



AGREGADOR DE CARGAS TERMOSTATICAMENTE CONTROLÁVEIS PARA FINS DE GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA

Antonio L. R. Borges^{*1}, Raul V. A. Monteiro¹, Mayara A. dos S. Cardoso¹, Camila dos A. Fantim¹

¹UFMT – Universidade Federal de Mato Grosso

Resumo - O Gerenciamento pelo Lado da Demanda é uma prática que consiste nas unidades consumidoras prestarem suporte às redes de distribuição de energia elétrica, mantendo assim os níveis de tensão em uma faixa normatizada. Para utilizá-lo em uma unidade consumidora, torna-se inviável aplicar o controle de forma separada em cada carga do sistema elétrico em questão devido ao custo de operação elevado que se resultaria, para isso é necessário a utilização de um agregador, que consiste em uma representação matemática de um conjunto de cargas do sistema elétrico em questão, dessa forma possibilitando aplicar o controle em um único ponto, ao invés de cada carga no sistema. Portanto, essa pesquisa consiste na construção de um agregador de cargas termostaticamente controláveis representando uma população de cargas, conectadas em um sistema elétrico, e assim realizar simulações em situações de subtensão, efetuando variações nos parâmetros de controle para obter quais casos apresentam os melhores resultados. No final das simulações concluiu-se que utilizando o agregador foi possível corrigir completamente os níveis de tensão.

Palavras-Chave - Agregador, Cargas, Controle, Gerenciamento pelo lado de demanda, HVAC.

THERMOSTATICALLY CONTROLLABLE LOAD AGGREGATOR FOR DEMAND SIDE MANAGEMENT PURPOSES

Abstract - Demand Side Management is a practice that consists of consumer units providing support to electricity distribution networks, thus maintaining voltage levels in a standardized range. To use it in a consumer unit, it is impracticable to apply the control separately to each load of the electrical system in question due to the high cost of operation that would result, for this it is necessary to use an aggregator, which consists of a mathematical representation of a set of charges in the electrical system in question, thus making it possible to apply the control at a single point, instead of each charge in the system. Therefore, this research consists in the construction of a thermostatically controllable load aggregator representing a population of loads, connected in an

electrical system, and thus perform simulations in undervoltage situations, making variations in the control parameters to obtain which cases present the best results. At the end of the simulations it was concluded that using the aggregator it was possible to completely correct the stress levels.

Keywords – Aggregator, Control, Demand side management, HVAC, Load.

I. INTRODUÇÃO

O modo de operação clássico dos sistemas de energia elétrica é unidirecional, com o fluxo indo da geração até o consumidor. Porém, com o avanço tecnológico, novas práticas sustentáveis de geração de energia foram desenvolvidas, possibilitando o consumidor a assumir uma postura mais participativa nas redes e deixando para trás essa visão unidirecional de como os sistemas de energia elétrica funcionam [4].

Com essa mudança de paradigma, a demanda acabou se tornando uma variável que precisava ser analisada nos sistemas elétricos de potência, e isso desencadeou o desenvolvimento da prática do Gerenciamento pelo Lado da Demanda (*Demand Side Management – DSM*), que consiste no consumidor auxiliar a concessionária na manutenção dos níveis de tensão e frequência da rede, mantendo a mesma em uma faixa de operação aceitável.

Direct Load Control (DLC) é uma estratégia usada no DSM para atingir uma resposta rápida e previsível no controle de carga, esse método consiste em usar cargas para controlar diretamente os parâmetros do sistema elétrico, usando a energia ativa e reativa das cargas para influenciar na tensão e frequência, e um dos principais tipos de cargas que podem ser utilizadas nessa prática são as Cargas Termostaticamente Controláveis (*Thermostatically Controlled Loads – TLC*), como por exemplo os HVACs (*Heating, Ventilation, and Air Conditioning*) e os aquecedores de água [1].

Entretanto, aplicar o DLC de forma separada em cada carga em uma unidade consumidora pode acabar apresentando custos de operação elevados, para isso, uma abordagem inteligente e prática para esse problema é a construção de um agregador de cargas, que consiste em uma modelagem matemática cuja função é caracterizar e representar a evolução

^{*}aleonardoborges9@hotmail.com

da temperatura de uma população de cargas em função do tempo [1].

Desta forma, este projeto consiste na construção de um agregador de cargas termostaticamente controlável, representando uma população de HVAC, para então, em um sistema de referência do Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos (IEEE), denominado sistema IEEE 13 barras, realizar simulações em uma situação de subtensão, e depois ser realizado uma análise a partir dos resultados obtidos, alterando diversas condições de funcionamento do agregador para então concluir quais situações apresentaram melhores resultados.

Neste presente trabalho, será abordado na seção 2 uma revisão de literatura sobre pesquisas envolvendo a construção de agregadores de cargas. Na seção 3 será mostrado a metodologia usada na elaboração e construção do agregador. Na seção 4 será analisado os resultados obtidos a partir das variações nos parâmetros da simulação. A seção 5 conclui o trabalho.

II. REVISÃO DE LITERATURA

Modelagem de cargas é essencial para analisar, planejar e controlar sistemas de potência. Apesar da necessidade por modelos de cargas precisos ser reconhecido por pesquisadores de sistemas de potência e engenheiros, mais pesquisas são essenciais para atualizar modelos já existentes e para poder entender características das cargas mais modernas com as emergentes tecnologias das redes inteligentes (*Smart Grid*) como por exemplo os veículos elétricos e o DSM. A dificuldade em modelagem de cargas vem do grande número de diversos componentes na carga, variação no tempo e composições dependentes do clima, e a falta de medições e informações detalhadas da carga. O objetivo em modelagem de cargas é desenvolver simples modelos matemáticos que se aproximam do comportamento real da carga [1], [6].

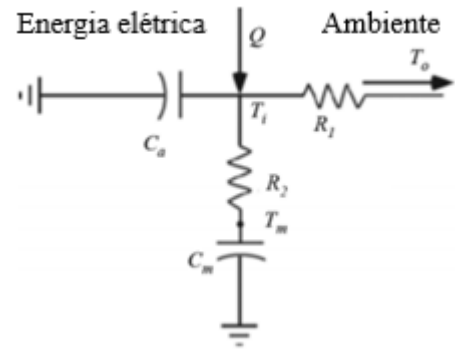
DLC é um método importante de controle para DSM. Seu objetivo é gerenciar de forma remota as cargas das unidades consumidoras para que sua demanda esteja dentro de uma faixa aceitável. Tal método foi desenvolvido para atender a necessidade de minimizar o pico de consumo, obtendo assim maior confiabilidade e uma redução nos custos dos sistemas de distribuição elétrica. Uma aplicação importante do DLC são os HVACs devido a sua significativa porcentagem no consumo global de eletricidade e seu baixo impacto no conforto do usuário [7]-[10].

III. METODOLOGIA

A. Modelagem do agregador e comparação com modelo real

Escolheu-se o trabalho apresentado em [1] como principal fonte para a modelagem do agregador. Nele, o agregador é baseado em uma população de HVACs genéricos descritos pelo Parâmetro Térmico Equivalente (*Equivalent Thermal Parameter – ETP*).

Figura 1 – Modelo do ETP de um HVAC residencial.



A Figura 1 mostra um modelo de ETP proposto em [2], ele apresenta um equacionamento em espaço de estados que descreve matematicamente o comportamento do HVAC.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (1)$$

$$y = Cx + Du \quad (2)$$

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{T}_i \\ \dot{T}_m \end{bmatrix}; x = \begin{bmatrix} T_i \\ T_m \end{bmatrix}; u = 1 \quad (3)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\left(\frac{1}{R_2 C_a} + \frac{1}{R_1 C_a}\right) & \frac{1}{R_2 C_a} \\ \frac{1}{R_2 C_m} & -\frac{1}{R_2 C_m} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{T_0}{R_1 C_a} + \frac{Q}{C_a} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}; D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

Onde:

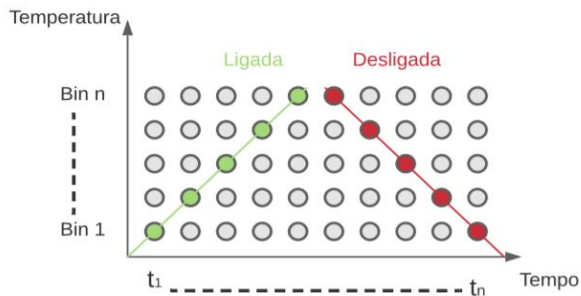
- C_a e C_m é a capacidade de aquecimento do ar e das massas, respectivamente;
- R_1 e R_2 são as resistências térmicas equivalentes do ar e das massas, respectivamente;
- T_i e T_m é a temperatura interna do ar e a temperatura das massas, respectivamente;
- Q é a taxa de aquecimento do HVAC;
- T_o é a temperatura ambiente.

Com esses parâmetros estabelecidos, montou-se a simulação que representa o HVAC funcionando normalmente, o mesmo irá servir para comparação com os resultados do agregador.

Tendo isso em mente, partiu-se para a montagem do agregador. O modelo de agregador proposto em [1] consiste em agrupar as cargas em “bins”, grupos onde HVACs com temperaturas em uma determinada faixa ficam juntos, e toda vez que é efetuado uma alteração na temperatura de cada

HVAC, ele é automaticamente colocado em um novo “bin” ou é mantido na mesma posição.

Figura 2 – Representação dos bins e suas transições de temperatura



A Figura 2 demonstra o comportamento de um HVAC no decorrer do tempo, cada coluna de círculos representa todos os *bins* do sistema em um instante de tempo t , então inicialmente quando a carga está ligada, ela irá transitar entre os *bins* conforme o tempo passa, seguindo uma trajetória representada pelos círculos verdes, cada *bin* representa um intervalo de temperatura e quando a carga chega em sua *deadband*, atingindo assim sua temperatura máxima configurada, ela irá ser automaticamente desligada e sua temperatura começará a diminuir, e toda a trajetória que ela fez quando estava ligada dessa vez será refeita no sentido contrário, sendo representado pelos círculos vermelhos.

Neste trabalho, o sistema proposto irá alocar cada carga em um *bin* de acordo com a temperatura das mesmas, após todas as cargas serem alocadas em seus respectivos *bins* em um determinado instante de tempo t , é realizado o cálculo da potência ativa e reativa representada pelo vetor “ $q(t)$ ”, esse vetor é um mapeamento 2D de todas as cargas que estão sendo representadas no agregador, e ele é montado a partir da distribuição dos *bins* no sistema através da equação (7).

$$q(t) = [q_{on}(1, t), q_{on}(2, t), \dots, q_{on}(n_a, t), q_{off}(1, t), q_{off}(2, t), \dots, q_{off}(n_a, t)] \quad (7)$$

Nessa equação, q_{on} representa as cargas que estão ligadas e q_{off} as cargas desligadas, dessa forma o primeiro espaço do vetor será preenchido pela fração de cargas que estão ligadas e ocupando o primeiro *bin* do sistema, a segunda posição representa a fração de cargas ligadas e localizadas no segundo *bin*, e assim respectivamente até percorrer todos os *bins* ligados, então parte-se para o mesmo processo, porém agora com as cargas desligadas. Com isso, em cada instante de tempo é realizado esse mapeamento de forma que quando somadas as frações de cargas em cada espaço do vetor, o resultado deverá ser sempre 1.

Realizou-se a simulação no software SIMULINK dentro da plataforma do MatLab, isso se deve ao fato da necessidade de uma combinação entre códigos de programação para a construção do agregador e a necessidade do uso de um sistema elétrico de potência na próxima etapa do projeto. A simulação possui intervalo de 1 minuto entre cada iteração, durante um período de 1440 minutos, então a cada minuto realiza-se um acréscimo de temperatura, então todas as etapas explicadas acima são efetuadas novamente, dessa forma, obtém-se em

cada iteração a temperatura e o estado de funcionamento de cada carga, e a potência ativa e reativa do agregador.

O agregador foi configurado para representar cargas com um *setpoint* de 23°C e 6°C de *deadband*, ou seja, a temperatura de cada HVAC no agregador irá ficar variando entre 20°C e 26°C e todos eles estarão no modo aquecedor, então enquanto estiverem ligados a temperatura irá aumentar e quando estiverem desligados a temperatura irá diminuir, quando uma carga que estiver ligada atingir 26°C ela será automaticamente desligada, da mesma forma uma carga será ligada quando sua temperatura atingir 20°C.

B. Simulação no sistema IEEE 13 barras e aplicação do controle

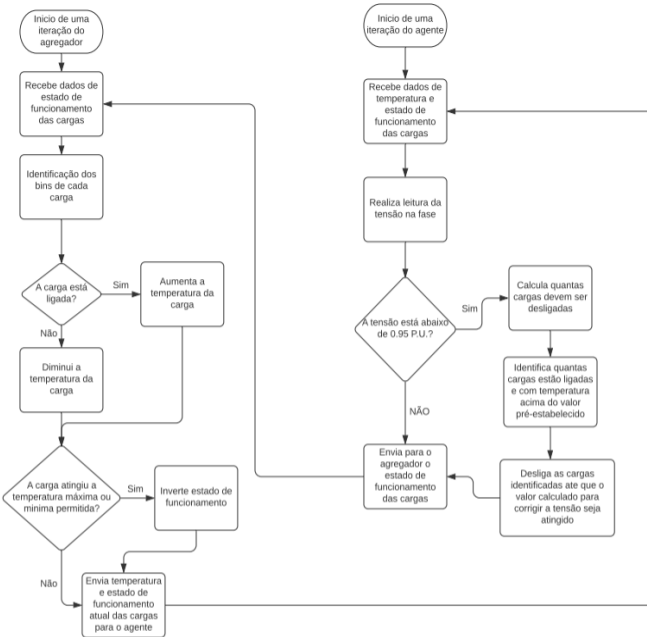
A primeira etapa do projeto consistiu em comparar o funcionamento do agregador desenvolvido com as cargas operando de forma separadas, feito isso, partiu-se para a segunda etapa, a simulação de uma situação de subtensão dentro de um sistema elétrico de potência.

O ambiente de simulação escolhido foi o sistema elétrico de referência da IEEE presente no software SIMULINK, suas cargas inicialmente estáticas foram substituídas por cargas dinâmicas trifásicas, de forma que durante o dia pudesse ser observado variações nos valores de tensão medidos.

A simulação foi programada de forma que em determinado momento a tensão na fase C da barra 675 fique abaixo do valor permitido (0,95 P.U.), quando isso ocorrer, o mecanismo responsável pelo controle irá atuar no agregador, controlando suas cargas de forma que a tensão se estabilize acima dos valores aceitáveis.

O responsável pelo controle da tensão é o agente, esse dispositivo recebe os dados de temperatura e estado de funcionamento das cargas (1 se estiver ligado e 0 se estiver desligado) em cada iteração, e nele é configurado a temperatura mínima da carga para que o controle possa ser atuado nela, essa configuração evita que cargas que já acabaram de serem ligadas devido ao seu *setpoint* recebam um comando do agente, diminuindo dessa forma as oscilações na tensão da fase e uma redução no “*stress*” do aparelho, evitando assim uma diminuição no tempo de vida útil de cada HVAC se estivesse operando em um ambiente real.

Figura 3 – Fluxograma explicando o funcionamento do agregador operando com o agente



Como pode-se observar no fluxograma da Figura 3, a função do agente é detectar quando a tensão está abaixo de 0,95 P.U., calcular quantas cargas devem ser desligadas para efetuar a elevação da tensão, identificar quantas cargas estão aptas para serem controladas (apenas cargas ligadas e com temperatura acima do valor configurado), e então enviar um sinal para o agregador desligar essas cargas.

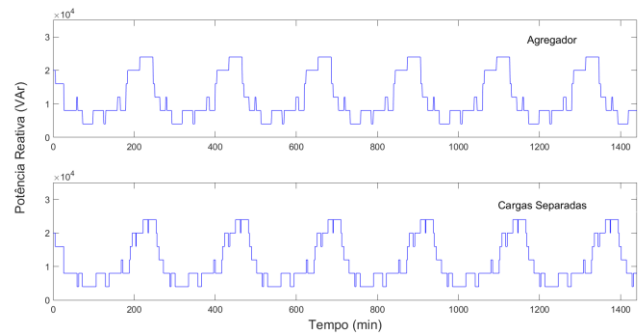
Durante as diversas simulações realizadas, ocorreu uma notável diferença no comportamento da tensão conforme alguns parâmetros iam sendo alterados, com isso em mente realizou-se um estudo comparando os resultados no controle da tensão enquanto iam sendo alterados a temperatura de atuação do agente no agregador heterogêneo de 40 cargas.

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Teste de funcionalidade do agregador

Durante a primeira etapa do projeto onde testou-se o funcionamento do agregador, realizou-se uma simulação com 10 HVACs operando separadamente para servir de referência, e foi simulado um agregador representando essas 10 cargas. O objetivo dessa etapa era comparar os dois resultados e obter gráficos mais similares possível.

Figura 4 – Potência reativa comparando agregador e cargas separadas



Como pode-se observar na Figura 4, o resultado demonstrado pelo agregador foi extremamente similar ao do modelo real (cargas separadas), com tal resultado obtido, pode-se dar continuidade à próxima etapa de simulações.

B. Simulação de subtenção

No sistema IEEE 13 barras realizou-se simulações com diversas alterações nos parâmetros do agregador, e dentre elas o agregador heterogêneo com 40 cargas demonstrou melhor desempenho, então realizou-se simulações com esse agregador, alterando a temperatura de atuação do agente, variando em 22°C, 23°C e 24°C.

Figura 5 – Resultado base do perfil de tensão na fase C

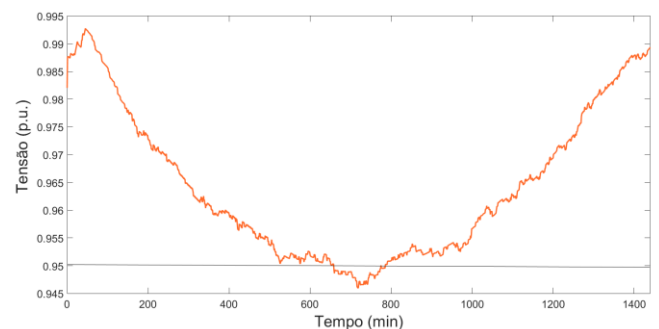
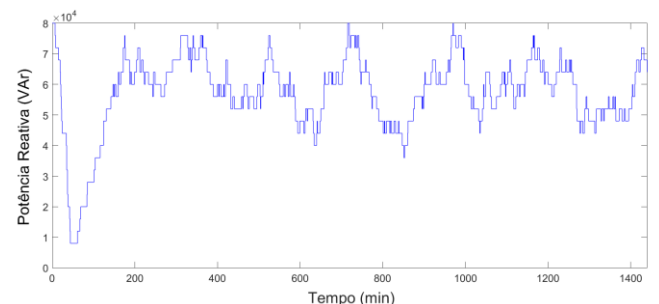


Figura 6 – Resultado base da potência reativa do agregador



A Figura 5 e Figura 6 mostra o comportamento da tensão e potência reativa durante o dia sem a atividade do agente no controle, ela irá servir como resultado base para comparar se houve melhoria na tensão quando ocorrer a simulação com controle. Na Figura 5 observa-se que entre os minutos 600 e 800 a tensão fica abaixo de 0,95 P.U., e nesse mesmo período

a Figura 6 apresenta um dos picos de potência que as cargas do agregador estão consumindo.

Figura 7 – Perfil de tensão com o agente atuando no agregador heterogêneo de 40 cargas

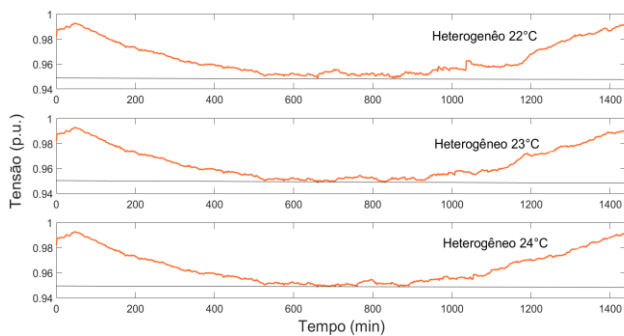


Figura 8 – Potência reativa do agregador heterogêneo de 40 cargas

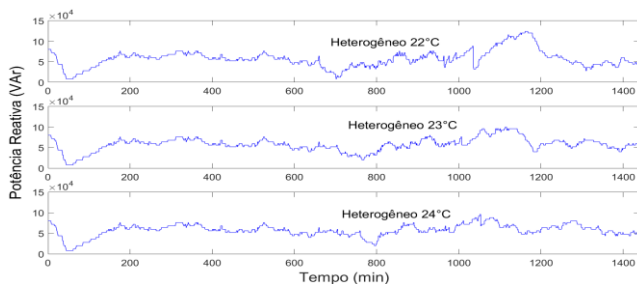


Figura 9 – Temperatura do agregador heterogêneo de 40 cargas com controle em 22°C

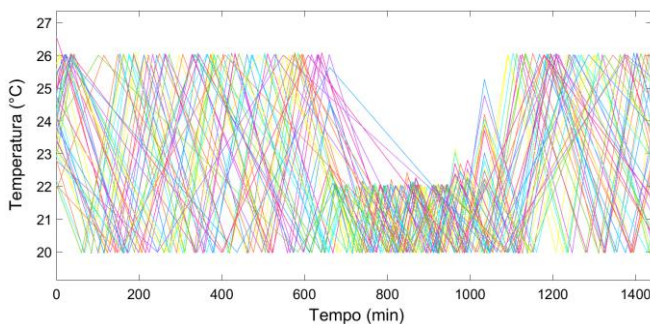


Figura 10 – Temperatura do agregador heterogêneo de 40 cargas com controle em 23°C

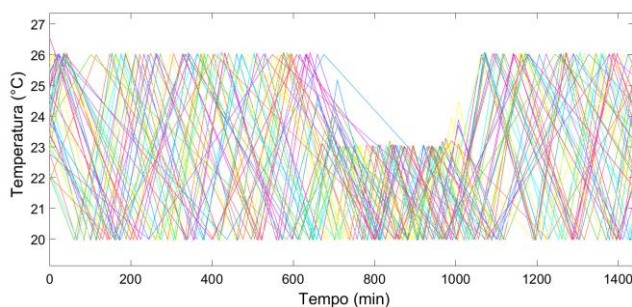
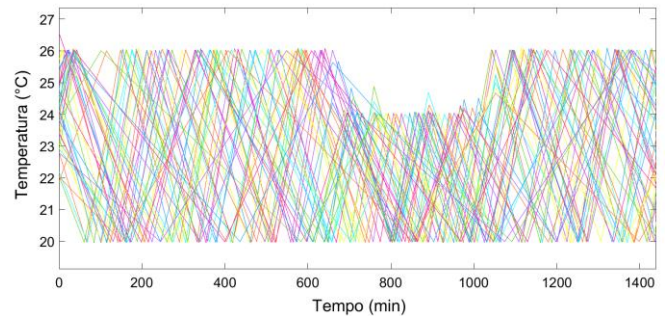


Figura 11 – Temperatura do agregador heterogêneo de 40 cargas com controle em 24°C



A Figura 7 mostra a tensão obtida nos 3 casos simulados do agente atuando no agregador, pode-se observar ao comparar a Figura 5 com a Figura 7 que em todas as situações a tensão no período de 600 a 800 minutos foi corrigida e agora não apresenta mais subtensão. Quando compara-se a Figura 6 com a Figura 8, nota-se uma significativa redução na potência reativa do agregador, com valores na faixa de 8 KVar na Figura 6 durante o período de 600 a 800 minutos, e nos 3 casos da Figura 8 seu valor fica em torno de 5 KVar nesse mesmo período, tais dados indicam que o agente entrou em ação nos momentos de subtensão e enviou sinais para desligar algumas cargas do agregador, resultando em uma diminuição da potência e consequentemente um aumento na tensão.

As Figuras 9, 10 e 11 indicam o comportamento da temperatura das cargas do agregador com o agente funcionando em 22°C, 23°C e 24°C, a única diferença nos parâmetros das 3 simulações foi essa diferença na temperatura de atuação do controle, como pode-se observar na Figura 9, quando ocorre a subtensão (entre os minutos 600 e 800), o agente só consegue enviar o comando de desligar para cargas quando suas temperaturas atingem 22°C, e o mesmo ocorre na Figura 10 com o agente funcionando em 23°C e na Figura 11 com 24°C. Essa única diferença foi responsável por algumas variações que podem ser observadas quando compara-se os 3 resultados da Figura 7 e da Figura 8.

Quando o agente está operando em 22°C, ele precisa esperar menos tempo para poder estar apto a controlar uma determinada carga, então seu tempo de resposta a partir do início da subtensão é menor em relação aos outros 2 casos, isso é evidenciado quando se compara os 3 gráficos da Figura 8, nele o Heterogêneo 22°C apresenta uma grande queda na potência aproximadamente no minuto 700, muito mais rápido em relação as outras duas situações, e esse impacto é igualmente refletido na Figura 7, já que ele é o que apresenta uma maior elevação na tensão nesse mesmo período de tempo.

De maneira análoga, o agente funcionando em 24°C é o que demora mais para responder a subtensão, já que o mesmo precisa esperar a carga atingir essa temperatura para poder enviar o comando de desligar, tal processo leva mais tempo que as outras duas situações, mas em contrapartida, apesar dessa configuração ser a que demora mais para responder a subtensão, ela é a que apresenta menor oscilação de potência, já que suas cargas passam mais tempo ligadas ou desligadas, enquanto que para 22°C ou 23°C o período entre o comando do agente de desligar uma carga e ela atingir sua temperatura mínima pela *deadband* (20°C) é um pouco menor, causando

assim maiores oscilações, já que as cargas são ligadas e desligadas com mais frequência. Esse resultado pode ser observado ao analisar os picos de potência na Figura 8, o gráfico que mais oscila verticalmente é o de 22°C, seguido do de 23°C e o mais constante entre os 3 é o de 24°C.

As 3 configurações apresentaram resultados semelhantes, e todos conseguiram corrigir a tensão quando solicitado, mas conforme analisado, quando o agente está configurado em 22°C, ele apresenta uma resposta mais rápida a subtensão, mas acaba oscilando mais com o passar do tempo, enquanto que o de 24°C é o oposto, ele responde mais devagar, mas é mais estável, e o de 23°C fica em uma situação mediana entre os outros 2 apresentados.

V. CONCLUSÕES

Essa pesquisa apresentou um modelo de agregador de cargas totalmente funcional, e quando o mesmo aplicou-se em situações de subtensão, foi possível proporcionar uma correção no perfil de tensão para valores aceitáveis.

Portanto, o Gerenciamento pelo Lado da Demanda mostrou ser uma alternativa muito viável para prestar suporte às redes de distribuição frente aos problemas que os sistemas elétricos de potência podem enfrentar na nossa atual sociedade, e o uso de agregadores como método para diminuir custos e simplificar a utilização dessa metodologia de controle pode e deve ser considerado quando pretende-se utilizar cargas termostaticamente controláveis para efetuar tal gerenciamento.

REFERÊNCIAS

- [1] Zhang, W.; Lian, J.; Chang, C.; Kalsi, K.; Aggregated Modeling and Control of Air Conditioning Loads for Demand Response. *IEEE Transactions on Power Systems*, v. 28, n. 4, p. 4655-4664, 2013.
- [2] Lu, N.; An evaluation of the hvac load potential for providing load balancing service. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v.3, n. 3, p. 1263-1270.
- [3] Lin, S.; Liu, D.; Hu, F.; Li, F.; Dong, W.; Li, D.; Fu, Y.; Grouping control strategy for aggregated thermostatically controlled loads. *Electric Power Systems Research* 171, p. 97-104, 2019.
- [4] Palensky, P.; Dietrich, D.; Demand Side Management: Demand Response, Intelligent Energy Systems, and Smart Loads. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 7, n. 3, p. 381-388, 2011.
- [5] Zhang, W.; Kalsi, K.; Fuller, J.; Elizondo, M.; Chassin, D.; Aggregate Model for Heterogeneous Thermostatically Controlled Loads with Demand Response. 978-1-4673-2729-9/12 2012 IEEE.
- [6] Arif, A.; Wang, Z.; Wang, J.; Mather, B.; Bashualdo, H.; Zhao, D.; Load Modeling—A Review. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 9, n. 6, p. 5986-5999, 2018.
- [7] Tejada, G.; Cipriano, A.; A Hybrid MPC Optimization approach for HVAC Direct Load Control. 15th IFAC Workshop on Control Applications of Optimization The International Federation of Automatic Control September 13-16, 2012. Rimini, Italy.
- [8] Song, M.; Gao, C.; Yan, H.; Yang, J.; Thermal Battery Modeling of Inverter Air Conditioning for Demand Response. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 9, n. 6, p. 5522-5534, 2018.
- [9] Hreinsson, K.; Scaglione, A.; On Aggregating Thermostatically Controlled Loads Based on Energy Losses. 978-1-5386-2212-4/17 2017 IEEE.
- [10] Ledva, G. S.; Peterson, S.; Mathieu, J. L.; Benchmarking of Aggregate Residential Load Models Used for Demand Response. 978-1-5386-7703-2/18 2018 IEEE.