

DEFLEGER-ECO: SISTEMA PARA GESTÃO PELO LADO DA DEMANDA EM RESIDÊNCIAS NO BRASIL

Tiago Bornia Castro, Márcio Zamboti Fortes, Natalia Castro Fernandes, Yona Lopes

RESUMO:

As redes inteligentes surgem como uma evolução do sistema de energia que incorpora redes de telecomunicações às redes elétricas. Como consequência, torna-se possível realizar o monitoramento em tempo real, detecção e recuperação de falhas rápidas e integração de fontes renováveis de forma mais fácil na rede elétrica. Os programas de gerenciamento do lado da demanda apresentam soluções para ajustar o consumo do usuário à geração. Este trabalho introduz um sistema de gestão pelo lado da demanda chamado Defleger-Eco projetado para usuários residenciais. O Defleger-Eco oferece uma gestão eficiente pelo lado da demanda, considerando os parâmetros de conforto definidos pelo usuário com o objetivo de reduzir a “conta de energia elétrica” ao usar uma tarifa variável. Na simulação foram utilizados quatro cenários diferentes, apresentando as vantagens do mecanismo para consumidores e distribuidoras de energia, considerando a proposta da tarifa branca como estudo de caso.

PALAVRAS-CHAVE: Gerenciamento pelo Lado da Demanda; Redes Inteligentes; Consumo de Energia; Tarifação.

INTRODUÇÃO

A implantação de smart grid no Brasil surge da necessidade de evolução da rede elétrica. Essa evolução é motivada, principalmente, pelo número de falhas e pelo tempo de recuperação das mesmas, ainda muito alto quando comparado às médias dos mesmos indicadores de outros países (SALES, 2014).

Com as smart grids, a comunicação entre a empresa de energia e as unidades consumidoras passa a ser bidirecional, o que se torna possível através da instalação de medidores inteligentes nas unidades consumidoras. Surge também a infraestrutura avançada de medição, sistema que conecta o operador de distribuição com o cliente. Desta forma, a concessionária tem informação em tempo

real do comportamento de consumo dos usuários e os usuários têm informação detalhada dos seus consumos. Assim, o consumidor passa a fazer parte do sistema, podendo aproveitar desta informação detalhada para economizar energia através de medidas mais direcionadas e eficazes, ou ajudando a empresa de energia a reduzir a demanda em horário de pico com a adesão, por exemplo, de programas de gerenciamento pelo lado da demanda (GLD), também nomeados Demand Side Management (DSM).

O GLD surge como uma proposta de equilibrar a geração e demanda pelo lado da demanda. A sua ideia é modelar o consumo do usuário para ajustar esse consumo à energia.

Tiago Bornia Castro, UFF ,tiago_bornia@hotmail.com;
Márcio Zamboti Fortes, UFF, mzf@vm.uff.br;
Natalia Castro Fernandes, UFF , natalia@midia.com.uff.br;
Yona Lopes, UFF ,yonalopes@id.uff.br

No Brasil, existe aplicação do GLD no setor industrial, porém sua aplicação no setor residencial começou a ser estudada devido a regulamentação da Tarifa Branca (ANEEL, 2016), tarifa dinâmica residencial que está sendo implantada no Brasil.

Cada unidade consumidora residencial causa um impacto muito pequeno na demanda total de energia da rede, porém, somadas, elas correspondem à 9,9% do consumo nacional, segundo o Balanço Energético Nacional de 2019 (EPE, 2019). Então, para que haja um impacto relevante, os programas devem alcançar um grande número de clientes. Por isso, é preciso desenvolver modelos flexíveis, que atendam diversos perfis de clientes de energia elétrica, e estudá-los nos diferentes modelos de tarifação, como em (MAGALHÃES e Outros, 2015).

Para a implantação do GLD residencial, é necessário que as unidades funcionem como smart homes, casas em que os aparelhos elétricos possuem interface de comunicação e estão ligados em uma rede local. Além disso, é necessário um sistema responsável por gerenciar os dispositivos e enviar mensagens de controle para alterar seus comportamentos. Esse sistema de gerenciamento energético deve ser baseado em um algoritmo que vise à eficiência energética, considerando os incentivos ao usuário para entrada no sistema. Isso inclui questões financeiras, conforto, simplicidade, entre outros. Assim, para que o GLD se torne uma realidade com ampla aceitação, é preciso desenvolver sistemas que tenham essas características.

Este trabalho apresenta um sistema chamado DEslocamento e FLExibilidade de cargas no Gerenciamento de Energia Residencial -ECONomia (Defleger-Eco), que é um sistema de controle automático baseado em técnicas de GLD para prover economia de consumo de energia em residências que estejam em locais que utilizam tarifas variáveis, tais como a Tarifa Branca. Esse sistema assume que os equipamentos da

casa podem ser gerenciados, seja pelo desligamento/religamento ou pela modificação de intensidade no uso do equipamento. O Defleger-Eco promove modificações automáticas do uso dos equipamentos buscando ajustá-lo as metas de economia do usuário sem causar grandes desconfortos na utilização diária dos equipamentos domésticos. O algoritmo proposto se baseia em parâmetros pré-definidos pelo usuário, priorizando as cargas que o usuário considera mais essenciais de forma a atingir um objetivo de economia na conta de energia.

O Defleger-Eco foi testado por meio de simulações em diferentes cenários considerando residências com alto e baixo consumo de energia.

Para realizar os testes em ambiente de simulação, existe outro desafio, pois a validação de mecanismos GLD depende tanto do comportamento da rede elétrica quanto do comportamento da rede de comunicação. Entretanto, não há um simulador que contemple a simulação das duas redes e que ofereça facilidade de modelagem de novos módulos. Assim, uma segunda contribuição desse trabalho foi o desenvolvimento de um simulador modular, baseado no EnergyPlus (E+) e Network Simulator 3 (NS-3), que permite a adição de novos módulos de GLD. Esse simulador considera tanto a variação do consumo de energia ao longo do tempo, quanto a comunicação do sistema de controle dos equipamentos domésticos e do medidor inteligente.

O restante do trabalho está organizado como descrito a seguir. Além desta parte introdutória, uma breve introdução sobre smart grid e GLD é apresentada, na sequência descreve-se o sistema proposto e os resultados. Por fim, finaliza-se este artigo com as conclusões do trabalho.

SMART GRID E O GLD

Com a modernização da rede elétrica, observa-se que o cliente passa a fazer parte do sistema e ter um papel mais ativo em seu funcionamento. A permuta dos medidores convencionais pelos medidores inteligentes ou smart meters permite não só a medição do consumo energético mensal, mas também a comunicação de dados e outros diversos serviços de acompanhamento de consumo ou monitoramento da conta de energia em tempo real (SIDDIQUI e Outros, 2012). Portanto, há uma melhor compreensão da demanda e um melhor controle do consumo de energia. Como o usuário passa a ter maior informação sobre seu consumo, ele pode identificar gastos desnecessários e toma

medidas direcionadas para economizar, por meio de modelos de GLD. Uma das mudanças atuais de grande interesse aos consumidores é a possibilidade de optar pelo uso de tarifa dinâmica de energia, podendo desfrutar de uma tarifa mais barata em determinados horários do dia. O modelo aplicado no Brasil, Tarifa Branca, comercializado no Brasil a partir de janeiro de 2018 conforme Resolução ANEEL 733/2016 (ANEEL, 2016) está descrito conforme Figura 1. Nesse modelo, as horas de maior consumo, chamadas de hora de ponta, sofrem uma tarifação superior. Outros modelos de tarifação dinâmica preveem até mesmo a variação do valor da energia em tempo real, de acordo com a geração de energia distribuída e o consumo na localidade.

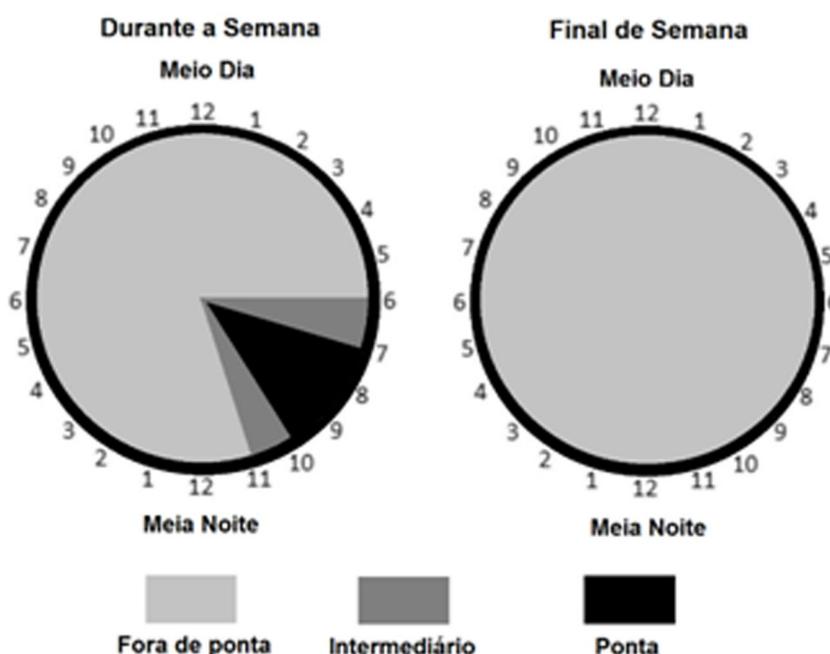


Figura 1 – Tarifa branca, adaptada de (DI SANTO e Outros, 2015).

Vislumbra-se que, em breve, todos os equipamentos elétricos, como os eletrodomésticos, serão inteligentes e também terão interface de comunicação, não somente para apresentar ao consumidor o consumo de energia do equipamento, mas também permitindo a programação de horários de

uso e funções operativas. Neste contexto, as redes domésticas de comunicação serão responsáveis pela comunicação entre os dispositivos elétricos inteligentes e os smartmeters (SIANO, 2014), tornando muitas estratégias de GLD factíveis e automáticas.

As casas do futuro propiciarão ao usuário funcionalidades tecnológicas que permitirão maior conforto e redução do consumo de energia. Já existem projetos e pesquisas e este novo “conceito” de residência está sendo chamado de smart home (casas inteligentes). Essas novas casas apresentam tecnologias de sensores e de redes para dar suporte à comunicação entre os seus aparelhos, que passam a ser gerenciáveis, e o smart meter, que periodicamente reporta ao usuário o consumo de energia, tanto da geração própria (quando na residência existir micro ou mini geração distribuída) quanto da energia fornecida pela concessionária de energia elétrica local, permitindo entre outras funcionalidades, que a smart grid envie informações como preços dinâmicos da tarifa de energia condicionados ao horário de uso (KOMNINOS e Outros, 2014).

A smart home é dividida em duas áreas: a área externa e a área interna. O limite da área interna é o sistema de gerenciamento de energia (Energy Management System - EMS), que se comunica com as cargas internas e faz o gerenciamento delas. Periodicamente, os dispositivos enviam informações de consumo para o EMS, que usa essas informações para alimentar seus algoritmos de funcionamento. O EMS é responsável também pelo controle de fontes de geração local e veículos elétricos que podem estar ligados à rede de comunicação doméstica. O mecanismo GLD é instalado no EMS.

O limite da área externa é feito por dois dispositivos: o smart meter e a Interface de Serviço de Energia (Energy Services Interface - ESI). Eles funcionam como gateways e fazem a troca de dados entre o domínio do consumidor e os domínios externos. O smart meter foi projetado para tratar apenas os dados agregados de medição (LEE e Outros, 2013). Já o ESI dá suporte ao controle remoto de serviços, aos programas de resposta à demanda, ao monitoramento de fontes de energia renováveis e ao monitora-

-mento de veículos elétricos. Apesar de desempenharem funções diferentes, o ESI e os smart meters podem ser fisicamente integrados em um mesmo dispositivo (LEE e Outros, 2013).

Para implantação de um sistema GLD em uma residência típica é necessário que ela se torne uma smart home. Seus dispositivos elétricos devem possuir interface de comunicação para se comunicarem com um dispositivo gerenciador. Em uma fase intermediária da implantação, pode-se utilizar tomadas inteligentes em alguns dispositivos elétricos da casa. As tomadas inteligentes são adaptadores que se comunicam via wifi, conseguem reportar a energia consumida pela tomada e executar o comando de ligar/desligar a energia da tomada. Entretanto nem todos os dispositivos elétricos podem ser substituídos por tomadas inteligentes, por isso é importante que os aparelhos domésticos sejam realmente dispositivos inteligentes. Por exemplo o caso do chuveiro elétrico, espera-se que o gerenciador da casa consiga enviar comandos para alterar a temperatura do banho, e isso só é possível se o chuveiro for um chuveiro inteligente. Outra mudança importante na residência padrão é a troca do medidor por um smart meter, possibilitando a tarifa dinâmica e a comunicação do medidor inteligente com o gerenciador da casa.

Com a smart grid, a possibilidade de inserção de fontes de energia renováveis na instalação do cliente final aumentou, o que permite ao consumidor final possuir uma pequena unidade de geração distribuída conectada à rede e assim auferir créditos de energia com a geração excedente e debitar este crédito de seu consumo mensal em prazos definidos em legislação.

Fontes de energia renováveis dependem de fatores ambientais que tornam a previsão de geração de energia mais complexa e menos precisa. Portanto, existe uma mudança de paradigma com a modernização da rede elétrica: na rede tradicional, a produção

adapta-se à demanda, mas nas smart grids, a demanda adapta-se à produção e faz com que o consumo do usuário seja mais eficiente (LOPES e Outros, 2017). Os programas para GLD (Gerenciamento pelo Lado da Demanda) surgem como uma das soluções para ajustar o consumo do usuário à geração e ao mesmo tempo como oportunidade de efficientização energética do consumo ou até mesmo a conservação de energia. Na operação do sistema, o GLD pode aliviar as restrições de rede ou evitar interrupções em caso de contingências (AFFONSO e Outros, 2016). Além disso, ele pode contribuir para reduzir as perdas de linhas (SHAW e Outros, 2009). De fato, programas de GLD podem até oferecer serviços auxiliares para os operadores do sistema elétrico, tais como o suporte de tensão, o equilíbrio de potência ativa/reactiva, a regulação da frequência e a correção do fator de potência (CROSSLEY, 2008). Ele também possibilita uma maior penetração de fontes renováveis, estimulando a expansão da geração distribuída (CONCHADO e LINARES, 2012).

DEFLEGER-ECO

Dentro do cenário de smart grid no Brasil e com a regulamentação da tarifa branca, as pesquisas relacionadas a programas GLD ganham destaque. É importante o estudo de projetos que contemplem a realidade brasileira, levando em consideração as variações climáticas, perfil de consumo dos usuários e leis tarifárias, possibilitando criar mecanismos que atendam às necessidades específicas dos usuários deste cenário.

Existem muitos tipos de programas GLD e muitas soluções já foram propostas nessa área, entretanto grande parte dessas soluções trabalha somente com deslocamento de cargas do horário de pico ou somente com o ajuste da temperatura ambiente, condicionado à variação de preço. Este trabalho propõe um sistema a ser aplicado a residências que combina o deslocamento de carga e a variação de potência (ou ajuste de termostato) de forma automática, respeitando parâmetros de conforto do usuário. Esse sistema é denominado de DESlocamento e FLEXibilidade de cargas no Gerenciamento de Energia Residencial - ECONomia (s). Os módulos do sistema proposto são apresentados na Figura 2.

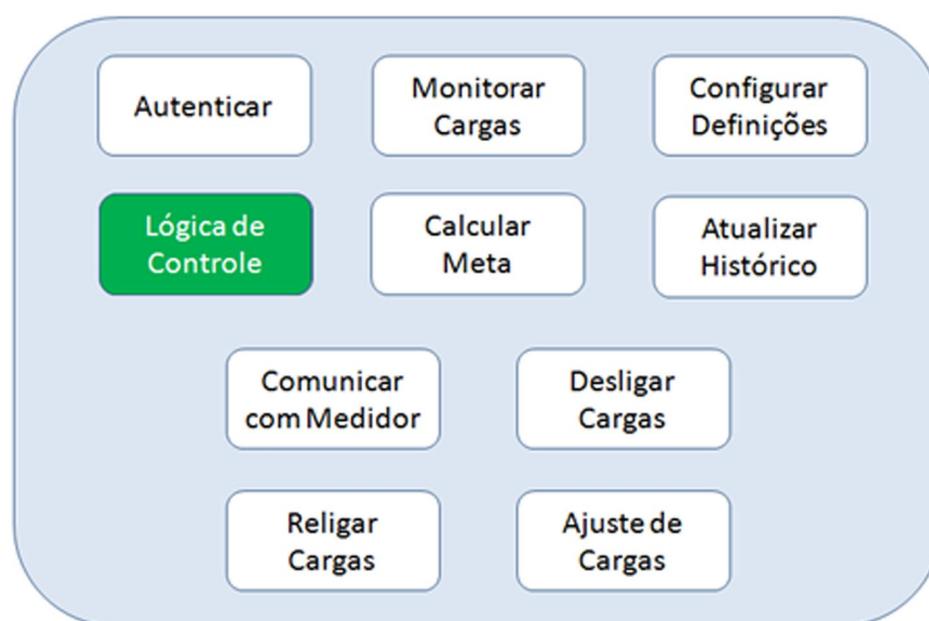


Figura 2 – Módulos do Defleger-Eco.

O primeiro módulo diz respeito à autenticação do sistema, permitindo ao usuário acessar medidas e modificar os parâmetros do sistema. O módulo 'Monitorar Cargas' acompanha o gasto de cada equipamento inteligente conectado ao sistema. Nesse ponto, cabe observar que equipamentos tradicionais podem ser incorporados no sistema pelo uso de tomadas inteligentes. O módulo 'Configurar Definições' permite ao usuário verificar e modificar os parâmetros do sistema, tais como o seu nível de conforto e o seu grau de economia. Na sequência, têm-se três módulos relacionados ao sistema de controle, os quais são:

- **Lógica de Controle** – apresenta o algoritmo de controle, que interage com o módulo 'Calcular Meta' e 'Atualizar Histórico' para definir quais equipamentos devem ter sua a potência de uso alterada, quais devem ser ligados e quais devem ser desligados;

- **Calcular Meta** – Esse módulo define qual deve ser a meta de consumo a cada momento de forma a atender o objetivo mensal de economia estabelecido pelo usuário. Essa meta é usada pela lógica de controle para definir quais ajustes devem ser feitos nos equipamentos da casa;

- **Atualizar Histórico** – Esse módulo armazena informações de consumo na residência por meio de uma média exponencial móvel com parâmetro α . Esses dados são usados para fazer uma estimativa do consumo nos próximos momentos de tempo, dado utilizado pelo módulo 'Lógica de Controle'. O parâmetro α varia no intervalo entre 0 e 1, ponderando o peso entre a última medida e o valor histórico armazenado na previsão de qual será o próximo consumo do usuário.

Os quatro módulos finais ('Comunicar com Medidor', 'Desligar Cargas', 'Religar Cargas' e 'Ajuste de Cargas') dizem respeito à comunicação com os ativos do sistema, sejam eles equipamentos domésticos ou o próprio medidor.

O mecanismo proposto se trata de um modelo de economia de energia em horário de pico usando tarifação dinâmica. A ideia é utilizar um programa flexível, que possa se adaptar a diferentes perfis de clientes, para auxiliar na economia de energia no horário de ponta. Conforme os parâmetros inseridos no programa, o usuário pode escolher se prefere economizar variando somente a potência de alguns aparelhos, como ar-condicionado e luzes, se prefere apenas reagendar alguns aparelhos ou até se prefere utilizar os dois métodos, podendo ele escolher o grau de influência de cada método.

Os aparelhos considerados neste trabalho são aparelhos inteligentes, que possuem interface de comunicação, permitindo que o comportamento destes equipamentos possa ser alterado remotamente. São dispositivos que estão em desenvolvimento ou com desenvolvimento vislumbrado em um futuro próximo. Por exemplo, o chuveiro e o sistema de iluminação são inteligentes, ou seja, eles possuem vários níveis de potência de operação e esses níveis podem ser ajustados de forma remota. Se for necessário economizar, o gerenciador da casa pode enviar comandos para diminuir o nível de potência utilizado. O funcionamento dos mecanismos propostos é baseado na divisão destes aparelhos por grupos, onde cada grupo terá um tratamento diferente durante a etapa em que a meta dos programas é atingida.

Os dispositivos são divididos em quatro grupos:

- **Reguláveis** - qualquer dispositivo que possua potência ajustável. Por exemplo, ar-condicionado, lâmpadas inteligentes e chuveiros inteligentes;

- **Flexíveis** - qualquer dispositivo que o usuário classificar como deslocável, ou seja, que possa ter o horário de funcionamento reagendado. Por exemplo, máquina de lavar roupas ou secadora de roupas;

- **Inflexíveis dispensáveis (Dispensáveis)** - dispositivos que não possuem

potência ajustável, nem são classificados como deslocáveis, mas que a interrupção de funcionamento não afeta muito o usuário. Por exemplo, filtro de água;

• **Inflexíveis indispensáveis (Indispensáveis)** - dispositivos não agendáveis, sem potência ajustável, porém que a interrupção causa grande impacto no conforto do usuário. Por exemplo, televisão e computador.

Este programa tem como objetivo auxiliar os usuários na economia de energia em horário de pico, assumindo o uso de tarifas variáveis, tal como a Tarifa Branca. Através de deslocamento de cargas e da redução de potência de alguns dispositivos, ele busca atingir a um percentual de economia preestabelecido pelo cliente para o horário de ponta e intermediário. Como o objetivo deste mecanismo é tentar influenciar o padrão de consumo, os parâmetros de conforto do cliente, que podem ser configurados no sistema, são respeitados. Em intervalos fixos de tempo, o algoritmo verifica se a meta de economia está sendo atingida. Caso não esteja, alguma ação é tomada. Caso todas as ações que podem ser tomadas não sejam suficientes, o usuário é sinalizado que a economia máxima, respeitando o conforto dele, já foi feita e que ele deve tomar alguma ação extra se quiser se manter dentro da meta.

Assim, o algoritmo proposto assume que o usuário pode determinar parâmetros de conforto, através da definição do ponto de conforto nos aparelhos reguláveis. Para aparelhos de ar-condicionado é configurada temperatura máxima permitida. Aos aparelhos com potência variável é configurada a variação máxima permitida. Para isso, utiliza-se o parâmetro Intensidade, que pode ser definido com diferentes valores para cada um dos dispositivos com potência ajustável. O usuário configura a Intensidade para cada um destes dispositivos, escolhendo um número de 1 a 5. Ao escolher 1, o mecanismo entende que não deve variar potência do

equipamento. Se escolher 5, entende-se que o mecanismo tem liberdade para variar a potência o máximo possível. Para valores intermediários, a potência oscila entre o mínimo e o máximo de variação. Ou seja, com este parâmetro, o usuário estabelece o ponto de conforto para cada dispositivo ajustável.

Além do nível do conforto, o usuário deve definir um percentual de economia, o qual representa o quanto o usuário gostaria de economizar durante o horário de ponta. O sistema estima quanto o usuário gastaria sem a aplicação do GLD e promove ações para reduzir os gastos, respeitando os limites de conforto impostos pelo usuário. Assim, são promovidos deslocamentos de carga e variações de Intensidade, considerando a variação do valor da tarifação.

As etapas do funcionamento do mecanismo de economia são ilustradas na Figura 3 e os equacionamentos utilizados no algoritmo podem ser encontrados em (CASTRO, 2016).

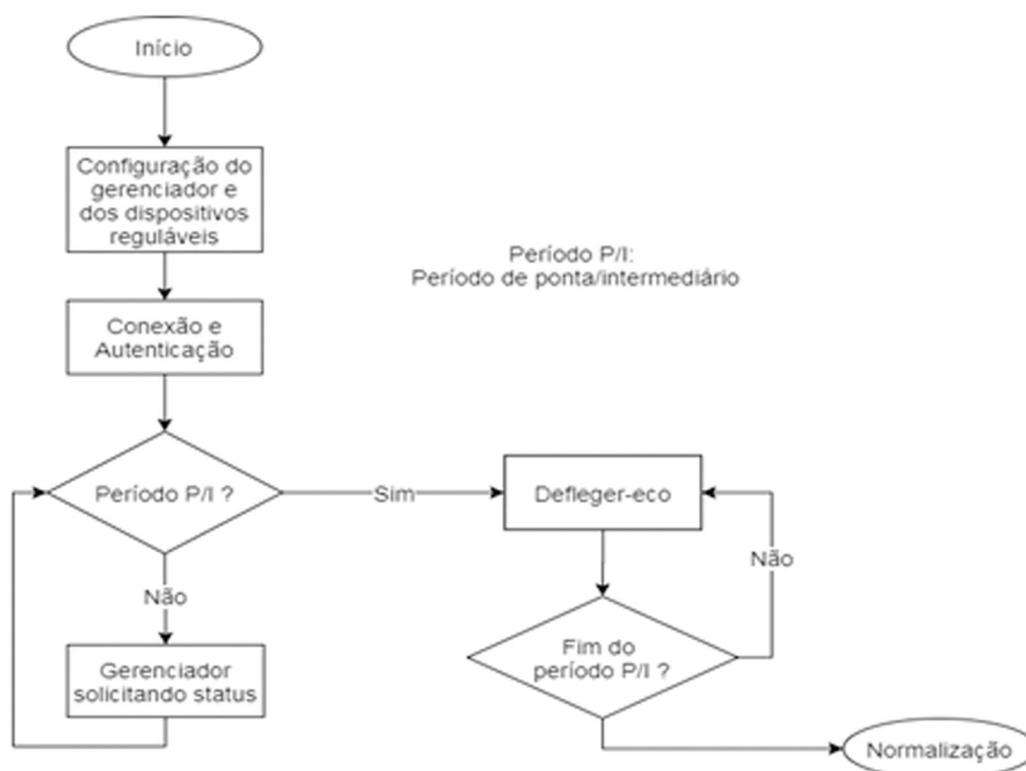


Figura 3 – Etapas do programa de Defleger-Eco.

O funcionamento da lógica de controle do Defleger-Eco é descrito no Algoritmo 1. A Figura 4 mostra o fluxograma correspondente. O sistema proposto funciona em fases. Inicialmente, observa-se se o consumo está dentro ou fora da meta. Caso esteja fora, o algoritmo inicia uma leve alteração da Inten-

-sidade dos equipamentos. Essa redução é continuada até que se alcance a meta ou até que todos os equipamentos ajustáveis tenham chegado ao limite tolerável de ajustes. Na sequência, passa-se a fase de deslocamento de cargas, a qual pode trazer um pouco mais de desconforto ao usuário.

Algoritmo 1: Mecanismo Economia

input : *Meta, Período, Demanda_total, Demanda_Flexível*

```

1 while Período = ponta/intermediario do
2   if Demanda_total > Meta then
3     if Status_Regulavel ≠ minimo then
4       Dispositivos reguláveis reduzem 1 grau intensidade ;
5       Numero_de_reduzidos incrementa 1 para cada redução ;
6       if Numero_de_reduzidos = 0 then
7         | Status_Regulavel = minimo ;
8       end
9     else if Demanda_Flexível > 0 then
10      | Desligar dispositivos flexíveis até alcançar Meta ou desligar todos;
11    else
12      | Sinalizar usuário que Meta não foi alcançada;
13    end
14  end
15  if Demanda_total < Meta then
16    if Numero_de_reduzidos > 0 then
17      | Aumentar intensidade de um aparelho reduzido ou religar aparelho ;
18    end
19  end
20 end
  
```

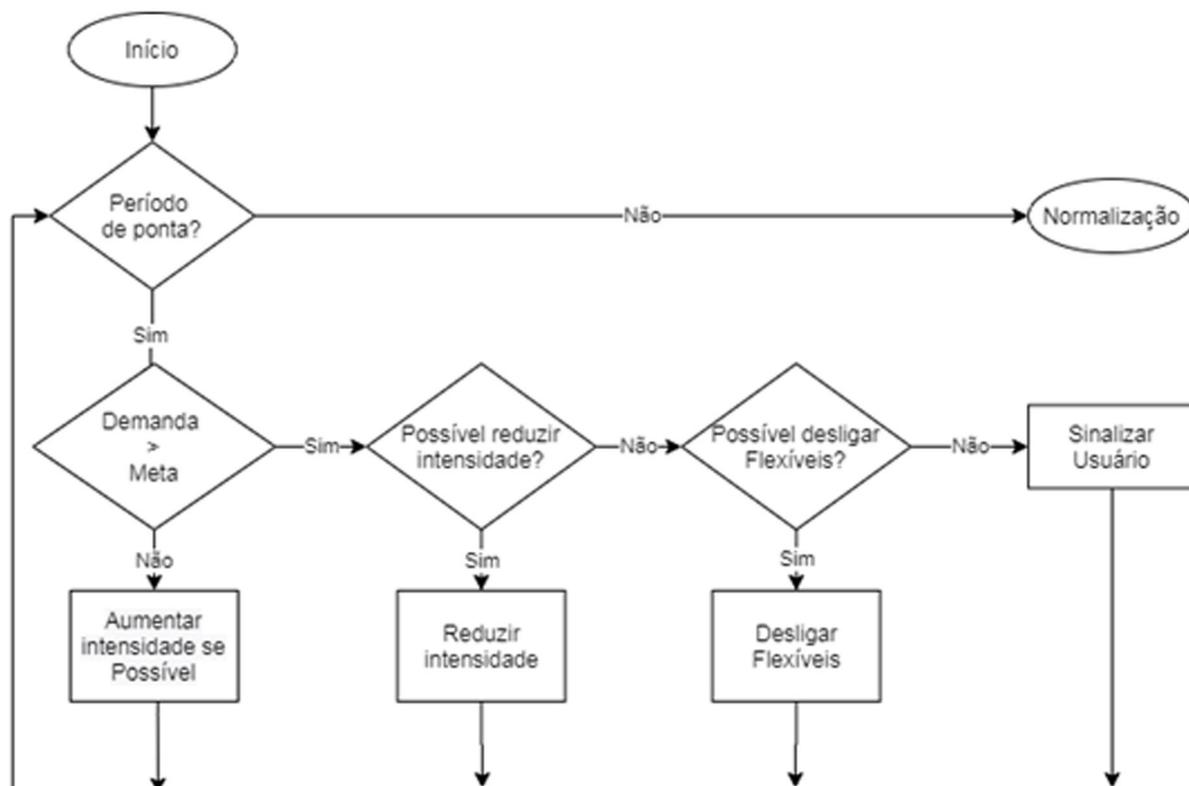


Figura 4 – Fluxograma do algoritmo de controle do Defleger-Eco.

Uma vez atingida à meta, caso o consumo esteja abaixo do desejado devido às restrições impostas pelo Defleger-Eco, se inicia a fase de reajuste do sistema, religando cargas deslocadas ou mudando ajustes de Intensidade, desde que essas ações não levem a uma previsão de extrapolação da meta ou a instabilidades. Normalmente, o algoritmo reduz potência dos dispositivos ajustáveis se a demanda estiver acima da meta ou aumenta a potência se demanda estiver abaixo da meta. Entretanto, pode acontecer o caso em que a potência de um dispositivo fica oscilando entre aumentar e reduzir. Então foi criado um mecanismo anti-oscilação, quando o algoritmo vai aumentar a potência, ele verifica se já houve alguma diminuição em algum dispositivo desde o último aumento. Se tiver ocorrido, não há mais aumento de potência em nenhuma carga.

É importante notar que todo o controle é feito continuamente, com pequenos intervalos de tempo entre cada rodada, pois o consumo do usuário é variável e os ajustes

precisam ser realizados de acordo com a ativação ou desativação das cargas pelo usuário. Além disso, alguns ajustes de Intensidade demandam algum tempo para surtir efeito, como a temperatura do ar-condicionado, de forma que não seria eficiente executar ininterruptamente as rodadas.

ANÁLISE DO DEFLEGER-ECO

Para mostrar a efetividade do sistema proposto, foi feita uma avaliação por simulação do seu funcionamento em diferentes cenários e considerando diferentes configurações dos parâmetros pelo usuário. Além disso, o Defleger-Eco foi comparado à outra proposta da literatura, com o fim de verificar sua eficiência. Esta comparação foi feita utilizando a Tarifa Branca.

Para realizar as simulações, foi necessário desenvolver uma ferramenta que permitisse avaliar tanto o consumo de energia quanto a comunicação do sistema.

Ferramenta de Simulação

A validação dos mecanismos propostos e análise de desempenho são feitas por meio de simulação. Como o mecanismo proposto trata-se de um sistema de controle para sistemas elétricos domésticos, é necessário que seja possível implementar a lógica de controle, a resposta na rede elétrica e a troca de mensagens para monitoração e ativação dos comandos. Assim, deve-se simular não só a rede elétrica, mas também a rede de comunicação, além da lógica de controle proposta. A proposta de (LI e ZHANG, 2014) foi validada através do desenvolvimento da integração do eQuest (EQUEST, 2020), para simular a parte elétrica, e do MatLab para realizar as ações de resposta à demanda. Inspirado nesta integração, este trabalho apresenta uma ferramenta de simulação que utili-

za o NS-3 (NS-3, 2020) para simular a parte de telecomunicação e o EnergyPlus (E+) (ENERGYPLUS, 2020) para a parte elétrica. Toda a lógica de controle é implementada sobre o NS-3, que dá abertura para o desenvolvimento de novos códigos integrados ao seu núcleo. Contudo, é necessário integrar o NS-3 com o E+. O E+ é um simulador que recebe um arquivo de configuração como entrada e retorna um arquivo de saída com o resultado da simulação. Então, no NS-3, foram criadas aplicações que, cada vez que é necessário, acionam o funcionamento no E+ por intermédio de scripts em Python. A saída no E+ é recebida pelos scripts em Python, os quais tratam os dados e transformam em informações úteis à simulação do NS-3.

A Figura 5 apresenta este esquema de integração.

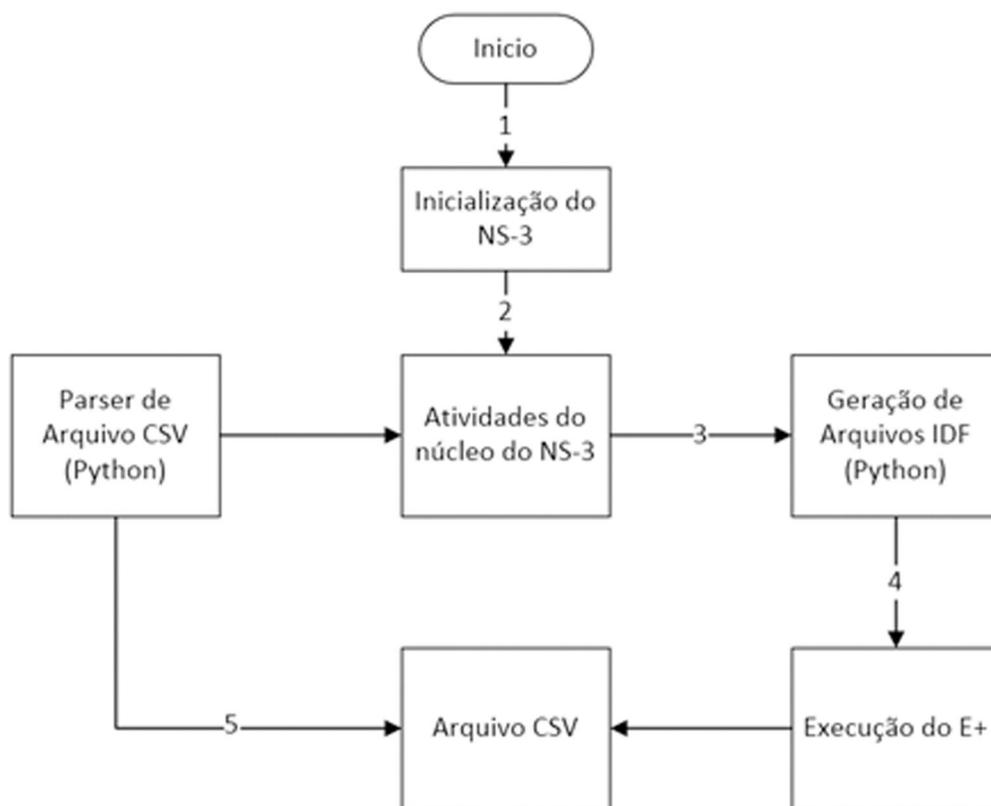


Figura 5 – Proposta de integração do NS-3 com o E+.

Cenário de Simulação

Para a validação do Defleger-Eco foram criados cenários de simulação utilizando adaptações dos perfis de casas do projeto Casa Eficiente do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (LAMBERTSe Outros2010), hábitos de uso do relatório Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso da Procel (ELETROBRAS, 2007) e arquivo climático do E+ para a cidade de Niterói (INMET, 2012). Na literatura, existem outras ferramentas que podem ser utilizadas para analisar o perfil de consumo residencial como sistemas Fuzzy apresentados em (PAIM NETO e BIANCHINI, 2015).

Uma vez que se deseja simular residências com consumo semelhante aos padrões brasileiros, os quatro modelos apresentados em (LAMBERTSe Outros, 2010) foram adaptados para uso nesse estudo. Assim, primeiramente, estes perfis foram adaptados para equipamentos atuais com base no Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE). Alguns dispositivos elétricos possuem uma curva de potência que varia ao longo do dia, entretanto, devido a limitações dos programas de simulação, foi utilizada a potência média de funcionamento de cada equipamento conforme fornecido pelo PBE. Por exemplo para o cálculo da geladeira, seu consumo mensal é de 36,72 kWh, divide-se este valor por 720 (número de horas do mês, 24 horas x 30 dias), logo o valor médio de potência é 51 W. O horário de uso dos equipamentos foi baseado na Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso do Procel (ELETROBRAS, 2007). Na Tabela 1, são apresentados os dados adaptados considerados para cada perfil de família. O primeiro perfil considera uma família que tem equipamentos eficientes e tem um baixo consumo energético. Já o segundo perfil considera o mesmo padrão de consumo, mas usando equipamentos ineficientes. O terceiro e o quarto perfil conside

-ram famílias que tem um consumo pouco econômico, com equipamentos eficientes e ineficientes, respectivamente. Para os perfis 1 e 2, os aparelhos de ar-condicionado são considerados trabalhando entre 24 e 26°. Para os perfis 3 e 4, os aparelhos de ar-condicionado são considerados trabalhando entre 22 e 24° C. É importante ressaltar que o consumo dos aparelhos de ar-condicionado foram dimensionados pelos EnergyPlus e os aparelhos utilizados na tabela são apenas ilustrativos, para trazer uma noção do consumo esperado para cada perfil. A Figura 6 apresenta o consumo mensal de cada perfil.

Equipamento	Média diária de uso (Wh) por perfil - (horas*Watts)			
	1	2	3	4
Geladeira	24*51	24*73	24*51	24*73
Máquina de Lavar Roupas	1*270	1*350	1*270	1*350
Forno micro-ondas	0,1*800	0,1*800	0,25*800	0,25*800
Filtro de água	24*6	24*6	24*6	24*6
Aspirador de pó	2*876	2*876	2*876	2*876
Ferro elétrico automático	1*156	1*156	1*156	1*156
Computador	2*120	2*120	5*120	5*120
Televisão	2*100	2*100	5*100	5*100
Iluminação Quarto de Solteiro	1*20	1*100	4*20	4*100
Iluminação Quarto de Casal	1*20	1*100	4*20	4*100
Iluminação sala estar	2*80	2*400	4*80	4*400
Iluminação sala jantar	1*80	1*400	4*80	4*400
Iluminação banheiro	1*40	1*200	3*40	3*200
Iluminação cozinha	1*40	1*200	3*40	3*200
Iluminação área serviço	1*40	1*200	3*40	3*200
Iluminação externa	0,5*280	0,5*1400	2*280	2*1400
Arcondicionado	9*618	9*618	9*1149	9*1149
Chuveiro elétrico (potência máxima)	0,67*3700	0,67*5500	2*3700	2*5500
Consumo diário (kWh)	12,94	16,16	23,26	34,31

Tabela 1 – Consumo dos Equipamentos para cada perfil de uso familiar considerado, Adaptado de (LAMBERTSe Outros, 2010).

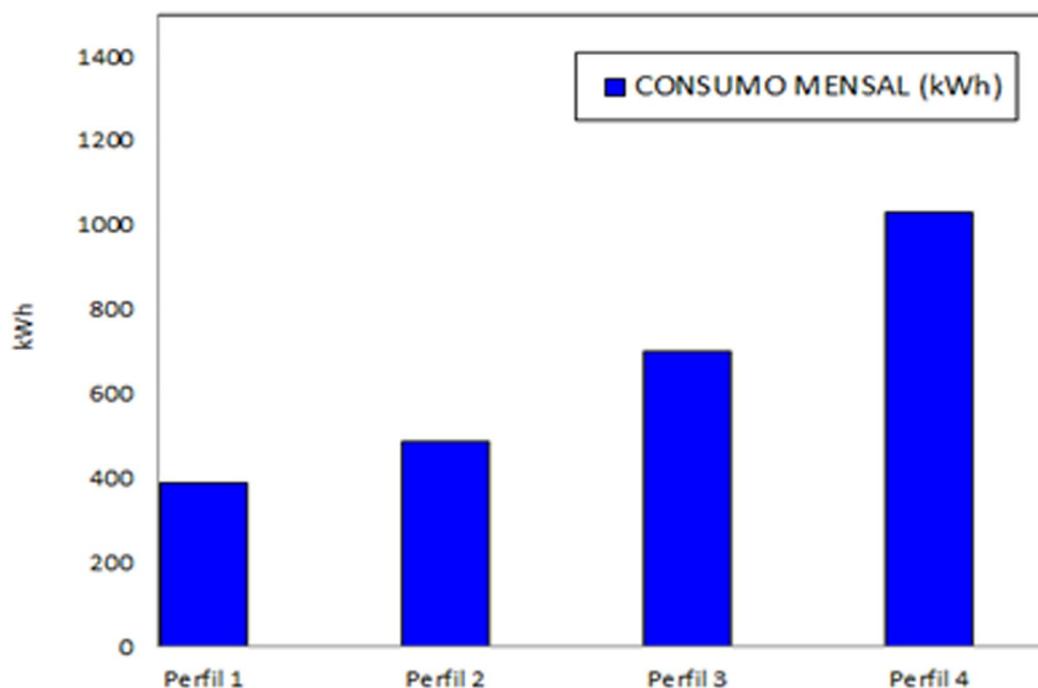


Figura 6 – Consumo mensal de cada perfil em kWh.

No E+, a simulação modela uma casa com três zonas térmicas: quarto de casal de 20 m², quarto de solteiro de 12 m² e o restante da casa com 45 m², como mostrado na Figura 7. As dimensões usadas para a casa no E+ são uma adaptação da casa simulada em (LAMBERTSe Outros, 20102). Os quartos foram projetados apenas para dimensionar o uso de energia dos aparelhos de

ar-condicionado. Os dispositivos elétricos são atribuídos à zona térmica que representa o restante da casa. O arquivo de clima escolhido foi o da cidade de Niterói, disponibilizado no site do labEEE (INMET, 2012). A escolha do material utilizado na simulação e demais detalhes foram baseados em (WESTPHAL e LAMBERTS, 2006).

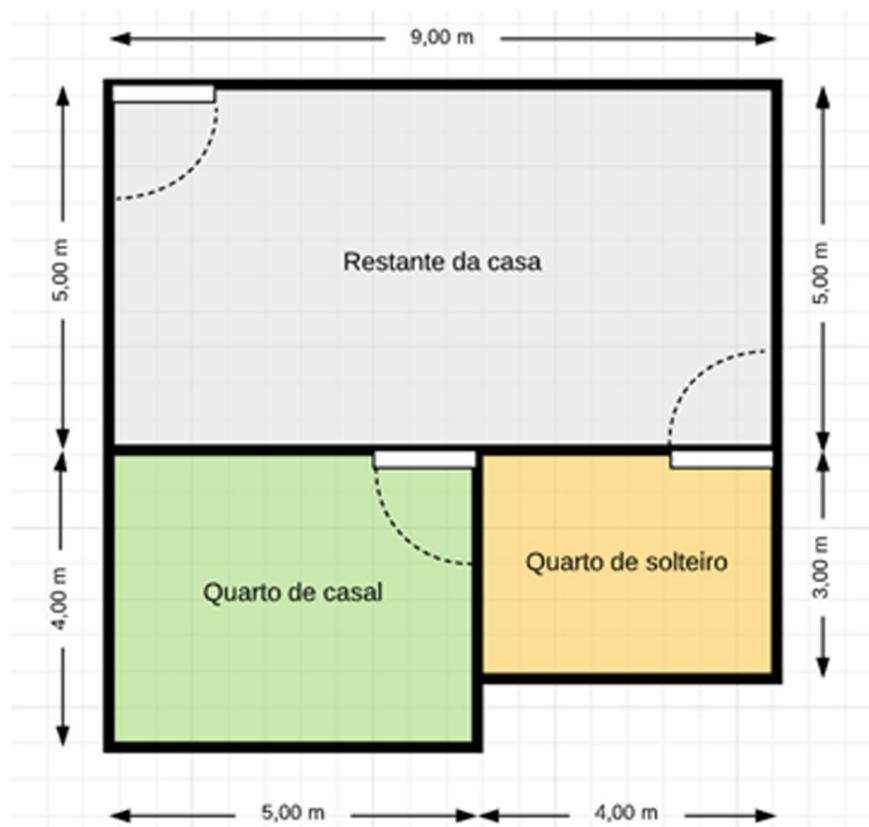


Figura 7 – Planta da Casa no E+.

Foram executados 20 testes para cada análise. O intuito foi modelar 20 dias diferentes para avaliar um cenário de simulação. Desta maneira, altera-se o horário de funcionamento de cada dispositivo elétrico e as condições climáticas da simulação.

O principal objetivo do Defleger-Eco é ajustar a demanda da casa buscando alcançar o percentual de economia de consumo, configurado pelo usuário, durante horário de ponta e intermediário. Para fazer a análise do mecanismo, foram considerados os 20 testes e

as suas médias e, com base nesses dados, é calculada a economia de consumo durante todo o dia e durante o horário de pico.

Validação do Simulador

O simulador desenvolvido foi utilizado na realização dos testes com os sistemas de GLD analisados. Para tanto, o primeiro passo é a validação do simulador. Para isso, foram realizados testes simulando o consumo de alguns dispositivos elétricos com

funcionamento bem conhecidos e observou-se o funcionamento adequado do simulador para esses dispositivos, assim como uma troca de mensagens conforme o esperado.

Ajuste do preditor de consumo do Defleger-Eco

Para calibração do mecanismo de previsão de demanda usado no Defleger-Eco, o qual utiliza uma média exponencial móvel, conforme explicado na Seção Defleger-Eco, é necessário estabelecer um parâmetro chamado α . O α é usado na atualização da previsão da demanda para determinado horário. A demanda prevista para aquele horário é usada no cálculo de meta do Defleger-Eco. O α define o peso que a média atual de demanda terá na atualização da previsão. Quanto menor o α , maior o peso que o histórico tem na atualização e menor o peso da demanda atual.

Os testes realizados visam avaliar o estimador de demanda. Para isso, foi calculado o erro médio quadrático entre a previsão e a demanda de consumo de energia, como mostrado na Equação 1. É importante lembrar que a atualização da previsão de demanda considera a demanda que o usuário utilizaria se não houvesse nenhum programa

de GLD. Por isso, a simulação destes testes foi executada em modo normal (sem programa de GLD). O Perfil 4 foi escolhido para esta análise por ser o perfil com maior consumo, que, conseqüentemente, apresenta desvios maiores quando há um erro de predição.

$$\text{Erro quad} = \frac{\sqrt{(\text{Previsao} - \text{Demanda})^2}}{\text{Demanda}}$$

Observa-se que, para esses cenários, o melhor é usar $\alpha > 0.5$, como mostrado na Figura 8. Na análise do intervalo entre $\alpha = 0,5$ e $\alpha = 1$, conclui-se que o erro não apresenta um padrão, ou seja, o erro é aleatório, então foi decidido que será usado $\alpha = 1$ e o histórico será desconsiderado no cálculo da previsão de demanda. Com $\alpha = 1$, a previsão de consumo para cada horário do dia seguinte é igual ao consumo horário do dia atual. Isto ocorre, pois, o horário de uso dos dispositivos em uma casa é aleatório, não havendo um rigor no horário de funcionamento de cada eletrodoméstico. Em uma fábrica, por exemplo, o resultado poderia ser diferente, pois há horário certo para a operação de cada equipamento. Desta maneira, a curva de demanda é mais estável e o histórico passa a ter um peso maior na previsão de demanda.

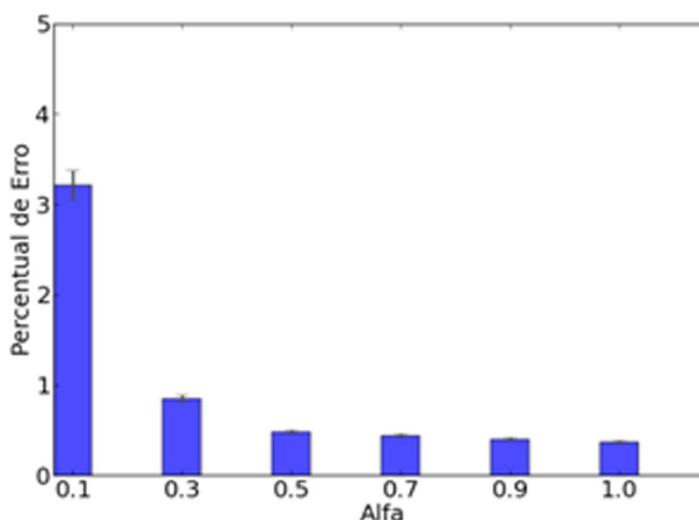


Figura 8 – Erro médio quadrático de previsão de demanda na análise de α .

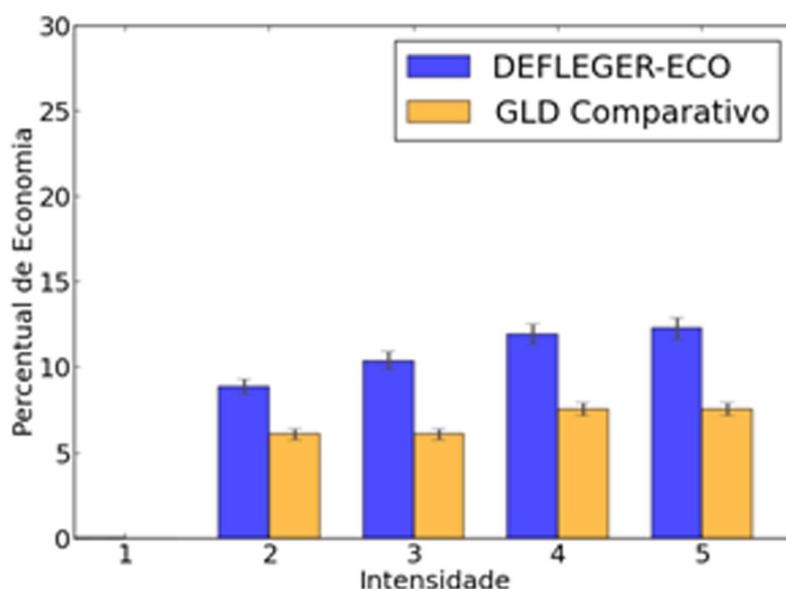
Avaliação do impacto do parâmetro Intensidade

O segundo parâmetro avaliado é a Intensidade. Para esse teste, também optou-se por usar o Perfil 4, por apresentar a melhor oportunidade de economia de energia. O percentual de economia configurado pelo usuário foi 5%, pois é um percentual que é facilmente atingido e, nesta análise, o objetivo é apenas avaliar o impacto da variação de

Intensidade. Assim, a Intensidade é variada de 1 a 5.

A Figura 9 mostra o percentual de economia do consumo durante todo o dia e durante horário de pico. Nessa análise, o Defleger-Eco foi comparado à proposta de (LI e ZHANG, 2014), que também propõe um mecanismo de GLD baseado no controle da Intensidade dos dispositivos, porém somente altera a temperatura do ar condicionado. Essa proposta é indicada como GLD Comparativo.

a) Percentual de Economia Diário.



b) Percentual de Economia no Período de Pico e Intermediário da Tarifa Branca..

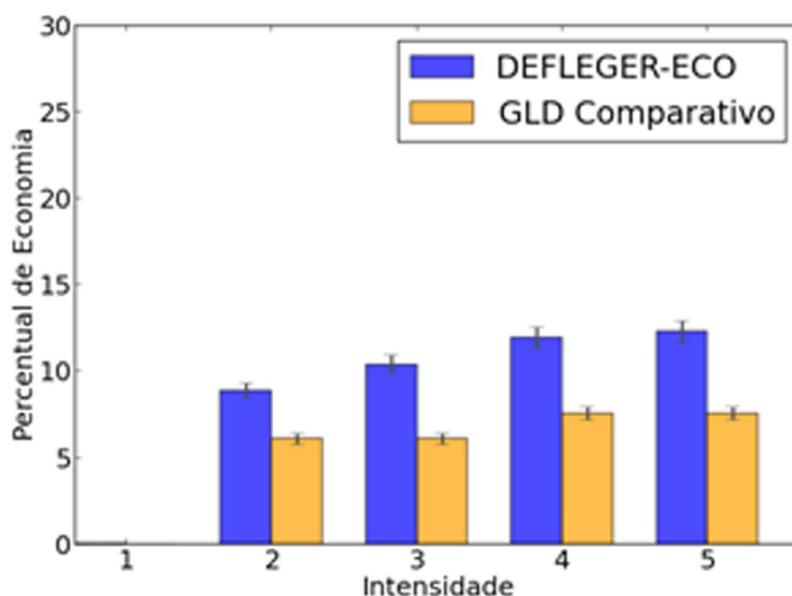


Figura 9 – Efetividade do Defleger-Eco para diferentes perfis de Intensidade no controle dos equipamentos ajustáveis

O Defleger-Eco é executado durante horário de pico, por isso há uma maior economia neste horário, se comparado à economia total do dia. Assim como esperado, quanto maior a Intensidade, maior a economia. Para Intensidade 1, como não há alteração de potência dos dispositivos, a única técnica utilizada é o deslocamento de cargas, neste caso somente a máquina de lavar. Então houve mensagem de alerta para o usuário, informando que o percentual de economia não foi alcançado.

Apesar do percentual de economia configurado ser de 5%, o Defleger-Eco e GLD Comparativo, para Intensidades superiores a 1, economizaram acima do valor solicitado pelo usuário. Isso ocorre, pois, a meta de economia é variável (ela é a média da demanda a cada t minutos) e também devido ao uso de uma estratégia desenvolvida para evitar que o gerenciador não cause instabilidade em uma determinada carga. Nas simulações, observou-se que o mecanismo anti-oscilação foi acionado logo no início do período de pico, não permitindo que houvesse aumento de potência, caso a demanda estivesse abaixo da meta para os horários seguintes. Como os limites de conforto para cada equi-

pamento são configuráveis, essa economia maior não representa um grande impacto para o usuário.

Não houve deslocamento de carga nesta primeira análise.

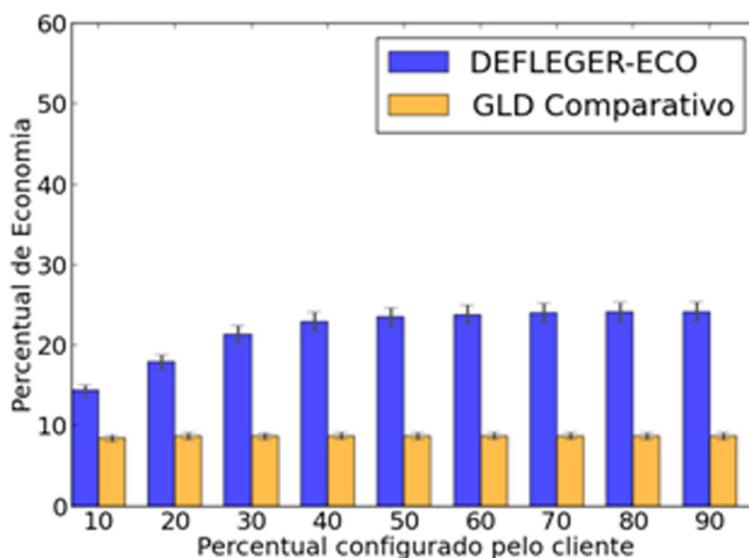
Pelos resultados obtidos, observa-se que o Defleger-Eco consegue uma maior efetividade que o GLD Comparativo sem, com isso, ferir as regras de conforto pré-estabelecidas pelo usuário. Isso foi possível devido ao fato da proposta não apenas controlar a Intensidade dos aparelhos de ar-condicionado, mas também controlar a Intensidade de outros dispositivos e realizar o deslocamento de cargas.

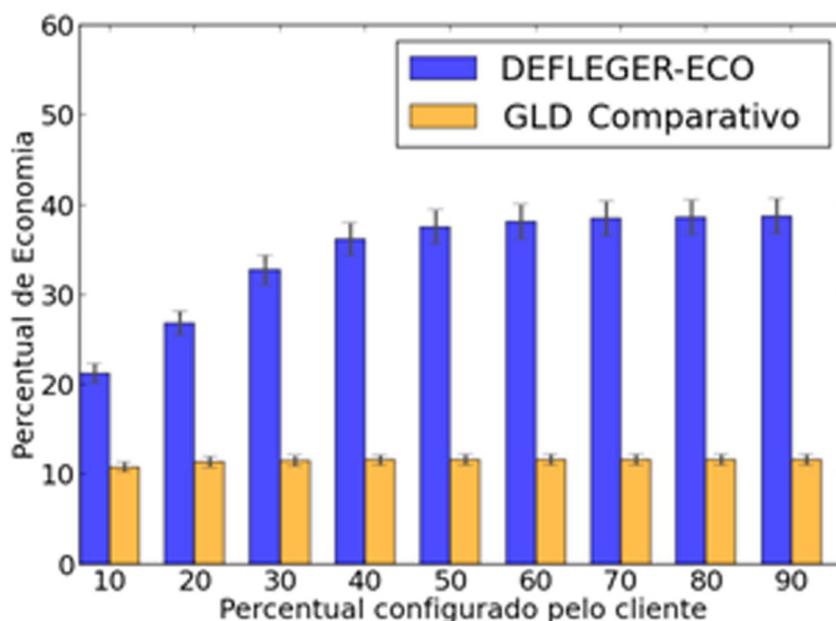
Avaliação do impacto do percentual de economia determinado pelo usuário

O terceiro parâmetro analisado foi a variação do percentual de economia configurado no gerenciador. Ele representa o percentual que o usuário deseja economizar.

O percentual de economia foi ajustado e alterado entre 10% até 90%, usando Perfil 4 e Intensidade 5 (pois representa um maior potencial de economia), como mostra a Figura 10.

a) Percentual de Economia Diário.





b) Percentual de Economia no Período de Pico e Intermediário da Tarifa Branca..

Figura 10– Efetividade do Defleger-Eco para diferentes metas de economia no período de ponta.

Conforme se aumenta o percentual de economia configurado, aumenta-se também a economia alcançada, até que o limite máximo seja atingido, ou seja, o limite dos parâmetros de conforto do usuário. Por isso, a economia em horário de pico fica próxima de 40% mesmo que a configuração seja de 90%. Nos casos em que a meta de economia não é atingida, mensagens de alerta foram enviadas aos usuários. O Defleger-Eco apresentou uma economia muito superior ao GLD Comparativo.

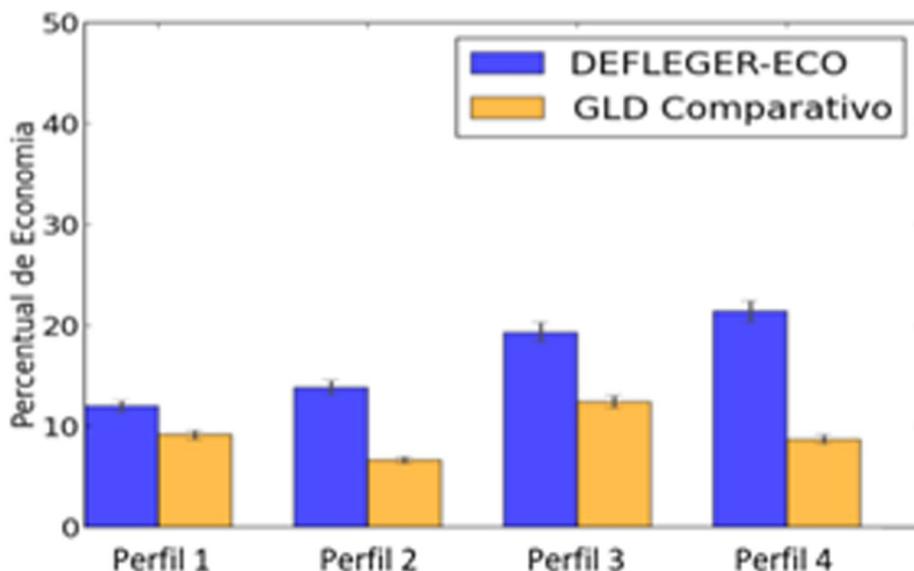
Nesta análise houve deslocamento de carga para o percentual de economia entre 30% e 90%. O dispositivo deslocado foi a máquina de lavar roupas. Diante do perfil de consumo da casa o deslocamento deste equipamento não trouxe grande impacto.

Impacto de diferentes perfis de consumo

Para finalizar a análise do Defleger-Eco, os quatro perfis de residência foram avaliados para verificar economia durante todo o dia e no horário de pico, como mostra a Figura 11.

Foi utilizada Intensidade 5 e percentual de economia de 30%. O percentual de economia foi escolhido como 30%, pois a economia máxima de alguns perfis não chega a este valor. Assim, nesta análise, há casos em que a meta é alcançada e casos em que a meta não é alcançada.

a) Percentual de Economia Diário.



b) Percentual de Economia no Período de Pico e Intermediário da Tarifa Branca.

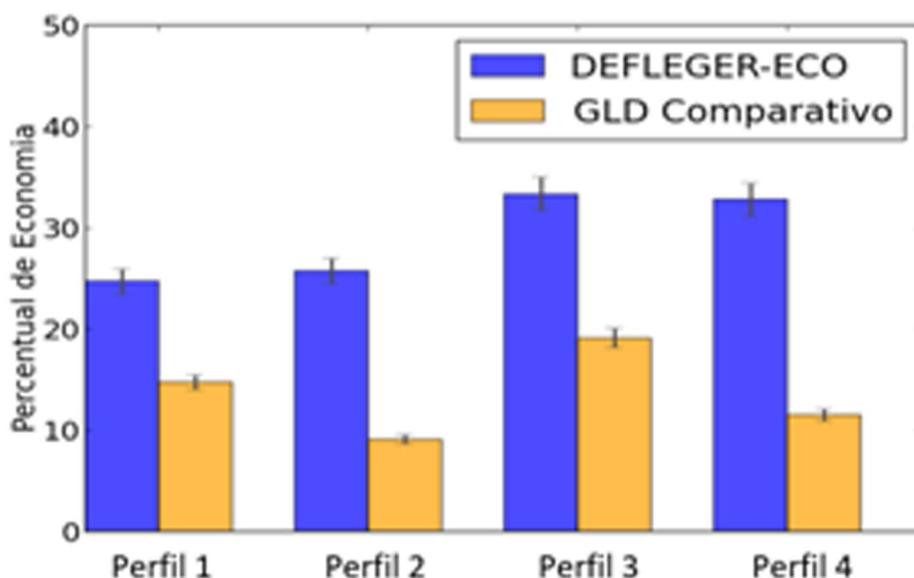


Figura 11—Efetividade do Defleger-Eco para diferentes perfis de usuários

Nota-se que, quanto maior o consumo de energia do perfil, maior a economia realizada pelo Defleger-Eco. Os Perfis 1 e 2 não conseguiram economizar o percentual de 30% configurado e mensagens de alerta foram enviadas aos clientes destas casas. Estes dois perfis também apresentaram deslocamento de carga. O dispositivo reagendado foi a máquina de lavar roupas e diante da demanda total não houve grande impacto na economia.

A Tabela 2 apresenta o consumo diário dos perfis, o consumo em horário de pico/intermediário da Tarifa Branca e a economia em kWh obtida com o Defleger-Eco.

	Consumo diário sem GLD (kWh)	Consumo no horário de pico e intermediário sem GLD (kWh)	Economia diária com Defleger-Eco (kWh)
Perfil 1	12,94	5,30	1,33
Perfil 2	16,16	8,25	2,15
Perfil 3	23,26	13,00	4,42
Perfil 4	34,31	21,00	7,14

Tabela 2 – Tabela quantitativa de consumo e economia diário.

CONCLUSÕES

Conforme apresentado nesse artigo, o GLD, além de ajudar no balanceamento entre a geração e a demanda de energia, também é uma excelente oportunidade para economizar energia ou tornar seu uso mais eficiente.

Neste trabalho, foi desenvolvido um mecanismo de gerenciamento energético residencial, baseado em técnicas de GLD, voltado para o cenário brasileiro com foco em economia de energia em residências. Um simulador foi criado para validar este mecanismo. Observando-se os trabalhos relacionados, grande parte deles buscam economizar somente através do ajuste de termostatos de aparelhos de ar-condicionado e aquecedores, ou somente através do agendamento de cargas. Então, foi proposto um modelo que utiliza as duas estratégias ao mesmo tempo (ajuste de termostato e agendamento) e que, além disso, pode trabalhar com a variação de potência de dispositivos ajustáveis. Outra contribuição é que o sistema proposto considera as escolhas do usuário relacionadas a conforto e usabilidade dos equipamentos.

Um dos objetivos ao se implantar um sistema de gerenciamento pelo lado da demanda é reduzir o desperdício de energia, ou seja, buscar corrigir o mau uso. Os perfis utilizados apresentam grandes oportunidades de economia e por isso foram escolhidos. E observou-se que quanto maior o consumo, maior a oportunidade de economia. Entre-

-tanto a proposta não serve apenas para grandes consumidores, apresentando facilidade em atender diferentes perfis de usuários. Quanto menos dispositivos elétricos na residência, maior o impacto que a energia gasta em iluminação e em chuveiros elétricos exerce na fatura. Ou seja, uma família com perfil mais simples também pode economizar com o Defleger-Eco se tiver um sistema de iluminação inteligente e chuveiros elétricos inteligentes. Logo a economia não está restrita apenas aos usuários que possuem ar-condicionado. As propostas com agendamento já possibilitavam o atendimento de diferentes perfis de casa, entretanto é importante observar que a economia por agendamento traz apenas economia no horário de pico, pois a energia total consumida pelo usuário continua a mesma. A proposta Defleger-Eco apresentada foi comparada ao mecanismo analisado em (LI e ZHANG, 2014) e demonstrou grande potencial de economia, muitas vezes economizando duas vezes mais.

Nas análises, foi dada maior atenção à técnica de flexibilidade de carga do que a de deslocamento, pois diante dos perfis escolhidos o deslocamento de carga não apresentou grande impacto na economia de energia. No deslocamento de carga o dispositivo é reagendado para funcionar em outro horário, então por mais que o usuário não consuma naquele momento, essa energia será utilizada em outro horário do dia.

O simulador desenvolvido e utilizado neste estudo é fruto da integração do simulador de redes de comunicação NS-3 e o simulador de sistemas elétricos E+. Ele apresentou o

comportamento esperado e, devido ao seu formato modular, pode ser reaproveitado para diferentes aplicações.

ABSTRACT: Smart grids arises as a power system evolution that incorporate telecommunication networks to electrical networks. As a consequence it becomes possible to perform real time monitoring, fast failure detection and recovery, and easier renewable sources integration to the electrical grid. The demand-side management programs present solutions to adjust the user consumption to generation. This work introduces a demand-side management system called Defleger-Eco designed for residential users. Defleger-Eco provides an efficient demand-side management considering user defined comfort parameters with the purpose of providing electric billing saving when using a variable tariff. In the simulation, four different scenarios were used, presenting the advantages of the mechanism for both consumers and power providers, considering the white tariff scheme as case study.

KEYWORDS: Demand-side management; Smart grid; Energy consumption; Billing.

REFERÊNCIAS

AFFONSO, C.M. e Outros. **Demand-side management to improve power security.** In: :2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Dallas, TX, 2006, p.517-522, doi: 10.1109/TDC.2006.1668550.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa N° 733 de 6 de setembro de 2016.** Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/>. Acesso em maio de 2020.

CASTRO, T.B. DEFLEGER: **DEslocamento e FLExibilidade de cargas no Gerenciamento de Energia Residencial.** Dissertação de Mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Telecomunicações, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2016.

CONCHADO, A.; LINARES, P. **The economic impact of demand-response programs on power systems. A survey of the state of the art.** In: SOROKIN A. e Outros. Handbook of Networks in Power Systems I. Berlin, Heidelberg, Springer, 2012.p.281–301.

CROSSLEY, D. **Assessment and development of network-driven demand-side management measures.** In: IEA Demand Side Management Programme, n. 2, 2008.

DI SANTO, K.G. e Outros. **A review on smart grids and experiences in Brazil.** In: Renewable and Sustainable Energy Reviews, v.52, p.1072–1082, 2015.

ELETROBRAS. **Pesquisa de Posse de Equipamentos e Hábitos de Uso: ano-base 2005, classe residencial.** Rio de Janeiro: 2007. Disponível em: <http://www.procel.gov.br/>. Acesso em Maio de 2020.

EPE. **Balço energético nacional 2019. Relatório Síntese.** Rio de Janeiro: 2019. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/>. Acesso em maio de 2020.