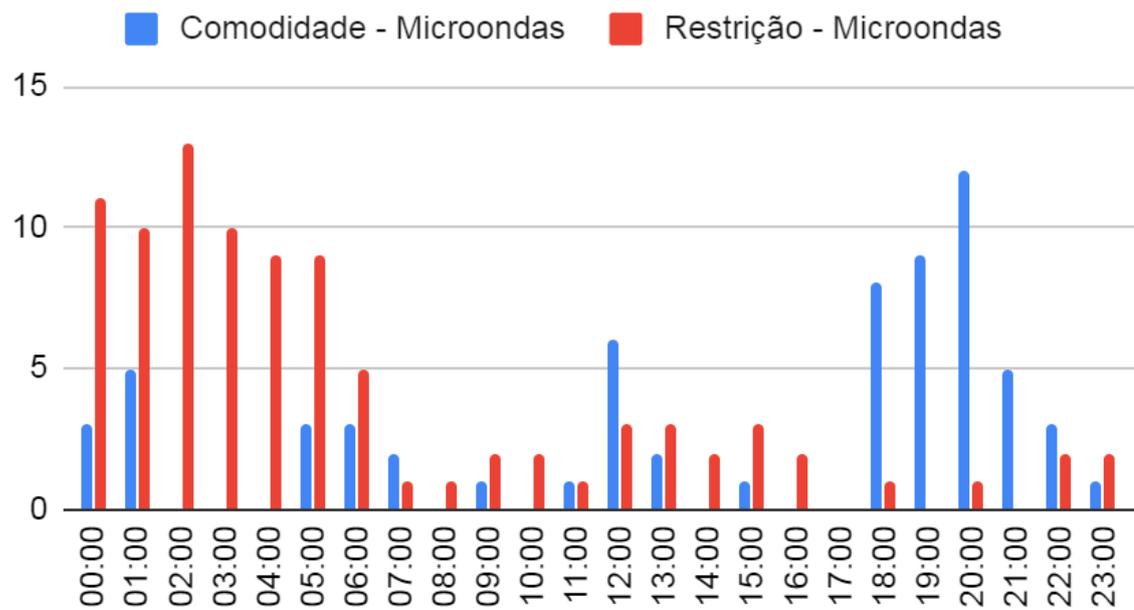
Aspirador de pó



Lâmpadas



Microondas



Como foi obtido apenas um único resultado para o perfil de trabalhador noturno, a Tabela 25 contém o resultado da pesquisa realizada por este perfil, sendo eles os horários de acionamento e o intervalo de restrição para cada equipamento.

Tabela 25 - Resultado da pesquisa para o perfil trabalhador(a) noturno

Equipamento	Comodidade [h]	Restrição [h]
Lavadora de roupa	17:00	09:00 - 12:00
Secadora de roupa	18:00	09:00 - 12:00
Ar condicionado	07:00	00:00 - 02:00
Bomba de piscina	12:00	07:00 - 09:00
Chuveiro	07:00	09:00 - 11:00
Lava louça	18:00	09:00 - 11:00
Ferro de passar	14:00	10:00 - 12:00
Aspirador de pó	14:00	10:00 - 12:00
Lâmpadas	16:00	10:00 - 12:00
Microondas	12:00	11:00 - 12:00

Fonte: Autoria própria.