

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA

Débora Batissoco Sanches de Oliveira

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE RESPOSTA DA DEMANDA EM  
EQUIPAMENTOS HVAC**

Florianópolis

2021

Débora Batissoco Sanches de Oliveira

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE RESPOSTA DA DEMANDA EM  
EQUIPAMENTOS HVAC**

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Francisco Coelho

Coorientadora: Eng. Tania Nalborczyk Leites

Florianópolis

2021

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

de Oliveira, Débora Batissoco Sanches  
ANÁLISE DA VIABILIDADE DE RESPOSTA DA DEMANDA EM  
EQUIPAMENTOS HVAC / Débora Batissoco Sanches de Oliveira ;  
orientador, Roberto Francisco Coelho, coorientador, Tania  
Nalborczyk Leites, 2021.  
86 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,  
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2021.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Resposta da Demanda. 3.  
Mercado de Energia. 4. HVAC. I. Francisco Coelho, Roberto  
. II. Nalborczyk Leites, Tania. III. Universidade Federal  
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. IV.  
Título.

Débora Batissoco Sanches de Oliveira

**ANÁLISE DA VIABILIDADE DE RESPOSTA DA DEMANDA EM  
EQUIPAMENTOS HVAC**

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheira Eletricista” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Elétrica.

Florianópolis, 20 de abril de 2021.

---

Prof. Jean Viane Leite, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof. Roberto Francisco Coelho, Dr.  
Orientador

Universidade Federal de Santa Catarina

DocuSigned by:  
*Tania Nalborczyk Leites*  
7078BE127020434...

---

Eng. Tania Nalborczyk Leites  
Coorientadora  
Norus

---

Prof. Marcelo Lobo Heldwein, Dr.  
Avaliador  
Universidade Federal de Santa Catarina



Documento assinado digitalmente  
Luna Leao Gloria  
Data: 29/04/2021 15:35:39-0300  
CPF: 101.813.756-48  
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

---

Eng. Eletric. Luna Leão Glória

Avaliadora

Fundação CERTI

---

Eng. Eletric. Lenon Schmitz Dr.

Avaliador

Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a Deus, à minha família e em especial ao meu esposo, que me apoiou nessa trajetória.

## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter conseguido concluir essa etapa tão importante em minha vida.

Ao meu esposo que esteve ao meu lado todos os dias: seu incentivo foi fundamental!

À minha família que, embora distante, sempre acreditou no meu potencial e me apoiou nos momentos difíceis!

A todos os professores que se dedicaram ao ensino, e em especial, ao meu orientador Roberto Coelho pela disponibilidade durante a execução deste trabalho.

À minha coorientadora Tania Nalborczyk Leites pela participação ativa no desenvolvimento desse estudo, pelo apoio técnico, pelos conselhos e pela boa convivência!

Ao Centro de Energia Sustentáveis da Fundação CERTI pelos dados, materiais e suporte financeiro necessários ao estudo.

Enfim, agradeço aos meus colegas de profissão que, além da enorme transferência de conhecimento, tiveram um papel essencial na minha formação e no meu posicionamento como pesquisadora e engenheira.

Combati o bom combate, acabei a carreira, guardei a fé.  
(Bíblia Sagrada, Timóteo 4:7)



## RESUMO

Este trabalho apresenta estudos de casos para a aplicação de Resposta da Demanda (RD) de equipamentos de climatização, estabelecendo estratégias em diversos níveis de agressividade que levem em consideração o conforto térmico nas instalações. Em uma primeira etapa, são feitas simulações no *software* DRQAT, utilizando como dados de entrada os dados climáticos das cidades onde se localizam as unidades consumidoras estudadas e obtendo como saída os dados de conforto térmico, potência e energia no período. Com os valores, é feita uma análise comparativa utilizando os preços do mercado de curto prazo, para verificar a viabilidade de se participar de eventos de RD para liquidar no mercado de curto prazo. Dessa forma, verifica-se as circunstâncias nas quais a RD se torna viável para este setor. O resultado dessa análise indica que, para que haja oportunidades para fornecimento de RD com máxima eficiência do uso dos recursos, é necessária a criação de incentivos que considere o peso dos eventos de RD para a confiabilidade do sistema, tornando a flexibilidade bem remunerada e atraindo assim a participação dos consumidores de energia elétrica.

**Palavras-chave:** Resposta da Demanda. Conforto térmico. Flexibilidade.

## ABSTRACT

This work presents case studies for the application of Demand Response (RD) of air conditioning equipment, establishing strategies at different levels of aggressiveness that take into account the thermal comfort in the installations. In a first step, simulations are made in the DRQAT software, using the climatic data of the cities where the consumer units studied are located as input data and obtaining the thermal comfort, power and energy data for the period as an output. With the energy values, a comparative analysis is made using the prices of the short-term market, to verify the feasibility of participating in RD events to settle in the short-term market. Thus, the circumstances in which DR becomes viable for this sector are verified. The result of this analysis indicates that, in order to provide opportunities for providing RD with maximum efficiency in the use of resources, it is necessary to create incentives that consider the weight of RD events for the system's reliability, making flexibility well-paid and attracting thus the participation of electricity consumers.

**Keywords:** Demand Response. Thermal comfort. Flexibility.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Estruturação dos agentes no setor elétrico brasileiro.....                 | 18 |
| Figura 2 – Eficiência energética para uma curva de carga base ao longo do dia.....    | 22 |
| Figura 3 – Resposta da demanda para uma curva de carga base ao longo do dia.....      | 22 |
| Figura 4- Tipos de RD consolidadas no cenário mundial .....                           | 28 |
| Figura 5 - Relação entre os índices PMV e PPD de conforto térmico.....                | 31 |
| Figura 6 - Cronograma da Estratégia 1 para equipamentos HVAC.....                     | 36 |
| Figura 7 - Estratégia 1: <i>setpoint</i> da temperatura da zona.....                  | 37 |
| Figura 8 - Estratégia 1: <i>setpoint</i> da temperatura da água gelada.....           | 37 |
| Figura 9 - Cronograma da Estratégia 2 para equipamentos HVAC.....                     | 38 |
| Figura 10 - Estratégia 2: <i>setpoint</i> da temperatura da zona.....                 | 39 |
| Figura 11 - Estratégia 2: <i>setpoint</i> da temperatura da água gelada.....          | 39 |
| Figura 12 - Cronograma da Estratégia 3 para equipamentos HVAC.....                    | 40 |
| Figura 13 - Estratégia 3: <i>setpoint</i> da temperatura da zona.....                 | 41 |
| Figura 14 - Estratégia 3: <i>setpoint</i> da temperatura água gelada.....             | 41 |
| Figura 15 – Total de energia flexível anual para cada zona e para cada estratégia.... | 43 |
| Figura 16 – Resultados médios em conforto térmico para cada estratégia simulada.      | 44 |
| Figura 17 - Cronograma da Estratégia 1 para equipamentos HVAC.....                    | 47 |
| Figura 18 - Estratégia 1: <i>setpoint</i> da temperatura da zona.....                 | 48 |
| Figura 19 - Estratégia 1: <i>setpoint</i> da temperatura da água gelada.....          | 48 |
| Figura 20 - Cronograma da Estratégia 2 para equipamentos HVAC.....                    | 49 |
| Figura 21 - Estratégia 2: <i>setpoint</i> da temperatura da zona.....                 | 50 |
| Figura 22 - Estratégia 2: <i>setpoint</i> da temperatura da água gelada.....          | 50 |
| Figura 23 - Cronograma da Estratégia 3 para equipamentos HVAC.....                    | 51 |
| Figura 24 - Estratégia 3: <i>setpoint</i> da temperatura da zona.....                 | 52 |
| Figura 25 - Estratégia 3: <i>setpoint</i> da temperatura água gelada.....             | 52 |
| Figura 26 - Total de energia anual para cada zona e para cada estratégia.....         | 54 |
| Figura 27 - Resultados médios em conforto térmico para cada estratégia simulada.      | 55 |
| Figura 28 - Cronograma da Estratégia 1 para equipamentos HVAC.....                    | 59 |
| Figura 29 - Estratégia 1: <i>setpoint</i> da temperatura da zona.....                 | 59 |
| Figura 30 - Estratégia 1: <i>setpoint</i> da temperatura da água gelada.....          | 60 |
| Figura 31 - Cronograma da Estratégia 2 para equipamentos HVAC.....                    | 61 |

|  |    |
|--|----|
| Figura 32 - Estratégia 2: <i>setpoint</i> da temperatura da zona .....                       | 61 |
| Figura 33 - Estratégia 2: <i>setpoint</i> da temperatura da água gelada.....                 | 62 |
| Figura 34 - Cronograma da Estratégia 3 para equipamentos HVAC.....                           | 63 |
| Figura 35 - Estratégia 3: <i>setpoint</i> da temperatura da zona.....                        | 64 |
| Figura 36 - Estratégia 3: <i>setpoint</i> da temperatura água gelada.....                    | 64 |
| Figura 37 - Total de energia anual para cada zona e para cada estratégia. ....               | 66 |
| Figura 38 - Resultados médios em conforto térmico para cada estratégia simulada.             | 67 |
| Figura 39 – PLD sombra calculado para o dia 17/11/2020 no submercado Sudeste em R\$/MWh..... | 69 |
| Figura 40 - PLD sombra calculado para o dia 04/11/2020 no submercado Sudeste em R\$/MWh..... | 69 |
| Figura 41 – PLD horário sombra para novembro/2020 no submercado Sudeste.....                 | 70 |

## LISTA DE TABELAS

|  |    |
|--|----|
| Tabela 1- Fatores que influenciam a RD em equipamentos HVAC. ....  | 29 |
| Tabela 2 – Estratégias de Resposta da Demanda para HVAC .....  | 30 |
| Tabela 3 – Variáveis de entrada no <i>software</i> . ....  | 34 |
| Tabela 4 – Divisão dos ambientes para aplicação de estratégias de RD. ....                                 | 35 |
| Tabela 5 – Cronograma de RD para HVAC em Hotel.....  | 35 |
| Tabela 6 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 1.....   | 38 |
| Tabela 7 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 2.....   | 40 |
| Tabela 8 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 3.....   | 42 |
| Tabela 9 – Resultados mensais em energia flexível para cada zona e estratégia em kWh no hotel. ....        | 42 |
| Tabela 10 – Divisão dos ambientes para aplicação de estratégias de RD. ....                                | 45 |
| Tabela 11 – Cronograma de RD para HVAC para o Data Center. ....  | 46 |
| Tabela 12 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 1.....  | 49 |
| Tabela 13 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 2.....  | 51 |
| Tabela 14 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 3.....  | 53 |
| Tabela 15 – Resultados mensais em energia para cada zona e estratégia em kWh no data center. ....          | 53 |
| Tabela 16 – Divisão dos ambientes para aplicação de estratégias de RD. ....                                | 57 |
| Tabela 17 – Cronograma de RD para HVAC no Centro Educacional. ....   | 58 |
| Tabela 18 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 1.....  | 60 |
| Tabela 19 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 2.....  | 62 |
| Tabela 20 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 3.....  | 65 |
| Tabela 21 – Resultados mensais em energia para cada zona e estratégia em kWh no centro universitário. .... | 65 |
| Tabela 22 – Resultados da análise de preços para o cenário de melhor caso no mês de Novembro. ....         | 71 |
| Tabela 23 – Resultados da análise de preços para o cenário de pior caso. ....                              | 72 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|        |   |
|--------|---|
| ABNT   | Associação Brasileira de Normas Técnicas                          |
| ANEEL  | Agência Nacional de Energia Elétrica                              |
| ASHRAE | <i>American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers</i> |
| CCEE   | Câmara de Comercialização de Energia Elétrica                     |
| Cepel  | Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel)                   |
| CMSE   | Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico                         |
| CNPE   | Conselho Nacional de Política Energética                          |
| CMO    | Custo Marginal de Operação  |
| DRQAT  | <i>Demand Response Quick Assessment Tool</i>                      |
| EPE    | Empresa de Pesquisa Energética                                    |
| HVAC   | <i>Heating, Ventilation and Air Conditioning</i>                  |
| MME    | Ministério de Minas e Energia                                     |
| ONS    | Operador Nacional do Sistema Elétrica                             |
| PMV    | Voto Médio Estimado   |
| PPD    | Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas                              |
| RD     | Resposta da Demanda   |
| SIN    | Sistema Interligado Nacional                                      |

## SUMÁRIO

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                        | <b>15</b> |
| 1.1          | OBJETIVOS.....                                 | 15        |
| 1.2          | Objetivo Geral .....                           | 15        |
| <b>1.2.1</b> | <b>Objetivos Específicos.....</b>              | <b>16</b> |
| <b>1.2.2</b> | <b>Motivação .....</b>                         | <b>16</b> |
| <b>1.2.3</b> | <b>Metodologia.....</b>                        | <b>16</b> |
| <b>2</b>     | <b>REFERENCIAL TEÓRICO .....</b>               | <b>18</b> |
| 2.1          | Estrutura do Setor Elétrico .....              | 18        |
| <b>2.1.1</b> | <b>Geração.....</b>                            | <b>20</b> |
| <b>2.1.2</b> | <b>Transmissão .....</b>                       | <b>20</b> |
| <b>2.1.3</b> | <b>Distribuição.....</b>                       | <b>20</b> |
| <b>2.1.4</b> | <b>Comercialização.....</b>                    | <b>20</b> |
| 2.1.4.1      | Ambiente de contratação regulado (ACR) .....   | 20        |
| 2.1.4.2      | Ambiente de contratação livre (ACL).....       | 20        |
| 2.1.4.2.1    | <i>Preço de liquidação de diferenças .....</i> | <i>21</i> |
| 2.2          | Resposta da Demanda .....                      | 22        |
| <b>2.2.1</b> | <b>RD no Brasil.....</b>                       | <b>23</b> |
| 2.2.1.1      | RD baseada em preços .....                     | 24        |
| 2.2.1.2      | RD baseada em incentivos .....                 | 24        |
| <b>2.2.2</b> | <b>RD no cenário mundial.....</b>              | <b>25</b> |
| 2.3          | Equipamentos HVAC.....                         | 28        |
| <b>2.3.1</b> | <b>RD em equipamentos HVAC .....</b>           | <b>29</b> |
| <b>3</b>     | <b>DESENVOLVIMENTO .....</b>                   | <b>33</b> |
| 3.1          | <i>Software</i> de simulação DRQAT .....       | 33        |
| 3.2          | Estudos de caso .....                          | 34        |
| <b>3.2.1</b> | <b>Hotel.....</b>                              | <b>34</b> |

|              |  |           |
|--------------|--|-----------|
| 3.2.1.1      | Estratégia 1 .....   | 36        |
| 3.2.1.2      | Estratégia 2 .....   | 38        |
| 3.2.1.3      | Estratégia 3 .....   | 40        |
| 3.2.1.4      | Compilação dos resultados.....                                     | 42        |
| 3.2.1.5      | Discussão dos resultados .....                                     | 44        |
| <b>3.2.2</b> | <b>Data center .....</b>   | <b>45</b> |
| 3.2.2.1      | Estratégia 1 .....   | 47        |
| 3.2.2.2      | Estratégia 2 .....   | 49        |
| 3.2.2.3      | Estratégia 3 .....   | 51        |
| 3.2.2.4      | Compilação dos resultados.....                                     | 53        |
| 3.2.2.5      | Discussão dos resultados .....                                     | 55        |
| <b>3.2.3</b> | <b>Centro universitário .....</b>                                  | <b>56</b> |
| 3.2.3.1      | Estratégia 1 .....   | 58        |
| 3.2.3.2      | Estratégia 2 .....   | 60        |
| 3.2.3.3      | Estratégia 3 .....   | 63        |
| 3.2.3.4      | Compilação dos resultados.....                                     | 65        |
| 3.2.3.5      | Discussão dos resultados .....                                     | 67        |
| 3.3          | Análise de preços.....   | 68        |
| <b>3.3.1</b> | <b>Discussão dos Resultados.....</b>                               | <b>72</b> |
| <b>4</b>     | <b>CONCLUSÃO .....</b>   | <b>74</b> |
| <b>5</b>     | <b>Bibliografia.....</b>   | <b>75</b> |
|              | <b>ANEXO A – Dados de PLD horário sombra .....</b>                 | <b>79</b> |
|              | <b>APÊNCIDE A – Manual para alterações no <i>software</i>.....</b> | <b>80</b> |
|              | <b>APÊNDICE B – Artigo publicado no IEEE.....</b>                  | <b>81</b> |



## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, com a intensificação de instalações de geração distribuída e com a evolução nos processos de gestão de carga, o uso de energia elétrica vem passando por muitas transformações. Com o avanço das *microgrids* e das *smartgrids*, que buscam implementar gerenciamento e automatização das cargas e geração, a inserção de muitas novas tecnologias no sistema elétrico, que as redes elétricas atuais ainda não suportam plenamente, torna-se possível. O sistema de gerenciamento de resposta da demanda, que nesse trabalho é chamado de Resposta da Demanda (RD), que é caracterizada pela redução do consumo em blocos e horários específicos, é uma possibilidade de ativo de energia elétrica que trará aos consumidores de energia elétrica maior autonomia sobre o seu consumo de energia, deixando de ser um elemento passivo no mercado de energia elétrica para participar ativamente no futuro do sistema energético (MULLER, 2016).

A RD é uma atividade caracterizada por permitir aos consumidores maior gerenciamento do uso da energia, podendo responder às diferenças de preço de energia e aos comandos do operador do sistema, recebendo pagamentos pela participação. Dentre os benefícios obtidos pela adesão ao mecanismo de RD, são citados: maior flexibilidade e confiabilidade, redução de poder de mercado de geradores, diminuição dos custos com geração, postergação ou anulamento de novos investimentos com a expansão do sistema em novas unidades de geração, transmissão e distribuição, diminuição da volatilidade de preços de energia elétrica e, como fator ambiental, possível redução de emissão de gases de efeito estufa causados pelo acionamento de usinas térmicas.

### 1.1 OBJETIVOS

Nesta seção são apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos deste trabalho.

### 1.2 Objetivo Geral

Estudar a participação em eventos de RD utilizando equipamentos de climatização, do inglês *Heating, ventilation, and air conditioning* (HVAC), para o mercado de energia brasileiro.

### 1.2.1 Objetivos Específicos

- Realizar um estudo das modalidades de Resposta da Demanda existentes no cenário mundial;
- Simular a flexibilidade de carga gerada a partir de variações na temperatura de equipamentos HVAC, considerando conforto térmico e técnicas aplicáveis de RD em estudo de caso;
- Verificar a atratividade econômica para transações no mercado de energia no Brasil.

### 1.2.2 Motivação

O setor elétrico no Brasil está passando por um processo de modernização que envolve os segmentos de geração, transmissão, distribuição e comercialização de energia. Nesse contexto, alguns temas já bem consolidados em outros países estão em discussão no Brasil, para que sejam encontradas maneiras implementá-los, considerando as limitações atuais do setor e as projeções de futuro com a modernização.

Um desses temas ainda inovadores é a Resposta da Demanda, que entrou em alta com o lançamento do Projeto Piloto de Resposta da Demanda do Operador Nacional do Sistema (ONS). A regulamentação para a implementação dessa modalidade no sistema elétrico está em andamento e a operacionalização ainda é bastante complexa, por não existirem, atualmente, casos práticos consolidados para aplicação (ONS, 2018). Tendo em vista que a maneira mais comum de se participar de um evento de RD, que não traz impactos diretos à produção do consumidor, é por meio de mudanças na climatização, este trabalho apresenta estudos de caso de RD de sistemas de climatização de ambientes, levando em consideração todos os fatores energéticos, climáticos, físicos e financeiros que podem influenciar esse resultado.

Esse trabalho foi desenvolvido no contexto de um projeto de pesquisa e desenvolvimento P&D ANEEL, no qual era importante avaliar a possibilidade de participação de clientes selecionados de uma comercializadora de energia em eventos de RD, tanto chamados pelo ONS por meio da agregação de cargas, quanto para estratégias próprias em um modelo de negócio futuro.

### 1.2.3 Metodologia

Primeiramente é realizado um levantamento bibliográfico da RD no cenário nacional e internacional e os conceitos fundamentais dos equipamentos HVAC com foco nos fatores que relacionam temperatura e potência. Em seguida, utiliza-se como ferramenta o *software* livre

*Demand Response Quick Assessment Tool* (DRQAT) desenvolvido e disponibilizado por Berkeley Lab para simulação das estratégias de redução de carga a serem adotadas. Esse *software* foi criado para estratégias de RD de HVAC em cidades dos EUA e Canadá, logo pretende-se estudar o uso do *software*, adaptando sua base de dados com as variáveis climáticas e financeiras brasileiras, partindo da permissão já concedida pelo desenvolvedor para realização de tal modificação (BERKELEY LAB, 2009).

Em seguida, são realizadas simulações a partir de dados reais de consumidores do mercado livre de energia. Os dados obtidos necessários para essa avaliação são: faturas de energia elétrica, especificações dos equipamentos HVAC, dados de consumo, informações de horário de funcionamento e lotação máxima, dados climáticos da região, cargas internas e informações relacionadas ao tipo de edificação. Assim, são estabelecidas estratégias para simulação, variando-se parâmetros de tempo de desligamento e de temperatura, de maneira a relacionar a diminuição da carga e energia não consumida, levando sempre em consideração o conforto térmico estabelecido em norma.

A etapa final do trabalho consiste em, a partir dos dados de carga obtidos nas simulações, estabelecer cenários de precificação e suas consequências para o acionamento da RD, verificando a viabilidade econômica e prática da participação nesses eventos.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

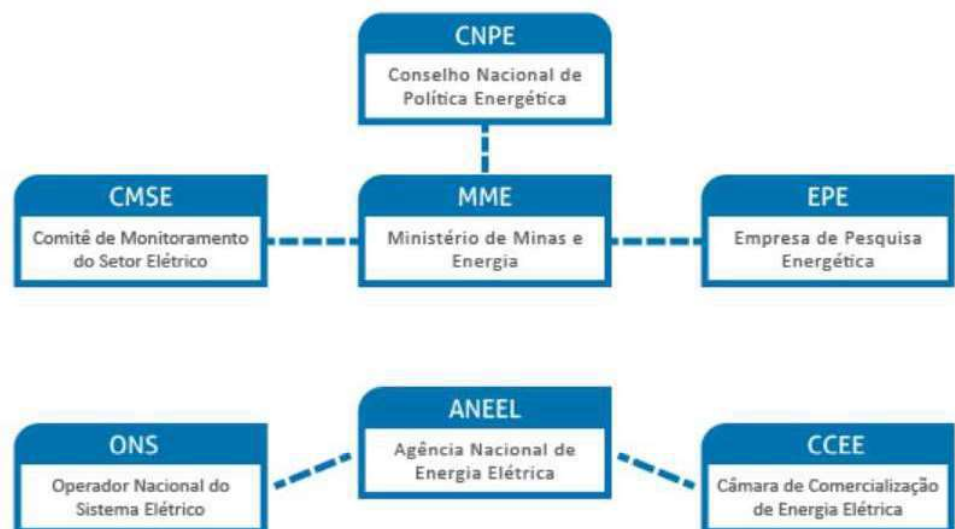
Nessa seção são abordados os temas importantes para o desenvolvimento do trabalho, citando a estruturação dos agentes do setor elétrico, o ambiente de contratação livre de energia, a resposta da demanda no cenário nacional e internacional e os principais fundamentos de estratégias de resposta da demanda em equipamentos HVAC.

### 2.1 Estrutura do Setor Elétrico

O setor elétrico brasileiro tem predominância de matriz hidrelétrica de grande porte e tem como complemento as usinas térmicas. Nos últimos anos, com o aumento expressivo das energias renováveis, têm surgido novos desafios para suprimento de carga e o balanço de potência dentro do sistema. Atualmente, o Sistema Interligado Nacional (SIN) é dividido em quatro submercados: Sul, Sudeste/Centro-Oeste, Nordeste e Norte que são conectados por linhas de alta tensão.

O modelo estrutural do setor elétrico brasileiro é constituído por instituições com funções bem definidas, com governança implantada em 2004 e que ainda vigora em 2021. Essas instituições atuam dentro do SIN regulando, viabilizando e possibilitando as operações e o suprimento de energia dentro do país e suas relações são apresentadas na Figura 1.

Figura 1 – Estruturação dos agentes no setor elétrico brasileiro.



Fonte: (CCEE, 2016)

A estruturação dos agentes é composta por:

- **Conselho Nacional de Política Energética (CNPE):** órgão que assessora a Presidência da República na criação de políticas e diretrizes de energia, visando garantir o abastecimento em todas as áreas do país.
- **Ministério de Minas e Energias (MME):** é responsável por conduzir as políticas energéticas do país, respeitando as diretrizes previamente estabelecidas pelo CNPE.
- **Comitê de Monitoramento do Setor Elétrico (CMSE):** acompanha e avalia a segurança do abastecimento de energia elétrica e está sob coordenação do MME.
- **Empresa de Pesquisa Energética (EPE):** realiza estudos e pesquisas para auxiliar no planejamento do setor energético, sendo vinculada ao MME.
- **Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL):** é uma agência reguladora que fiscaliza a produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia elétrica. Dentre suas atribuições, destaca-se o controle da qualidade do serviço prestado pelas concessionárias e estabelecer as tarifas dos consumidores.
- **Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS):** tem a função de operar, supervisionar e controlar a geração de energia e também administra a rede básica de transmissão de energia elétrica no território nacional.
- **Câmara Comercializadora de Energia Elétrica (CCEE):** é o órgão que viabiliza as atividades de compra e venda de energia no território nacional. É responsável pela contabilização e pela liquidação financeira no mercado de curto prazo.

O setor elétrico brasileiro possui quatro principais segmentos: geração, transmissão, distribuição e comercialização. No contexto desse trabalho, será amplamente referenciada a comercialização de energia, mas para o entendimento completo do funcionamento do setor, é importante esclarecer as características de cada um destes conceitos (CCEE, 2009).

### **2.1.1 Geração**

A geração de energia elétrica abrange as usinas de grande porte que produzem energia elétrica centralizadamente e também inclui a geração descentralizada, por pequenas centrais hidrelétricas, geração distribuída renovável e outros tipos de geração próxima à carga.

### **2.1.2 Transmissão**

Para que a energia gerada nas usinas centralizadas seja levada até o ponto de conexão da distribuidora, é necessário o processo de transmissão de energia. Esse transporte ocorre por meio de linhas de transmissão de alta tensão para que elevadas potências possam ser transmitidas sem perdas ou quedas de tensão acentuadas.

### **2.1.3 Distribuição**

Nessa etapa, a energia recebida pela transmissão passa por subestação abaixadora de tensão e, assim, pode ser distribuída às unidades consumidoras sob a área de concessão da distribuidora.

### **2.1.4 Comercialização**

As relações comerciais no atual modelo são estabelecidas dentro de um mercado regulado e de um mercado livre, com características distintas, tanto entre os agentes envolvidos, quanto nas regras e normas que regem essas transações.

#### **2.1.4.1 Ambiente de contratação regulado (ACR)**

No mercado regulado por meio de leilões são celebrados contratos entre geradores e distribuidoras de energia. Os consumidores finais que estão no mercado regulado não têm a possibilidade de escolher seus fornecedores de energia e podem comprar energia somente da distribuidora local.

#### **2.1.4.2 Ambiente de contratação livre (ACL)**

No mercado livre de energia, consumidores, geradores e comercializadores podem realizar contratos bilaterais de compra e venda de energia, com preços, volumes e duração estabelecidos pelos mesmos. Para isso, é necessário que sejam registrados na CCEE os contratos firmados, para a futura contabilização e liquidação.

Atualmente, para participar do mercado livre de energia, é necessário que o consumidor se enquadre em uma dessas duas modalidades:

- Consumidores especiais: com demanda contratada igual ou superior a 500 kW, podem contratar energia de fontes renováveis, como pequenas centrais hidrelétricas, termelétricas a biomassa, fontes eólicas e fotovoltaicas.
- Consumidores livres: com demanda igual ou superior a 2000 kW, podem contratar energia de qualquer fonte de geração, incluindo grandes usinas hidrelétricas e térmicas.

Nas pautas de modernização do setor elétrico trazidas pela Consulta Pública Nº 33 (MME, 2018) estão enquadradas a redução dos limites para o acesso ao mercado livre de energia nos próximos anos. Esse tópico revela a tendência de aumento desse mercado, o que torna ainda mais relevante a discussão de modelos para engajamento dos consumidores dentro desse ambiente.

#### *2.1.4.2.1 Preço de liquidação de diferenças*

Preço de Liquidação de Diferenças (PLD) é usado para valorar as diferenças de energia apurada no mercado de curto prazo. A Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE) realiza mensalmente o cálculo da média mensal do PLD, por submercado. O cálculo atualmente considera os preços semanais por patamar de carga, ponderado pelo número de horas em cada patamar e em cada semana do mês (CCEE, 2018).

O planejamento de operações ocorre em três modalidades: médio prazo (5 anos), curto prazo (2 meses) e programação diária. A metodologia de cálculo do PLD acompanha esse planejamento sendo utilizados modelos computacionais desenvolvidos pelo Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) dependendo do horizonte: para o médio prazo o modelo NEWAVE, para o curto prazo, o modelo DECOMP e para a programação diária o modelo DESSEM. Esses modelos estão acoplados, ou seja, a saída de um modelo alimenta o seguinte, de forma que, quanto maior o horizonte de tempo, maiores as incertezas e menor o nível de detalhamento.

Até o final de 2020, o PLD era calculado semanalmente em três patamares de carga (leve, médio e pesado), baseando-se nos dados de entrada de oferta, demanda, vazões e

restrições. Esses dados são processados no modelo computacional NEWAVE e DECOMP, gerando o Custo Marginal de Operação (CMO) semanal, que é a base para a definição do PLD.

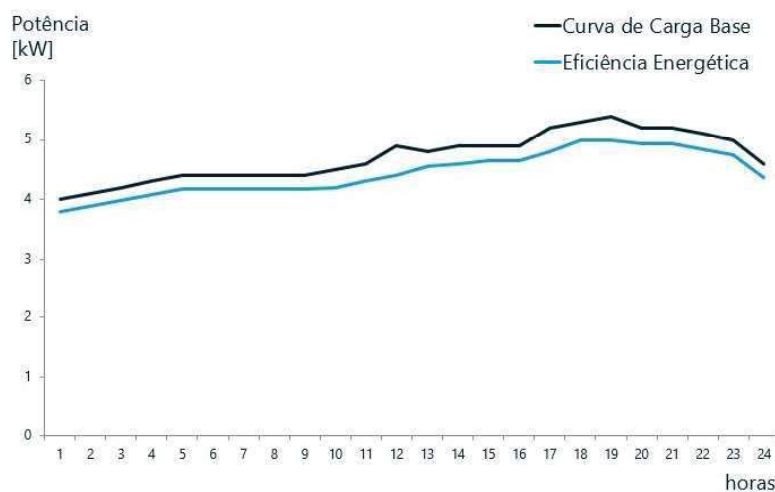
Visando aproximar a formação de preço de curto prazo ao preço de operação do sistema, trazendo maior eficiência ao setor elétrico, a partir de janeiro de 2021 foi implementado o PLD horário, utilizando mais um modelo, o DESSEM, do ONS. Durante os últimos anos foram desenvolvidos estudos sobre a oferta de preço, permitindo uma simulação “sombra” com os modelos computacionais, possibilitando a aplicação dos preços horários. Esses prazos visam a assegurar a previsibilidade na formação de preços em um horizonte de pelo menos 4 anos.

## 2.2 Resposta da Demanda

O termo Resposta da Demanda se define como um conjunto de ações que podem ser tomadas pelo lado do consumidor de energia elétrica em resposta às condições particulares dentro do sistema de elétrico, como períodos de congestionamento da rede ou preços de energia elevados (BRADLEY, LEACH e TORRITI, 2011).

Assim como as medidas de eficiência energética, a RD busca estimular os consumidores a reduzir seu consumo de energia. São diferentes, no entanto, porque a eficiência energética direciona-se a uma diminuição estrutural na demanda, enquanto a resposta da demanda busca uma mudança no comportamento do consumidor, encorajando o deslocamento parcial de seu consumo. Essas diferenças podem ser comparadas na Figura 2 e na Figura 3.

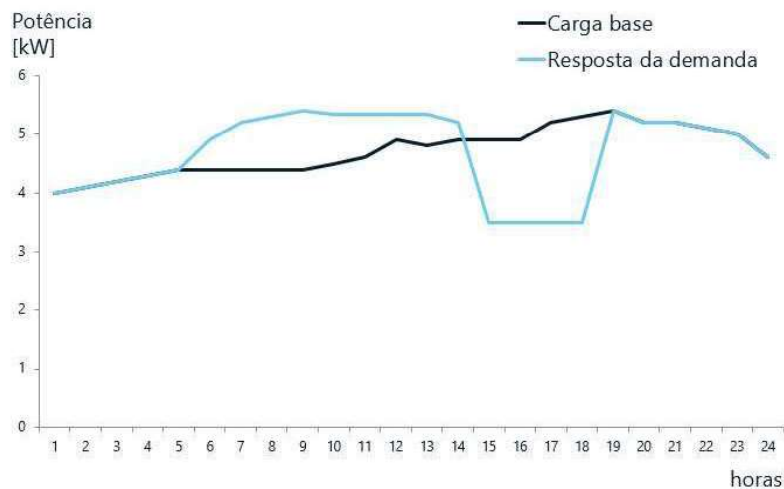
Figura 2 – Eficiência energética para uma curva de carga base ao longo do dia.



Fonte: Elaboração própria.

Figura 3 – Resposta da demanda para uma curva de carga base ao longo do dia.





Fonte: Elaboração própria.

Segundo a EPE (2019), a RD pode ser classificada em dois tipos: baseada em preços e baseada em incentivos. A primeira, refere-se à mudança no perfil de uso da energia devido às alterações no preço ao longo das horas do dia. Assim, o consumidor desloca sua carga, consumindo menos em momentos que o preço está mais alto. No mecanismo de RD baseado em incentivos, os consumidores recebem incentivos financeiros para redução da demanda em momentos críticos no sistema, para garantir a confiabilidade, sendo acionados por meio de uma ordem de despacho do operador.

Dessa maneira, é possível inferir que a entrada dos preços horários no mercado de energia no Brasil pode influenciar a curva de carga do consumidor. Assim, o consumidor terá a possibilidade de deslocar sua curva de carga para horários de menor preço da energia. Os preços horários podem modular as preferências de consumo dos grandes consumidores, sendo mais uma forma de garantir a confiabilidade do sistema.

### 2.2.1 RD no Brasil

No Brasil, esse tema ainda é considerado inovação, e inclusive o termo não é muito conhecido, apesar de o mecanismo já ter ocorrido com outra nomenclatura. Foram registradas duas experiências de programas de RD baseados em preços e uma experiência de RD baseada em incentivos no cenário nacional.

#### 2.2.1.1 RD baseada em preços

Dos mecanismos de RD baseados em preço, a primeira experiência se deu pela da implementação em 1988 da tarifa horo-sazonal (Tarifas Verde e Azul) que aplica tarifas diferenciadas para o consumo de energia elétrica e para a demanda de potência de acordo com as horas do dia e períodos do ano para os consumidores de alta tensão. A segunda experiência se deu pela adoção em 2018 da Tarifa Branca, que se destina a consumidores de baixa tensão e estabelece tarifas diferenciadas de consumo de energia ao longo das horas do dia, segmentada em três postos tarifários.

#### 2.2.1.2 RD baseada em incentivos

O mecanismo de RD baseado em incentivos, que está em evidência atualmente, é o Projeto Piloto Resposta da Demanda do ONS. O programa, que começou em 2018 e está previsto para se estender até junho 2021, tem o objetivo de evitar o despacho fora da ordem de mérito de usinas termelétricas. A princípio, era voltado apenas aos subsistemas Norte e Nordeste, que possuem grande quantidade de geração intermitente e escassez hídrica. Para participar do programa, os consumidores devem fazer ofertas de redução de carga indicando preço, volume e horário e podem receber ordens de despacho no dia anterior ou no mesmo dia, dependendo do produto.

Durante os primeiros dois anos de testes, esse piloto celebrou apenas um contrato e não teve nenhum despacho atendido. As regras para a participação ainda eram muito fechadas, principalmente quanto à variabilidade da curva de carga, à inadimplência no mercado de curto prazo e aos pacotes mínimos de energia, resultando em uma dificuldade para a adesão de consumidores ao programa (CCEE, 2018). De acordo com a experiência obtida nos dois primeiros anos de teste, foi possível perceber que seria necessário flexibilizar as regras de participação para se ter mais ofertas e criar esse mercado de flexibilidade.

Ao final de 2020, as regras foram flexibilizadas para abranger mais consumidores, neste trabalho, e, dentre as melhorias contínuas, destaca-se a ampliação da participação para consumidores de todos os submercados.

### 2.2.2 RD no cenário mundial

A revisão bibliográfica dos tipos de RD existentes em vários países pelo mundo traz diversas modalidades com características bem distintas apropriadas para a realidade política, econômica, ambiental, tecnológica e social da localidade geográfica.

Dentre os mecanismos baseados em preços, são destacados:

• ***Time of use (TOU)*** – Ontario, Canadá

Essa tarifa é dividida em períodos de fora de ponta, ponta intermediária e ponta. Para reproduzir o perfil das usinas despachadas e o padrão de curva de demanda nas estações do ano, as horas de ponta intermediária e ponta são diferentes nos meses de verão e inverno. O programa tem grande adesão entre os consumidores, embora a tarifação seja opcional (POWERSTREAM, 2019).

• ***Critical Peak Pricing (CPP)*** – Califórnia - EUA

Essa tarifa é utilizada pelas principais distribuidoras da Califórnia, onde os *CPP Days* são os dias em que a demanda de energia está muito alta. Para incentivar a redução de consumo entre as 14 h e 18 h desses dias, o valor estabelecido para a tarifa é muito superior à tarifa normal. Durante os outros dias do ano, a tarifa de energia é inferior à tarifa convencional, compensando assim os altos preços nos dias críticos. O programa apresenta bons resultados, com a diminuição da demanda máxima, o que possibilitou maior flexibilidade de energia e diminuiu o número de acionamentos térmicos em horários de ponta (SULLIVAN, 2012).

• ***Peak-Time Rebate (PTR)*** – Maryland

Esse programa é promovido para consumidores que possuem medição inteligente, sendo comparado o consumo nos dias de acionamento com outros dias de fatores climáticos semelhantes. O programa entra em ação quando a demanda prevista de energia tende a alcançar valores muito altos e tem grande adesão dos consumidores, possibilitando alta flexibilidade (BGE, 2014).

• ***Real Time Pricing (RTP)*** – Espanha

Essa tarifação é conhecida como um dos modelos mais avançados de tarifação horária disponível para pequenos e médios consumidores, sendo amplamente utilizado na Espanha. Baseando-se nos mercados diários e intradiários durante o período correspondente, o preço da

eletricidade é calculado para cada dia e hora com base no mercado de energia diário, o que reflete o preço por hora estabelecido entre oferta e demanda no mercado atacadista de energia elétrica.

Os mecanismos baseados em incentivos mais conhecidos são:

• **Mercados de Energia** - PJM

Nesse programa, a RD é ofertada e é despachada por mérito econômico, se for mais viável que outros ativos de geração, estando assim no mercado atacadista de energia concorrendo com outras fontes de geração. Quando ocorre o despacho, o valor da redução é valorado ao comparar seu consumo com uma linha base, calculada a partir dos padrões de consumo de energia para cada dia da semana. Esse foi um dos primeiros tipos de programas de RD criados, mas atualmente, sua eficiência já foi superada por outros programas (PJM, 2017).

• **Programa de Emergência** – ERS - ERCOT

Com o objetivo de garantir a segurança do sistema, evitando que consumidores tenham seu consumo cortado em um horário de demanda máxima de forma involuntária, alguns mercados de energia utilizam a RD como programas de emergência. Nesse mecanismo, para evitar que o sistema tenha uma falha maior, quando ocorre algum evento de emergência no sistema, os consumidores participantes do programa são pagos para ter seu consumo cortado por períodos de dez a trinta minutos (ERCOT, 2011).

• **Mercados de Capacidade** – PJM, Colômbia e França

Como forma de incentivar a existência de capacidade suficiente, como um complemento à receita obtida com a venda de energia, os mercados de capacidade são mecanismos que em geral envolvem o pagamento de uma receita fixa por um prazo determinado, para adequação da geração. Os recursos contratados como capacidade devem entregar energia quando o sistema declara condições de emergência, sendo necessário devolver a receita obtida quando não entregue a energia (PJM, 2017). A participação no mercado de capacidade tem sido a maior fonte de receita entre os tipos de RD no PJM, portanto o programa mais atrativo para os agentes. Na Colômbia, por sua vez, o mecanismo de adequabilidade é baseado em energia: os geradores possuem créditos de energia contratados em leilões de longo prazo e devem gerar um determinado volume de energia em situações críticas de fornecimento. A RD participa desse mecanismo de forma indireta, por meio de contratos em que um agente gerador compra a redução de carga, para compensar a falta de créditos de energia de suas plantas geradoras (PJM, 2019). Na França, o mercado de capacidade é bastante desenvolvido, por meio de um *pool* agregado de consumidores que respondem aos comandos do operador do sistema,

com o principal objetivo de compensar as intermitências das fontes eólicas. O operador do sistema envia sinais de contingenciamento e os agregadores e geradores que participam do mercado de capacidade realizam a resposta à demanda (ENERGY POOL, 2021).

•**Programa de Serviços Ancilares – Alberta**

Os serviços ancilares são prestados ao sistema para suportar as condições de transmissão de energia, como controle de frequência, reserva de potência, reserva de prontidão, suporte de reativos e auto restabelecimento. Nesse programa, os consumidores ou agregadores de carga podem participar do mercado para prestação dos serviços ancilares, ofertando sua RD para regulação de frequência, reserva suplementar e reserva girante. O operador estabelece os critérios técnicos para a participação e define o despacho (BLG, 2017).

•**Interrupção de Cargas – Califórnia**

Esse modelo de RD, que geralmente é ofertado por grandes consumidores e agregadores, consiste em desligar grandes montantes de carga quando acionados em determinado período do dia. Como esses participantes geralmente têm plantas de geração de reserva, a interrupção do abastecimento pelo sistema, mediante o recebimento de descontos no faturamento, costuma ter grande adesão (HANSEN, 2015).

•**Controle Direto de Carga – Jiangsu, China**

Nesse tipo de programa, a distribuidora de energia controla remotamente os equipamentos dos consumidores, reduzindo o consumo conforme a necessidade, por curtos períodos. O consumidor é avisado previamente por mensagem e recebe um valor proporcional à RD entregue. Para difundir esse programa, é necessária a instalação de medidores inteligentes (GE, 2016).

A Figura 4 apresenta os tipos de RD consolidadas no cenário mundial, separando os mercados baseados em preços dos mercados baseados em incentivos.

Figura 4- Tipos de RD consolidadas no cenário mundial



Fonte: Adaptado de (EPE, 2019).

Observa-se que a RD é bastante utilizada em mercados diversos dentro do setor elétrico, podendo ser um ativo importante para a confiabilidade do sistema e também para transações no mercado de energia.

### 2.3 Equipamentos HVAC

A sigla HVAC é derivada do termo em inglês *Heating, Ventilation and Air Conditioning*. Traduzido como Aquecimento, Ventilação e Ar-Condicionado, se refere aos mecanismos básicos dos sistemas de climatização. As funções principais desses equipamentos são:

- Aquecimento (*Heating*): responsável por manter os ambientes aquecidos e a temperatura do ar estável em dias de baixas temperaturas e consequentemente, corrige a umidade relativa máxima do ar.
- Ventilação (*Ventilation*): tem a função de trocar o ar dentro de um ambiente, promovendo a circulação do oxigênio, retirando odores e concentração de gás carbônico.

- Ar-condicionado (*Air conditioning*): Controla a temperatura e filtra o ar dentro de um ambiente.

Os principais equipamentos do tipo HVAC existentes nas edificações são: *chillers, fan coils*, aquecedores e ar condicionado.

### 2.3.1 RD em equipamentos HVAC

Os sistemas HVAC podem ser vistos como um recurso muito relevante para despacho em ações de RD de edificações comerciais, pois representam uma parcela relevante da carga elétrica. Ainda, o efeito de armazenamento térmico dos ambientes internos permite que os sistemas de climatização sejam temporariamente desligados ou reduzido sem impacto imediato para os ocupantes do local. É bastante comum que os sistemas HVAC sejam automatizados, com sistemas de controle e gerenciamento de energia, o que é um ponto primordial para a provisão de uma resposta confiável. O uso de automação elimina a necessidade de interação com um operador do recurso quando ocorre um evento de resposta da demanda (BLUM, 2016).

Em geral, o entendimento do processo que permite a RD em edificações comerciais com sistemas divididos em várias zonas, pode permitir uma melhor previsão do desempenho da resposta sob diversas condições de carga e com diferentes estratégias de implementação. As oportunidades para RD e redução de custos com o controle da demanda de sistemas de climatização instalados em uma determinada edificação variam enormemente com o tipo e a localização geográfica do edifício (BGE, 2014).

Motegi, Piette e Watson (2007) avaliam diversos estudos de RD em edificações. Segundo o relatório, a redução de carga varia, especialmente para estratégias de RD para HVAC, de acordo com vários fatores listados, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1- Fatores que influenciam a RD em equipamentos HVAC.

| Fatores construtivos   | Fatores sistêmicos | Fatores estratégicos    | Fatores climáticos     |
|------------------------|--------------------|-------------------------|------------------------|
| -Uso da edificação     | -Tipo de HVAC      | -Redução de demanda     | -Temperatura do ar     |
| -Tamanho da edificação | -Eficiência        | -Porcentagem de área    | externo                |
| -Tipo de estrutura     | -Tipo de controle  | controlada              | -Umidade do ar externo |
| -Nível de ocupação     | -Comissionamento   | -Duração da interrupção | -Radiação solar        |

Fonte: Adaptado de (MOTEGI, PIETTE e WATSON, 2007).

A redução de carga em equipamentos HVAC deve levar em consideração diversos fatores, como: condição da edificação em que o equipamento se encontra, dos equipamentos usados, da temperatura externa, da capacidade de controle da unidade, entre outros. Além disso, é importante que os ocupantes do local não sintam desconforto significativo que venha inviabilizar a aplicação das estratégias. Baseado nisso, as melhores estratégias de RD são aquelas que atingem as metas de redução de carga enquanto minimizam os impactos negativos aos ocupantes do espaço sendo refrigerado ou ao processo que usa a climatização (MOTEGI, PIETTE e WATSON, 2007).

Neste trabalho, optou-se pelas técnicas listadas na Tabela 2, por serem as mais utilizadas em eventos de RD já consolidados em experiências internacionais, justamente por não exigirem grandes sofisticções de controle para serem aplicadas e apresentarem resultados satisfatórios.

Tabela 2 – Estratégias de Resposta da Demanda para HVAC

| <b>Categoria</b> | <b>Estratégia de RD</b>      | <b>Definição</b>   |
|------------------|------------------------------|--|
| Controle de zona | Ajuste da temperatura global | Aumento dos <i>setpoints</i> de temperatura das zonas para toda a edificação.  |
|                  | Passivo térmico              | Diminuição dos <i>setpoints</i> de temperatura das zonas antes da operação de RD, de forma a armazenar energia de esfriamento na massa da edificação, e aumentar <i>setpoints</i> das zonas para diminuir a demanda do sistema de climatização durante o evento de RD. |

Fonte: (MOTEGI, PIETTE e WATSON, 2007).

Algumas premissas são adotadas em relação à temperatura:

- De acordo com a NR17 do Ministério do Trabalho, a temperatura do ambiente de trabalho onde são executadas atividades intelectuais como nos laboratórios, escritórios, sala de desenvolvimento e projetos deve ficar entre 20 e 23 graus.
- Conforme a norma ABNT NBR 16401-2 (ABNT, 2008), que estabelece condições de conforto térmico, a temperatura dentro do intervalo de 1h não pode oscilar mais do que 2°C. Segue:

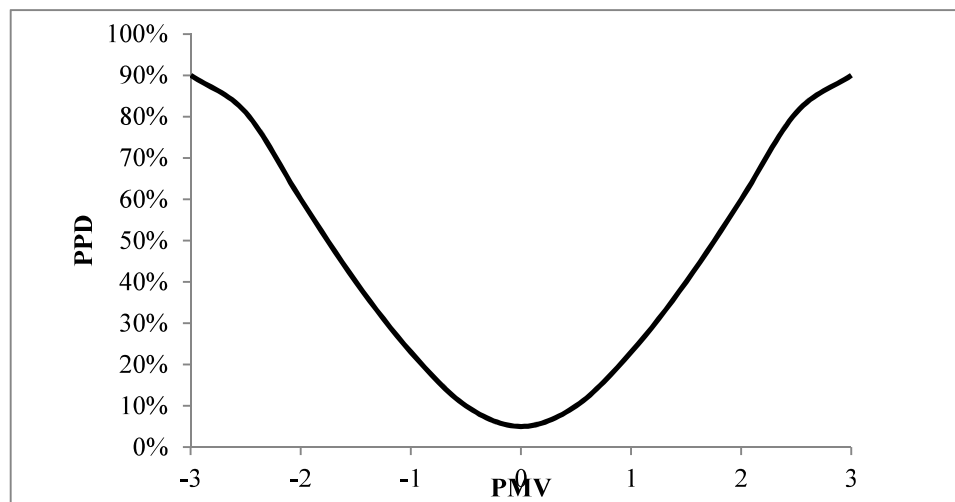
4.2.1.4 Flutuação da temperatura - Quando a temperatura varia em ciclos curtos (de menos de 15 min.) a taxa de variação não deve ultrapassar 2° C por hora. Não há restrições para variações da temperatura se a amplitude do ciclo for de 1°C ou menos. - As rampas



de temperatura (variações contínuas, não cíclicas), passivas ou intencionais, não devem ser maiores que  $0,5^{\circ}\text{C}$  por hora, sendo que a temperatura final resultante não deve estar fora da faixa de conforto estipulada em mais de  $0,5^{\circ}\text{C}$ , nem permanecer neste nível por mais de uma hora.

Segundo Pinto (2014), o conforto térmico do ambiente é mensurado por meio de índices como Porcentagem de Pessoas Insatisfeitas (PPD) e Voto Médio Estimado (PMV), com o objetivo de caracterizar a sensação térmica do usuário. PMV é o índice que indica a satisfação e a insatisfação do ambiente na escala sétima de ASHRAE<sup>1</sup>, classificando o desconforto térmico por temperatura baixa ou elevada. PPD é o índice que, relacionado ao PMV, indica a porcentagem de pessoas insatisfeitas termicamente com o ambiente, variando a classificação entre “muito quente” e “muito frio”. Na Figura 5 observa-se a curva da variação do índice PPD em função do índice PMV.

Figura 5 - Relação entre os índices PMV e PPD de conforto térmico.



Fonte: (PINTO, 2014).

---

<sup>1</sup> Escala sétima de ASHRAE – é uma escala simétrica ao ponto “0” (neutro) para mensurar o conforto térmico. Os valores da escala são: 1 (levemente quente), 2 (quente) e 3 (muito quente), -1 (frio), -2 (levemente frio) e -3 (muito frio).

Observa-se que quanto mais longe do zero estiver o PMV, maior a porcentagem de pessoas insatisfeitas com a temperatura. Assim, busca-se que o ambiente não esteja muito quente ou muito frio. Os gráficos gerados nas simulações serão analisados e estão tabelados juntamente com os resultados das simulações.

Os cronogramas elaborados para RD levam em conta as particularidades das unidades consumidoras participantes, visando garantir o conforto térmico estabelecido em norma, sendo uma atividade aplicável ao consumidor em questão. Mesmo nas estratégias mais arrojadas a serem adotadas, espera-se levar em consideração os resultados dos índices PMV e PPD, para não haver desconforto excessivo, ponderando-se, assim, quão agressivas poderão ser as medidas tomadas.

### 3 DESENVOLVIMENTO

Esta seção apresenta o desenvolvimento deste trabalho, seguindo a sequência na qual ocorreram as pesquisas e os estudos de caso. Primeiramente, é apresentado o *software* de simulação utilizado e suas principais características. Em seguida, traz-se os estudos de caso, cada um contendo as estratégias adotadas, os resultados e uma discussão de cada um deles. Após isso, é feita uma análise de preços com os resultados obtidos e uma nova discussão no sentido de concluir o trabalho.

#### 3.1 *Software* de simulação DRQAT

O *software* escolhido para as simulações de RD de equipamentos HVAC foi desenvolvido pelo Centro de Pesquisa de Resposta da Demanda do Berkeley Lab, denominado *Demand Response Quick Assessment Tool* (DRQAT). Essa ferramenta permite a simulação de estimativas de redução de demanda, assim como da economia associada às estratégias, o impacto no conforto térmico e na temperatura final, entre outras características.

Este *software* foi desenvolvido tendo como dados de entrada previamente definidos os arquivos climáticos do Canadá e Estados Unidos, que, além de terem dados climáticos diferentes do Brasil, também têm estações do ano contrárias. Entrando em contato com os desenvolvedores do *software*, que é gratuito e tem objetivo institucional acadêmico, foi obtida a autorização para se alterar os parâmetros no código fonte, atualizando os dados de clima para arquivos do Brasil. Também foram alterados parâmetros de localização e de sazonalidade, conforme pode ser visto no Apêndice A.

Para a simulação dos cenários e estratégias de RD, foram inseridos no *software* DRQAT diversos parâmetros de caracterização dos ambientes, que consideravam tanto fatores internos como o tipo de equipamento e a disposição das janelas, quanto fatores externos, como os fatores climáticos. As entradas utilizadas são listadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Variáveis de entrada no *software*.

| Entrada                  | Descrição   |
|--------------------------|---|
| Localização              | Inserir o CEP da planta.  |
| Arquivos climáticos      | A partir do CEP, é buscado o arquivo de clima <i>.epw</i> relacionado |
| Tipo de equipamento HVAC | Selecionar entre <i>Water cooled, air cooled, ice tank</i>            |
| Distância das janelas    | Inserir posição da climatização em relação às janelas                 |
| Cronograma               | Horários e estado ligado/desligado                                    |
| Linha base               | Temperaturas ajustadas normalmente                                    |
| Estratégia RD            | Temperaturas ajustadas para a RD                                      |
| Área                     | Área do ambiente a ser simulado                                       |
| Ocupação                 | Número de pessoas ocupando o local durante os horários de RD          |

Fonte: Elaboração própria.

Os arquivos climáticos em formato *epw* foram obtidos no site do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações da UFSC (LABEEE, 2012). O *software* retorna como saída dados de potência, energia e conforto térmico alcançados durante a redução de carga, para períodos selecionados.

O *software* apresenta os dados em temperatura na escala Fahrenheit e não foi possível mudar a interface para Celsius. Para facilitar a visualização, as estratégias serão apresentadas nas tabelas na escala Celsius (°C) e Fahrenheit (°F).

### 3.2 Estudos de caso

Nesta seção serão apresentadas as plantas que foram alvo desse estudo de caso. O conjunto amostral desse trabalho consiste em 3 instalações abastecidas na alta tensão, sendo: 1 hotel, 1 *data center* e 1 centro universitário. Os locais foram escolhidos dentro do contexto do P&D ANEEL, sendo que os consumidores avaliados foram selecionados pela empresa responsável pelo projeto para participarem do estudo. Foram feitas visitas técnicas a cada uma das instalações para entendimento da climatização dos ambientes, entrevista com a equipe de engenharia local e avaliação das faturas de energia, plantas da edificação e diagramas unifilares. As informações relevantes para este estudo referentes a cada uma das instalações serão mostradas nas seções a seguir.

#### 3.2.1 Hotel

O primeiro caso estudado nesse trabalho foi de um hotel no interior de São Paulo, com custo médio mensal com energia elétrica de aproximadamente R\$ 165 000,00 e a demanda máxima registrada no período anual 650 kW.

Para esta edificação, foram analisados todos ambientes que poderiam ter sua carga flexibilizada separadamente, pelo horário de funcionamento e lotação de pessoas, buscando

seguir as normas para o conforto térmico. Após visita técnica e entender as particularidades e necessidades dos ocupantes, foi decidido que dentre os ambientes do hotel, duas zonas seriam aptas a atender redução de carga no ar condicionado, sendo elas um centro de convenções e um amplo espaço de estudos. Foi decidido junto às equipes responsáveis pelo projeto que as estratégias deveriam garantir pelo menos 50% de satisfação dentro dos ambientes, para que fosse possível a implementação sem grandes prejuízos ao conforto térmico. É importante ressaltar que as estratégias adotadas nesta análise são caráter bastante conservador, buscando não interferir significativamente no conforto térmico.

A Tabela 4 apresenta os dados de área, ocupação e potência dos equipamentos HVAC para as zonas selecionadas para simulação nessa planta.

Tabela 4 – Divisão dos ambientes para aplicação de estratégias de RD.

| Ambiente                      | Área aproximada (m <sup>2</sup> ) | Porcentagem em relação à área climatizada total do edifício (%) | Ocupação em pessoas | Potência de Ar Condicionado (kW) |
|-------------------------------|-----------------------------------|---|---------------------|----------------------------------|
| Zona 1 (Centro de Convenções) | 300                               | 4   | 500                 | 70                               |
| Zona 2 (Ambiente de Estudos)  | 500                               | 10  | 400                 | 120                              |

Os cronogramas de estratégias a serem aplicadas estão listados na Tabela 5.

Tabela 5 – Cronograma de RD para HVAC em Hotel.

| Ambientes        | Horários de ar condicionado ligado | Estratégia 1  | Estratégia 2  | Estratégia 3   |
|------------------|------------------------------------|---|---|--|
| Zona 1<br>Zona 2 | 7 às 23h                           | -Passivo Térmico: diminuir a temperatura para 21°C (69,8°F) das 10h às 13h. Ajuste linear de temperatura: -Aumentar a temperatura em 1°C por hora a partir das 13h, chegando em 27°C (80,6°F) às 19h. Depois retornar suavemente ao <i>setpoint</i> , diminuindo 2°C por hora.<br>- Aumentar o <i>setpoint</i> da água gelada para 9°C (48,2°F) às 15h. | -Aumentar gradativamente o <i>setpoint</i> de temperatura a partir de 16h.<br>- Desligar o equipamento às 18h.<br>- Ligar às 18h diminuindo gradativamente a temperatura (caso necessária a utilização do ambiente) | - Desligar o <i>chiller</i> às 20h e manter desligado, aumentando a temperatura para 24°C (75,2°F). A RD efetuada será das 20h às 21h. |

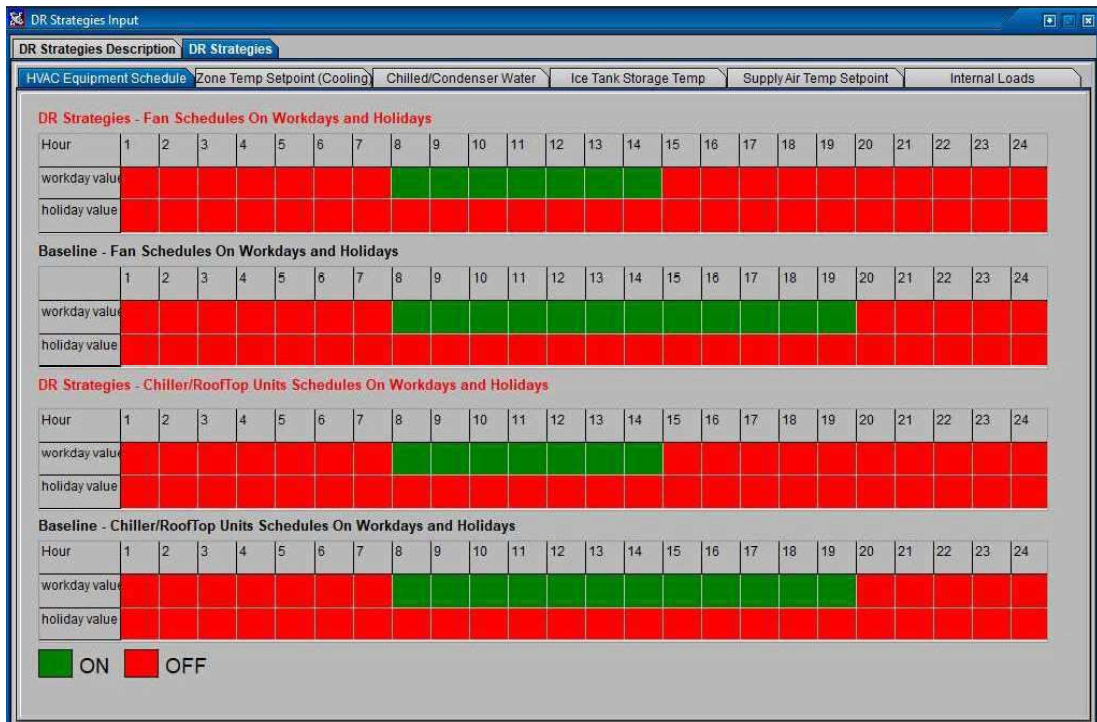
O controle de temperatura nessa edificação é feito manualmente e individualizado nos quartos do hotel. Por esse motivo, os mesmos não foram considerados para eventos de RD, pois essa medida se tornaria desconfortável para os hóspedes, afetando diretamente a atividade principal da empresa.

Os resultados obtidos nas simulações foram compilados em tabelas e gráficos, a partir dos quais se apresenta a diferença em energia entre a estratégia adotada e a linha base inserida e os indicadores de conforto térmico.

### 3.2.1.1 Estratégia 1

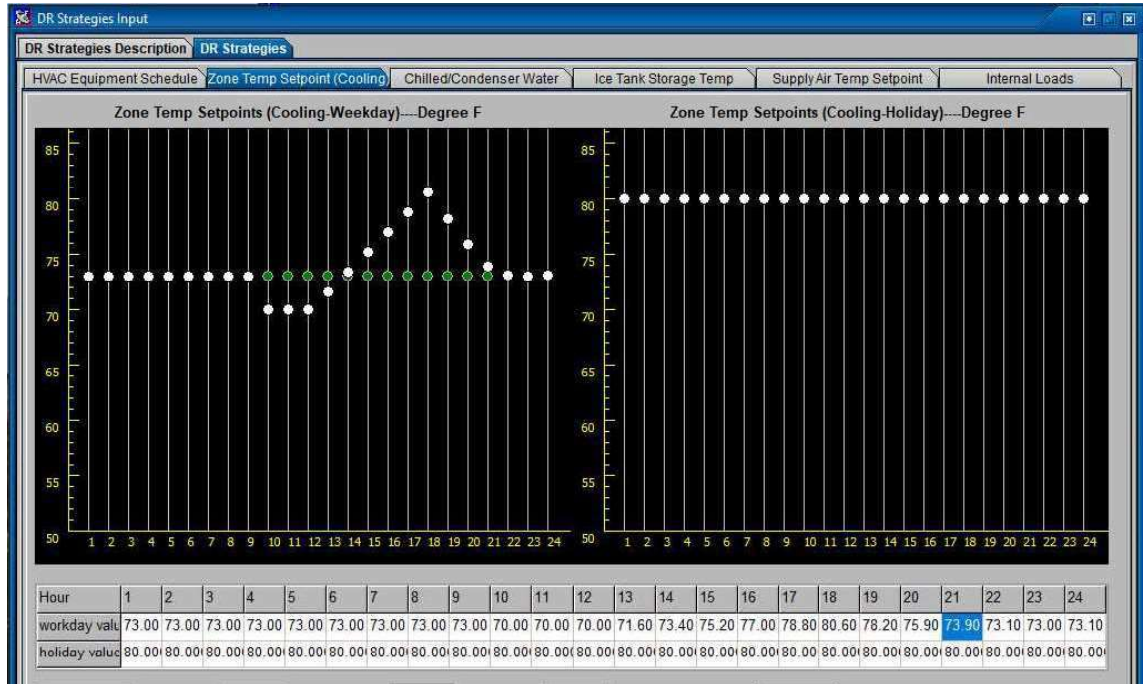
O cronograma da Estratégia 1 é apresentado na Figura 6, o *setpoint* da temperatura da zona na Figura 7 e o *setpoint* da água gelada na Figura 8.

Figura 6 - Cronograma da Estratégia 1 para equipamentos HVAC.



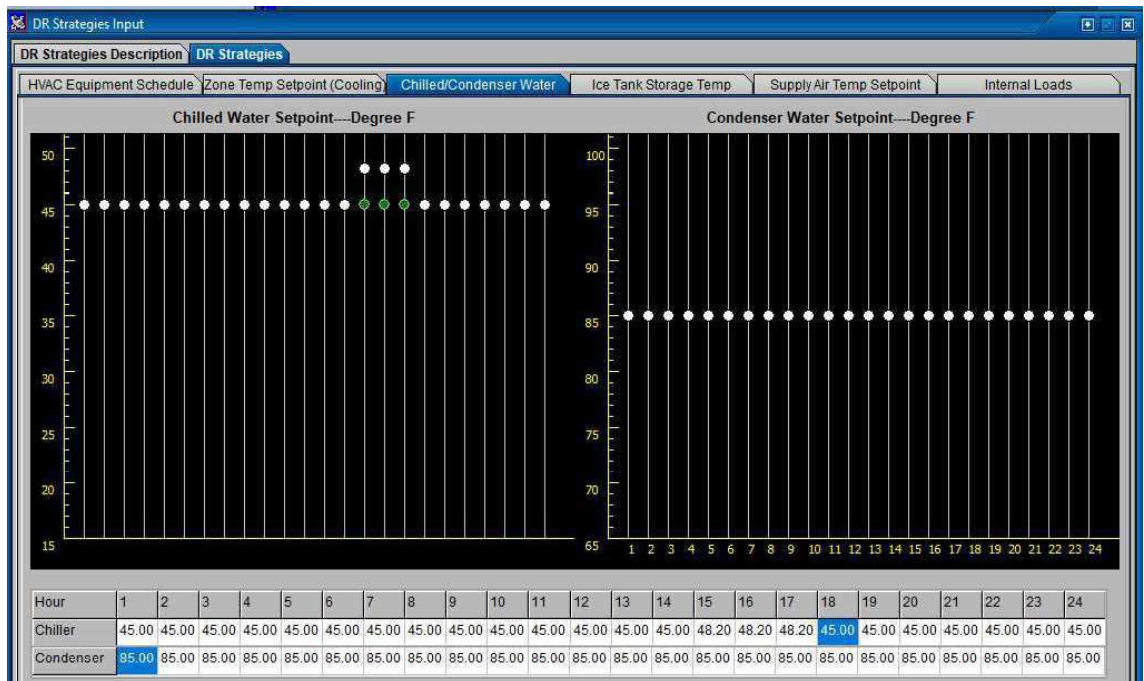
Fonte: DRQAT.

Figura 7 - Estratégia 1: *setpoint* da temperatura da zona.



Fonte: DRQAT.

Figura 8 - Estratégia 1: *setpoint* da temperatura da água gelada.



Fonte: DRQAT.

A Tabela 6 apresenta os resultados em RD para cada evento em flexibilidade de carga e energia total.

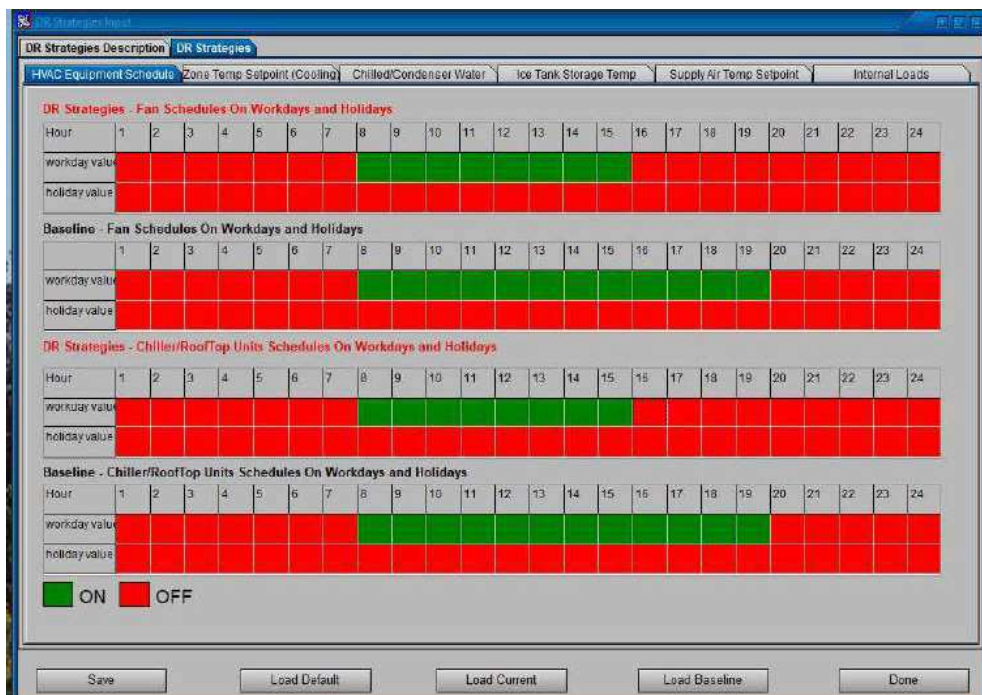
Tabela 6 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 1.

| Meses            | Resultados para o período máximo de 5h | Zona 1 | Zona 2 | Total em kW | Total em kWh (produto de 5h) |
|------------------|--|--------|--------|-------------|------------------------------|
| Outubro a março  | Redução de carga (kW)                  | 70     | 40     | 110         | 550                          |
| Abril a setembro | Redução de carga (kW)                  | 60     | 34     | 94          | 470                          |

### 3.2.1.2 Estratégia 2

O cronograma da Estratégia 2 é apresentado na Figura 9, o *setpoint* da temperatura da zona na Figura 10 e o *setpoint* da temperatura da água gelada na Figura 11.

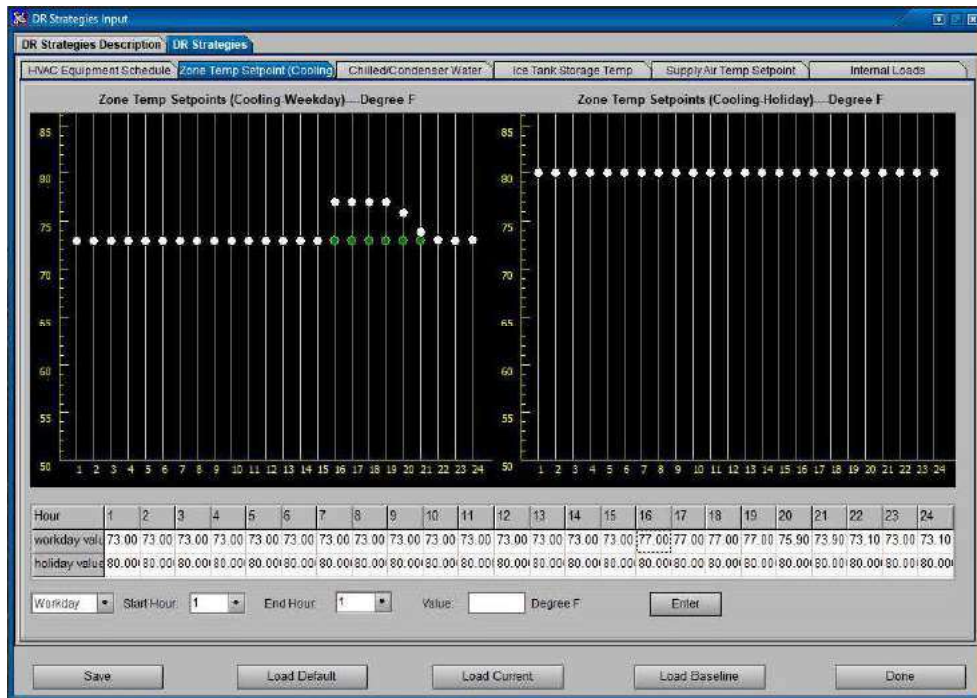
Figura 9 - Cronograma da Estratégia 2 para equipamentos HVAC.



Fonte: DRQAT.

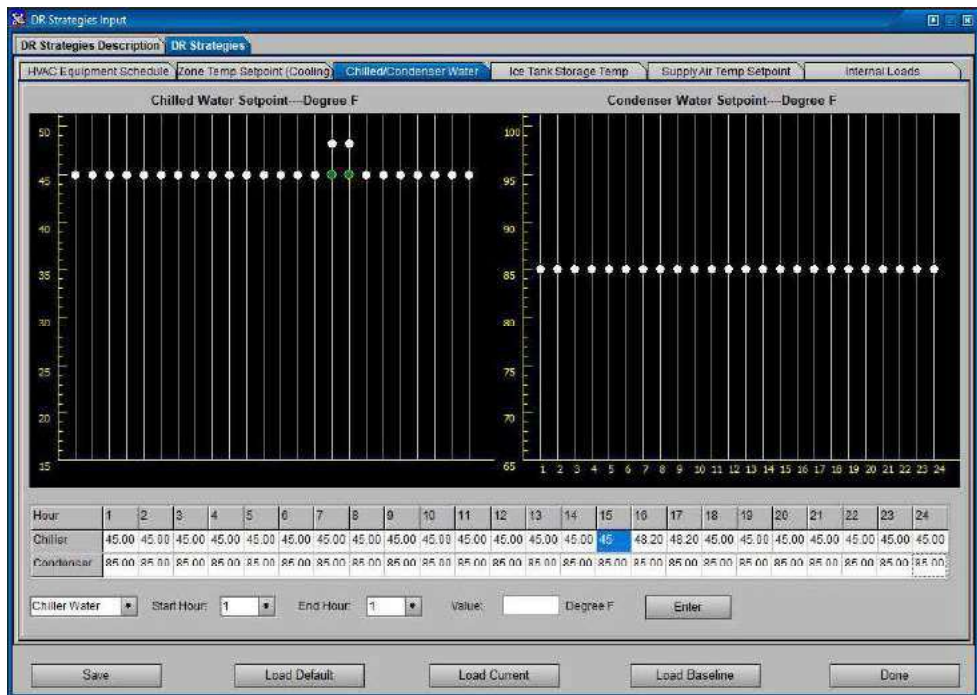


Figura 10 - Estratégia 2: setpoint da temperatura da zona.



Fonte: DRQAT.

Figura 11 - Estratégia 2: setpoint da temperatura da água gelada.



Fonte: DRQAT.

A Tabela 7 apresenta os resultados em RD para cada evento em flexibilidade de carga e energia total.

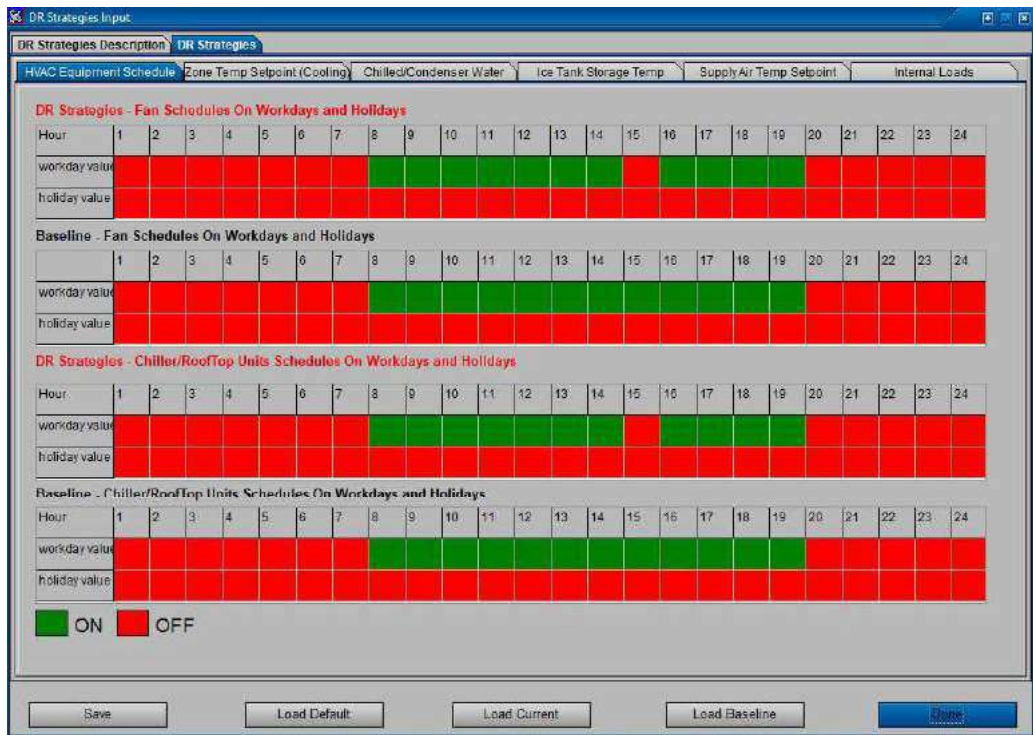
Tabela 7 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 2.

| Meses            | Resultados para o período máximo de 3h | Zona 1 | Zona 2 | Total em kW | Total em kWh (produto de 3h) |
|------------------|--|--------|--------|-------------|------------------------------|
| Outubro a março  | Redução de carga (kW)                  | 75     | 45     | 120         | 360                          |
| Abril a setembro | Redução de carga (kW)                  | 60     | 36     | 96          | 288                          |

### 3.2.1.3 Estratégia 3

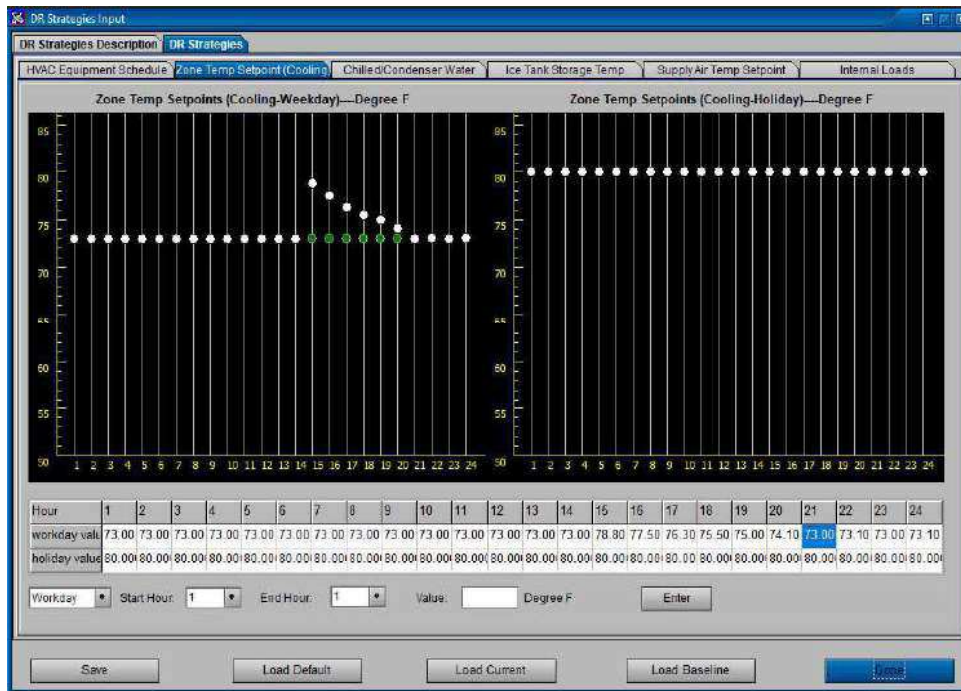
O cronograma da Estratégia 2 é apresentado na Figura 12, o *setpoint* da temperatura da zona na Figura 13 e o *setpoint* da temperatura da água gelada na Figura 14.

Figura 12 - Cronograma da Estratégia 3 para equipamentos HVAC.



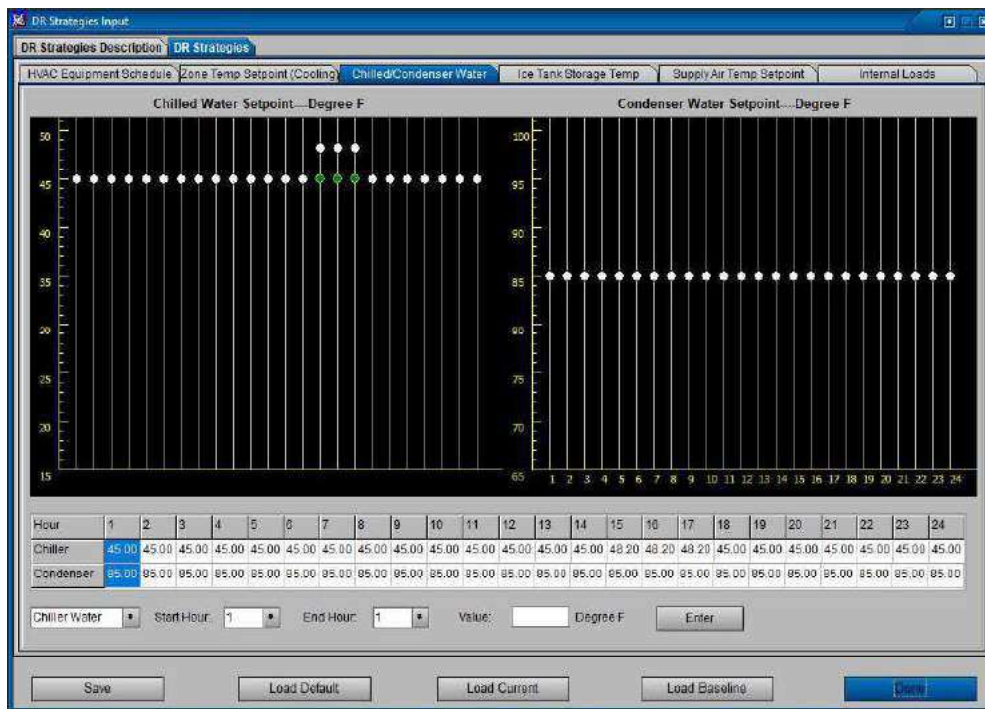
Fonte: DRQAT.

Figura 13 - Estratégia 3: *setpoint* da temperatura da zona.



Fonte: DRQAT.

Figura 14 - Estratégia 3: *setpoint* da temperatura água gelada.



Fonte: DRQAT.

A Tabela 8 apresenta os resultados em RD para cada evento em flexibilidade de carga e energia total.

Tabela 8 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 3.

| <i>Meses</i>     | <i>Resultados para o período máximo de 1h</i> | <i>Zona 1</i> | <i>Zona 2</i> | <i>Total em kW</i> | <i>Total em kWh (produto de 1h)</i> |
|------------------|---|---------------|---------------|--------------------|-------------------------------------|
| Outubro a março  | Redução de carga (kW)                         | 60            | 34            | 94                 | 94                                  |
| Abril a setembro | Redução de carga (kW)                         | 52            | 28            | 80                 | 80                                  |

### 3.2.1.4 Compilação dos resultados

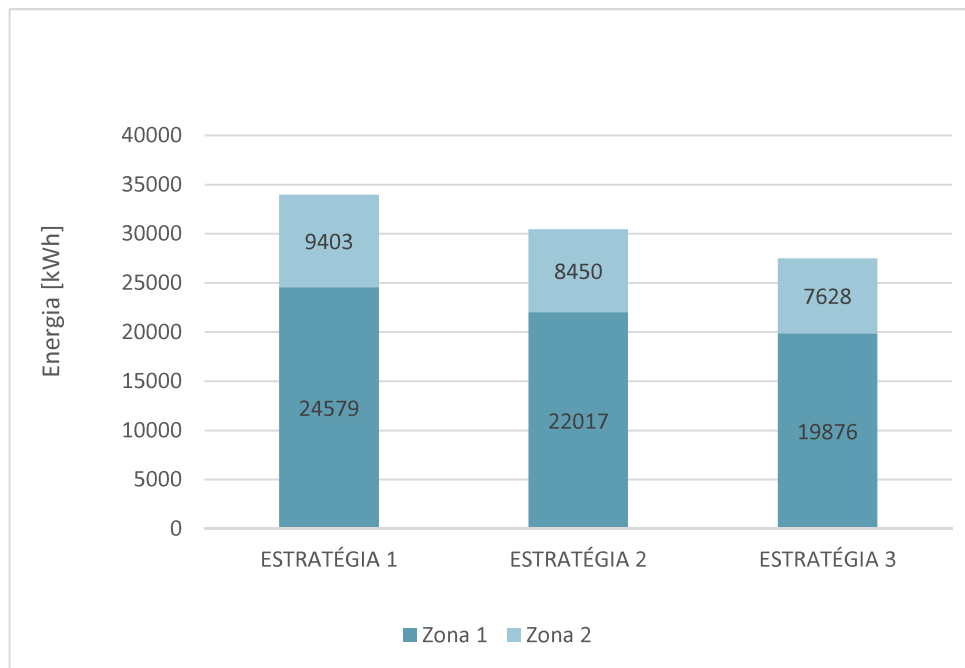
Para a comparação dos resultados obtidos, a Tabela 9 apresenta os dados em energia em todas as simulações efetuadas, para todas as estratégias e para todas as zonas. Os resultados consideram que a RD ocorre em todos os dias de semana (de segunda a sexta-feira) e agregam mensalmente a quantidade de energia que se deixou de consumir na estratégia dada.

Tabela 9 – Resultados mensais em energia flexível para cada zona e estratégia em kWh no hotel.

| Mês       | Zona 1       |              |              | Zona 2       |              |              |
|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|           | Estratégia 1 | Estratégia 2 | Estratégia 3 | Estratégia 1 | Estratégia 2 | Estratégia 3 |
| Janeiro   | 2562,75      | 1736,52      | 1736,52      | 952,976      | 881,742      | 717,857      |
| Fevereiro | 2140,75      | 1494,31      | 1346,4       | 821,577      | 801,577      | 671,577      |
| Março     | 2408         | 1664,82      | 1504,02      | 916,22       | 716,52       | 760,22       |
| Abril     | 1536,25      | 1117,09      | 889,112      | 643,601      | 624,65       | 500,601      |
| Maio      | 1781,25      | 1225,46      | 975,042      | 699,702      | 652,73       | 548,702      |
| Junho     | 1641,25      | 1167,84      | 925,796      | 659,077      | 605,045      | 510,077      |
| Julho     | 1814         | 1267         | 1039,36      | 717,857      | 698,857      | 560,857      |
| Agosto    | 1746,75      | 1208,54      | 981,072      | 707,589      | 673,589      | 557,589      |
| Setembro  | 1547,25      | 1060,64      | 971,053      | 619,792      | 600,792      | 490,792      |
| Outubro   | 2563,5       | 1782,75      | 1606,53      | 949,256      | 902,256      | 798,256      |
| Novembro  | 2496,75      | 1695,81      | 1532,83      | 945,833      | 915,833      | 752,827      |
| Dezembro  | 2341,25      | 1607,71      | 1443,55      | 769,941      | 843,47       | 789,732      |

Com os dados obtidos em todas as simulações, os valores foram agrupados para se ter uma estimativa anual de redução de consumo por resposta da demanda. A Figura 15 apresenta os resultados anuais em energia entregue por RD para cada estratégia e separado por zonas, considerando que esses eventos ocorram apenas em dias de semana, com os valores arredondados para baixo.

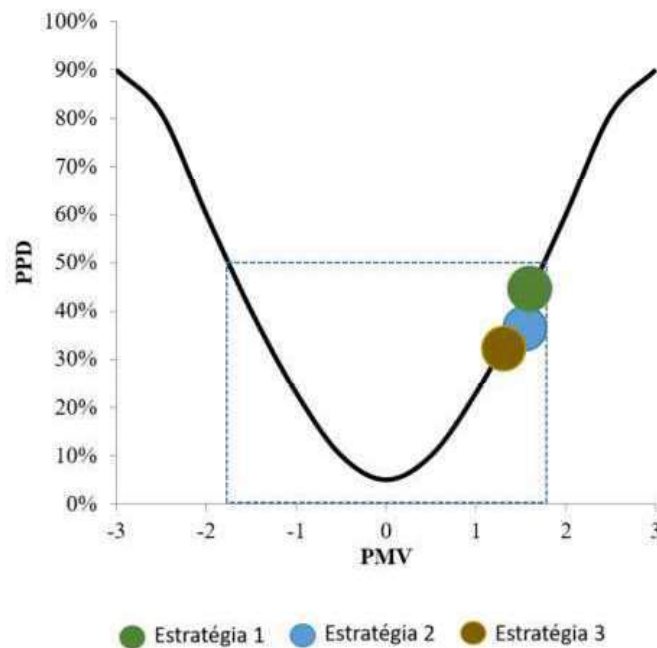
Figura 15 – Total de energia flexível anual para cada zona e para cada estratégia.



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados em conforto térmico foram apresentados no *software* para cada dia simulado, mas para melhor compreensão dos resultados, verificou-se o maior pico do índice PMV (Voto Médio Estimado) em todo o período simulado, visto que esses índices não variavam significativamente com os dias, e sim com as estações do ano. Na Figura 16 são apresentados esses valores.

Figura 16 – Resultados médios em conforto térmico para cada estratégia simulada.



Fonte: Elaboração própria.

É possível observar que para todas as estratégias, o conforto térmico manteve-se em um nível tal que no máximo metade das pessoas no ambiente estariam insatisfeitas, o que ficou dentro das premissas estabelecidas.

### 3.2.1.5 Discussão dos resultados

Observa-se pelos resultados que a Estratègia 1, que considera o armazenamento de energia na massa térmica apresenta os melhores resultados em energia para essa edificação e a Estratègia 3, apresenta a menor redução de carga, apesar de eliminar a curva de religamento dos equipamentos. Isso ocorre principalmente pelo período em que dura a redução de carga em cada uma das estratégias.

Entretanto, mesmo tendo economias maiores que as outras estratégias apresentadas, a redução ainda está aquém do esperado, por ser uma medida bastante conservadora. Para que a diferença medida seja significativa, espera-se aplicar ações mais eficientes, como aumentar o *setpoint* da temperatura até um limite máximo de conforto térmico. Sendo o evento de RD algo pontual e não rotineiro, existe a possibilidade de promover alterações maiores na temperatura sem que exista a percepção de desconforto.

### 3.2.2 Data center

Neste caso, é estudada a RD em uma unidade de *datacenters* na Grande São Paulo, sendo um segmento no qual a climatização é crucial. O custo médio mensal com energia elétrica é de aproximadamente R\$ 220 000,00 e a demanda máxima de 500 kW. Após visita técnica e entendimento das necessidades e das particularidades da edificação e dos ocupantes, decidiu-se por simular RD em equipamentos HVAC apenas nas áreas comuns e estações de trabalho, onde a função da climatização é apenas garantir o conforto térmico dos usuários.

O edifício é refrigerado por 3 *chillers* a água gelada. Nas áreas comuns, os *chillers* estão conectados em série aos *fan coils*. Conseqüentemente, caso ocorra o desligamento da climatização, a ventilação da zona também é desligada.

De acordo com o diagrama unifilar e as plantas da edificação, definem-se ambientes agrupados para aplicação das estratégias na Tabela 10.

Tabela 10 – Divisão dos ambientes para aplicação de estratégias de RD.

| <b>Ambiente</b>               | <b>Área aproximada (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Porcentagem em relação à área climatizada total do edifício (%)</b> | <b>Ocupação em pessoas</b> | <b>Potência de Ar Condicionado (kW)</b> |
|-------------------------------|--|--|----------------------------|---|
| Zona 1 (Refeitório)           | 175,0                                  | 8  | 100                        | 50,0                                    |
| Zona 2 (Sala de reuniões)     | 58,0                                   | 2  | 30                         | 20,0                                    |
| Zona 3 (Estações de trabalho) | 182,0                                  | 5  | 90                         | 60,0                                    |

A ocupação dos ambientes e o uso de ar condicionado se dá em maior representatividade no horário comercial do prédio, de 8 h às 19 h. Nos outros horários, embora funcione 24 h, o fluxo de pessoas é menor e a necessidade de uso de climatização nas áreas comuns também. Através de uma análise dos usos de cada ambiente, foi possível definir o cronograma listado na Tabela 11.

A Estratégia 1 foi definida para o caso de haver participação no Piloto de Resposta da Demanda do ONS, em que é registrada uma flexibilidade de 5 horas. Para que essa RD seja possível sem prejudicar demasiadamente o conforto térmico, é necessário a utilização da técnica de passivo térmico horas antes do evento, utilizando a massa térmica para resfriar o ambiente, com um deslocamento parcial da carga.

Para atender essas especificações, a Estratégia 2 apresenta o limite de horas que se pode entregar RD, garantindo conforto térmico sem necessidade de armazenar passivo térmico previamente, ou seja, realizando apenas o corte efetivo, sem deslocamento de carga.

A Estratégia 3 consiste em um melhoramento da anterior do ponto de vista do conforto térmico, estabelecendo um período de apenas 1 h para o evento de RD.

Foi decidido junto às equipes responsáveis pelo projeto que as estratégias deveriam garantir pelo menos 50% de satisfação dentro dos ambientes, para que fosse possível a implementação sem grandes prejuízos ao conforto térmico.

Tabela 11 – Cronograma de RD para HVAC para o Data Center.

| Ambientes                  | Horários de ar condicionado ligado | Estratégia 1  | Estratégia 2  | Estratégia 3  |
|----------------------------|------------------------------------|---|---|---|
| Zona 1<br>Zona 2<br>Zona 3 | 8 às 19h                           | <p>- Passivo Térmico: diminuir a temperatura para 21°C (69,8°F) das 10h às 12h. Ajuste linear de temperatura:</p> <p>- Aumentar a temperatura em 1°C por hora a partir das 12h, chegando em 27°C (80,6°F) às 18h. Depois retornar suavemente ao <i>setpoint</i>, diminuindo 2°C por hora.</p> <p>- Aumentar o <i>setpoint</i> da água gelada para 9°C (48,2 °F) às 15h.</p> | <p>- Aumento exponencial do <i>setpoint</i> de temperatura para 25°C (77 °F) às 16h e mantendo essa temperatura das 16h às 19h.</p> <p>- Aumentar o <i>setpoint</i> da água gelada para 9°C (48,2 °F) às 16h.</p> | <p>- Aumento exponencial do <i>setpoint</i> de temperatura para 26°C (78,8 °F) às 15h e mantendo essa temperatura das 15h às 16h.</p> <p>- Aumentar o <i>setpoint</i> da água gelada para 9°C (48,2 °F) às 15h.</p> |

Foram considerados, nessa análise, ambientes de reuniões, refeitórios e ambientes de estudo, sendo desconsiderados os locais onde os o resfriamento dos equipamentos eletrônicos seja crucial para a atividade da empresa.

As estratégias adotadas nessa análise vão do nível conservador até um nível mais radical, variando na escala sétima ASHRAE entre -1.5 e 2.5, garantindo, assim, que as consequências das medidas tomadas não tornem o ambiente muito quente.



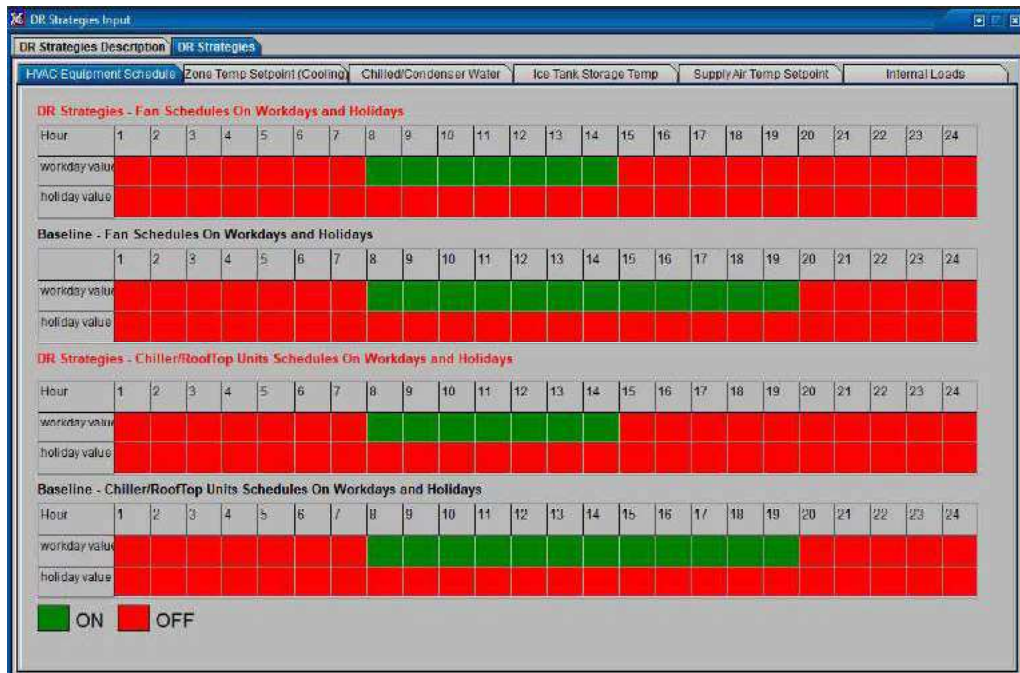
Nesta seção é apresentada a implementação de cada estratégia no programa, inserindo cronogramas e *setpoints* de temperatura para sistemas *water cooled*. Primeiramente são mostrados os resultados de dados individuais para cada estratégia e, em seguida, uma compilação para comparação dos valores em energia e conforto térmico, para cada mês do ano e para cada ambiente analisado.

### 3.2.2.1 Estratégia 1

O cronograma da Estratégia 1 é apresentado na

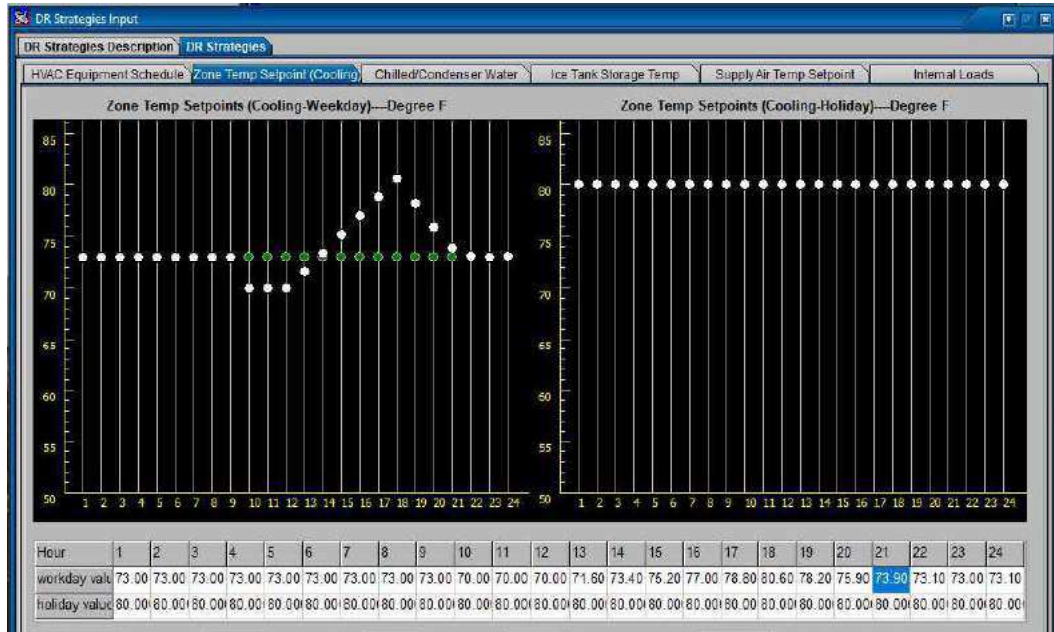
Figura 17, o *setpoint* da temperatura da zona na Figura 18 e o *setpoint* da água gelada na Figura 19.

Figura 17 - Cronograma da Estratégia 1 para equipamentos HVAC.



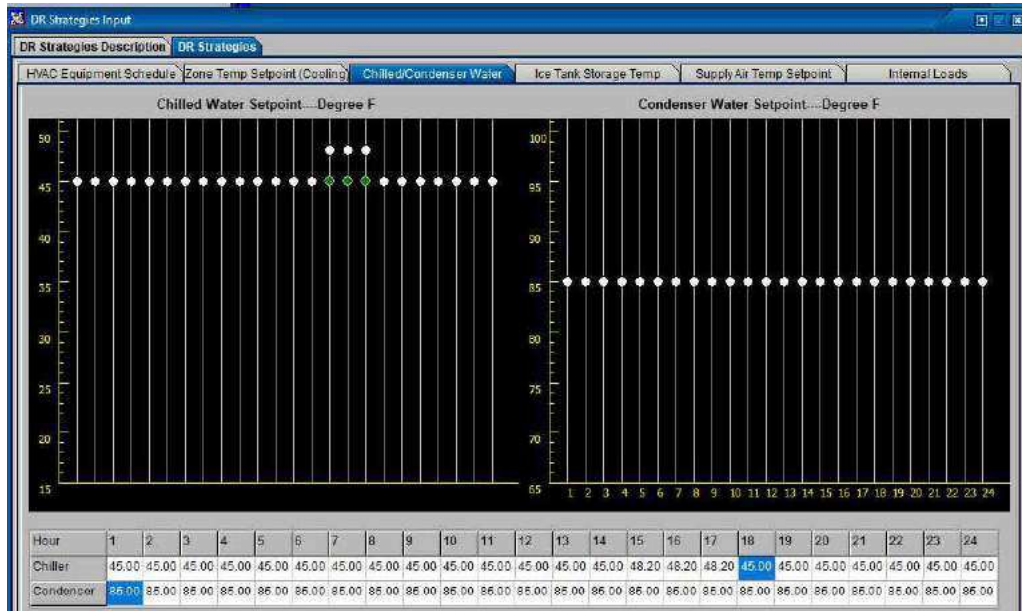
Fonte: DRQAT.

Figura 18 - Estratégia 1: *setpoint* da temperatura da zona.



Fonte: DRQAT.

Figura 19 - Estratégia 1: *setpoint* da temperatura da água gelada.



Fonte: DRQAT.

A Tabela 12 apresenta os resultados em RD para cada evento em flexibilidade de carga e energia total.

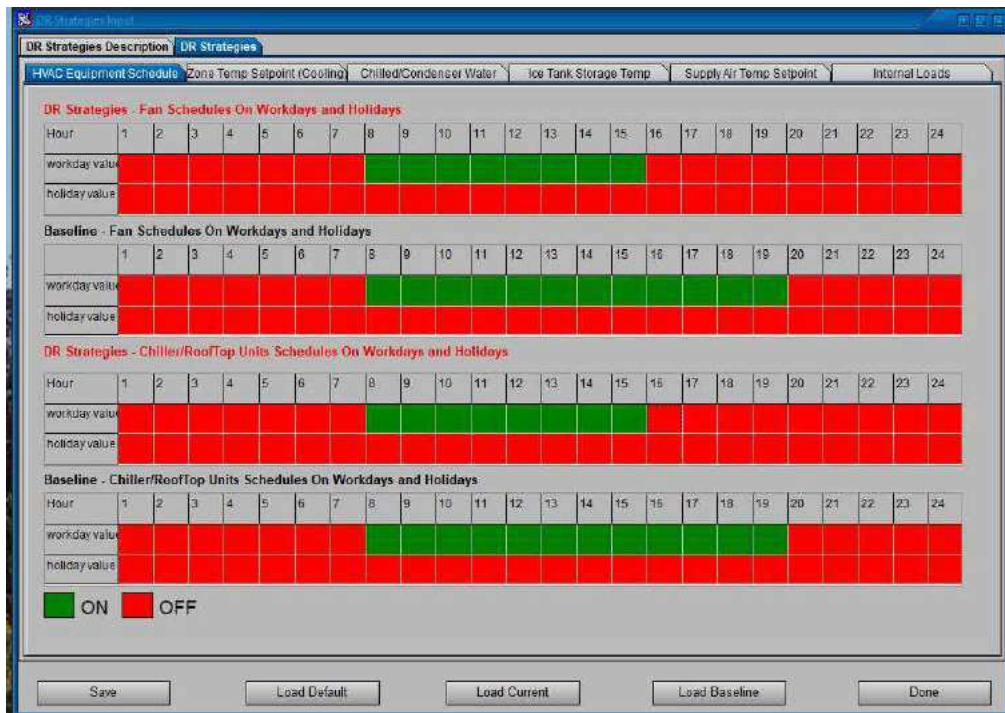
Tabela 12 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 1.

| Meses            | Resultados para o período máximo de 5h | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Total em kW | Total em kWh (produto de 5h) |
|------------------|--|--------|--------|--------|-------------|------------------------------|
| Outubro a março  | Redução de carga (kW)                  | 11     | 7      | 10     | 28          | 140                          |
| Abril a setembro | Redução de carga (kW)                  | 10     | 6      | 9      | 25          | 125                          |

### 3.2.2.2 Estratégia 2

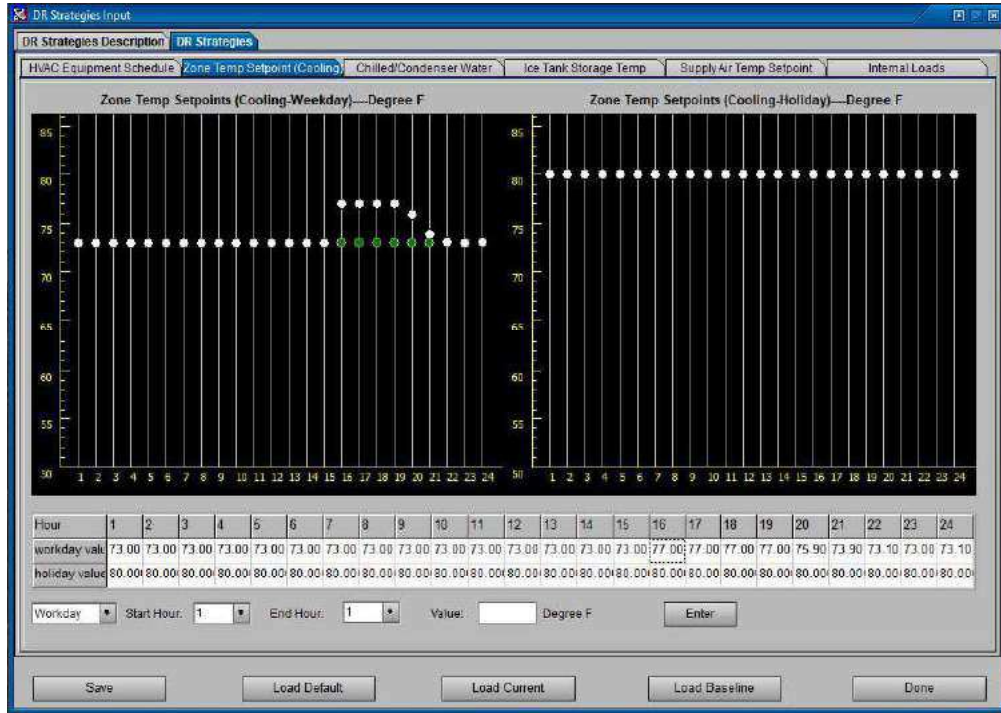
O cronograma da Estratégia 2 é apresentado na Figura 20, o *setpoint* da temperatura da zona na Figura 21 e o *setpoint* da temperatura da água gelada na Figura 22.

Figura 20 - Cronograma da Estratégia 2 para equipamentos HVAC.



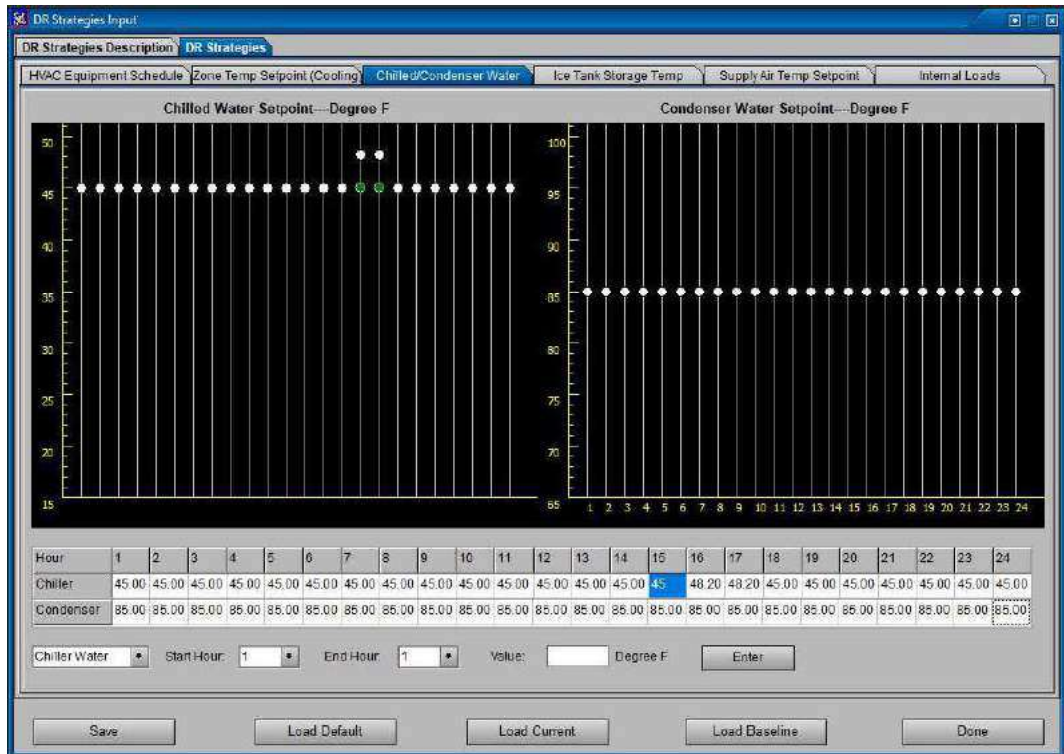
Fonte: DRQAT.

Figura 21 - Estratégia 2: *setpoint* da temperatura da zona.



Fonte: DRQAT.

Figura 22 - Estratégia 2: *setpoint* da temperatura da água gelada.



Fonte: DRQAT.

A Tabela 13 apresenta os resultados em RD para cada evento em flexibilidade de carga e energia total.

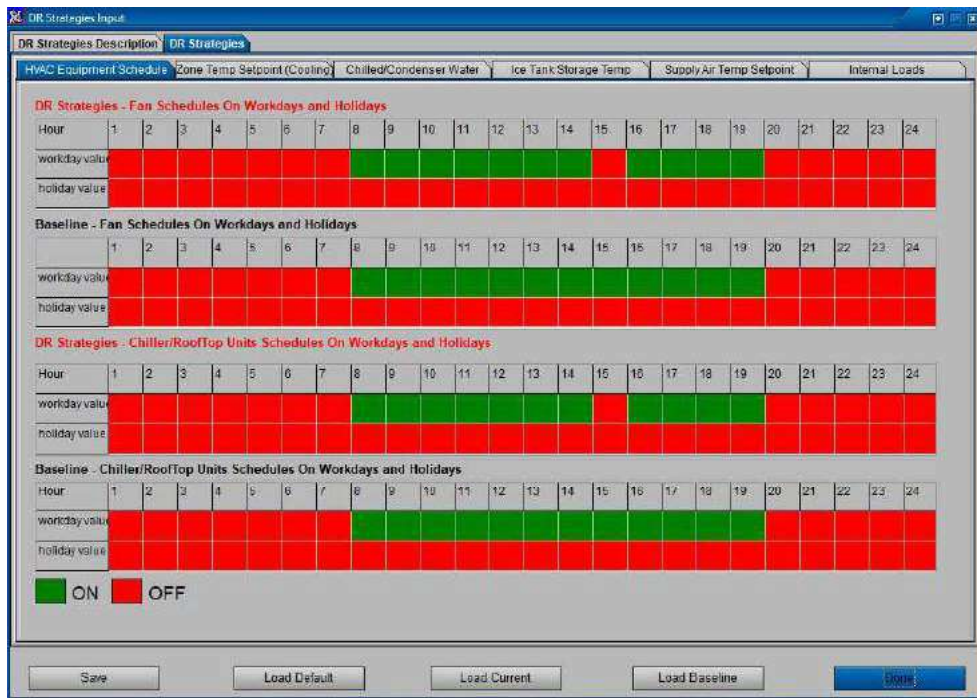
Tabela 13 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 2.

| Meses                   | Resultados para o período máximo de 3h | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Total em kW | Total em kWh (produto de 3h) |
|-------------------------|--|--------|--------|--------|-------------|------------------------------|
| <b>Outubro a março</b>  | Redução de carga (kW)                  | 11     | 6      | 10     | 27          | 81                           |
| <b>Abril a setembro</b> | Redução de carga (kW)                  | 8      | 5      | 7.5    | 20.5        | 61.5                         |

### 3.2.2.3 Estratégia 3

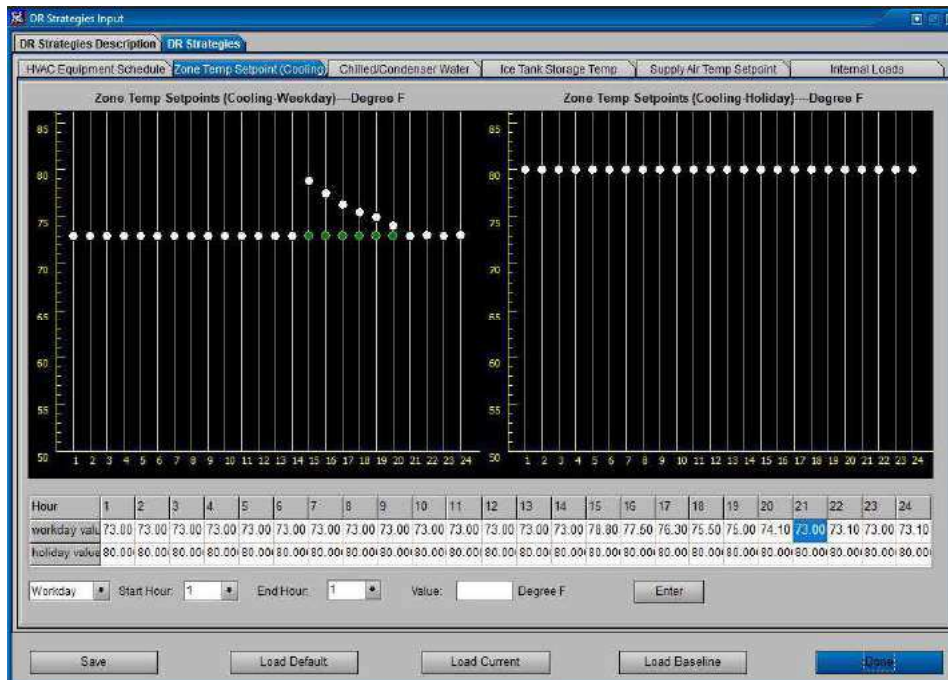
O cronograma da Estratégia 3 é apresentado na Figura 23, o *setpoint* da temperatura da zona na Figura 24 e o *setpoint* da temperatura da água gelada na Figura 25.

Figura 23 - Cronograma da Estratégia 3 para equipamentos HVAC.



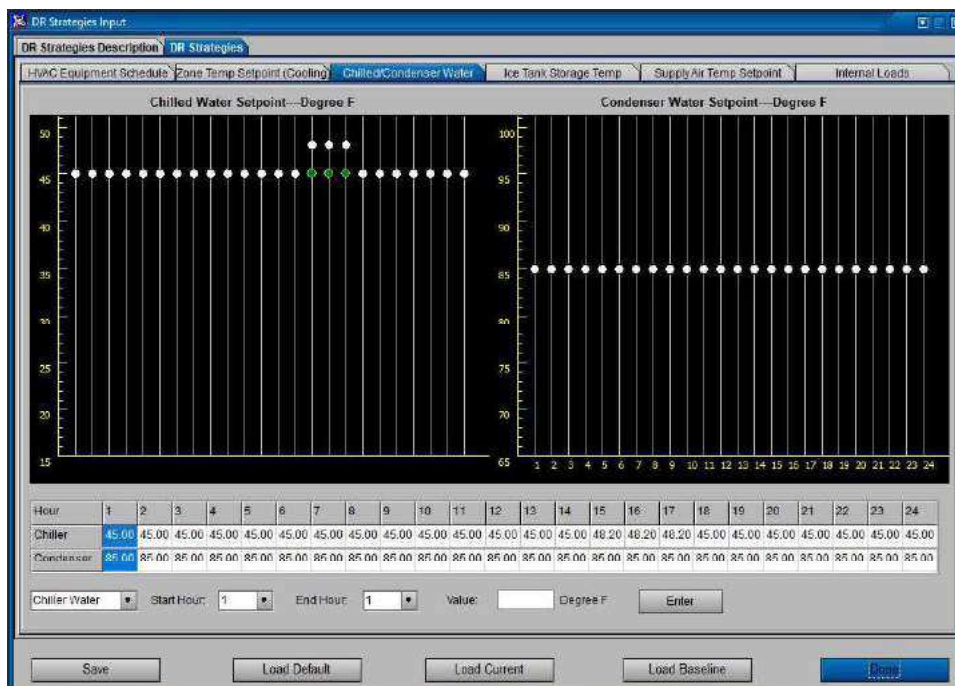
Fonte: DRQAT.

Figura 24 - Estratégia 3: *setpoint* da temperatura da zona.



Fonte: DRQAT.

Figura 25 - Estratégia 3: *setpoint* da temperatura água gelada.



Fonte: DRQAT.

A Tabela 14 apresenta os resultados em RD para cada evento em flexibilidade de carga e energia total.

Tabela 14 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 3.

| Meses                   | Resultados para o período máximo de 1h | Zona 1 | Zona 2 | Zona 3 | Total em kW | Total em kWh (produto de 1h) |
|-------------------------|--|--------|--------|--------|-------------|------------------------------|
| <b>Outubro a março</b>  | Redução de carga (kW)                  | 9      | 5.5    | 10.5   | 25          | 25                           |
| <b>Abril a setembro</b> | Redução de carga (kW)                  | 8      | 5      | 8.5    | 21.5        | 21.5                         |

### 3.2.2.4 Compilação dos resultados

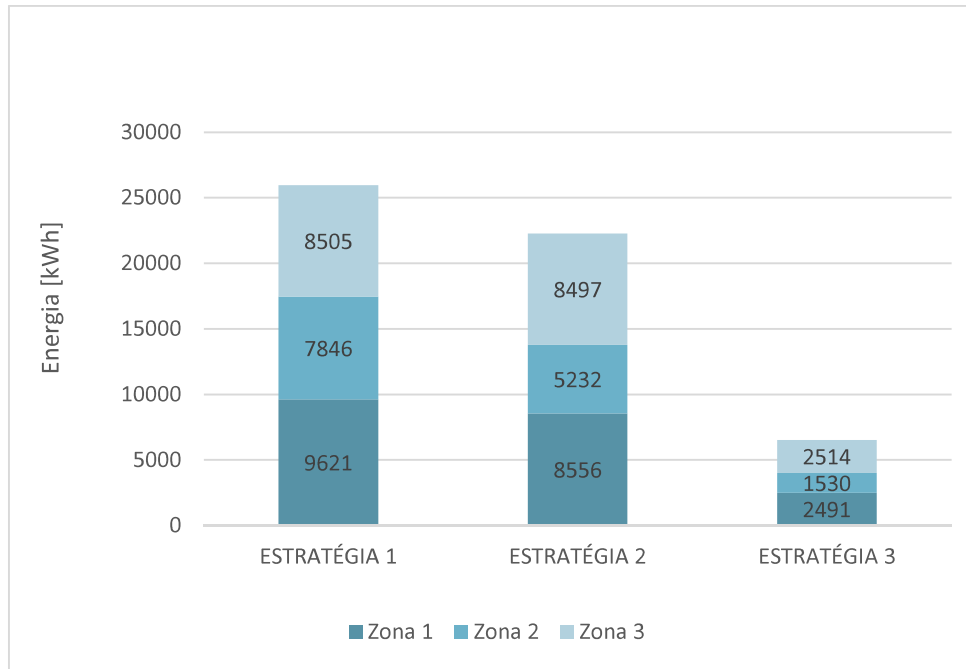
Para a comparação dos resultados obtidos, a Tabela 15 apresenta os dados em energia para todas as as simulações efetuadas, para todas as estratégias e para todas as zonas. Os resultados consideram que a RD ocorre em todos os dias de semana (segunda a sexta-feira) e agregam mensalmente a quantidade de energia que se deixou de consumir.

Tabela 15 – Resultados mensais em energia para cada zona e estratégia em kWh no data center.

| Mês       | Zona 1       |              |              | Zona 2       |              |              | Zona 3       |              |              |
|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|           | Estratégia 1 | Estratégia 2 | Estratégia 3 | Estratégia 1 | Estratégia 2 | Estratégia 3 | Estratégia 1 | Estratégia 2 | Estratégia 3 |
| Janeiro   | 920          | 807          | 258          | 710          | 504          | 161          | 790          | 809          | 260          |
| Fevereiro | 793          | 702          | 221          | 613          | 436          | 136          | 682          | 703          | 222          |
| Março     | 856          | 764          | 248          | 675          | 469          | 155          | 744          | 757          | 250          |
| Abril     | 750          | 681          | 176          | 648          | 417          | 108          | 687          | 670          | 178          |
| Mai       | 780          | 687          | 177          | 651          | 414          | 105          | 699          | 680          | 178          |
| Junho     | 723          | 633          | 163          | 607          | 379          | 97           | 647          | 627          | 165          |
| Julho     | 779          | 676          | 173          | 651          | 405          | 104          | 692          | 669          | 174          |
| Agosto    | 817          | 737          | 189          | 704          | 446          | 116          | 744          | 725          | 192          |
| Setembro  | 730          | 651          | 167          | 625          | 399          | 102          | 659          | 644          | 169          |
| Outubro   | 845          | 763          | 251          | 685          | 464          | 156          | 746          | 756          | 254          |
| Novembro  | 821          | 738          | 239          | 656          | 454          | 149          | 722          | 735          | 241          |
| Dezembro  | 807          | 717          | 229          | 621          | 445          | 141          | 693          | 722          | 231          |

Com os dados obtidos em todas as simulações, os valores foram agrupados para se ter uma estimativa anual de redução de consumo por resposta da demanda. A Figura 26 apresenta os resultados anuais em energia entregue por RD para cada estratégia e separado por zonas, considerando que esses eventos ocorram apenas em dias semana e cada estratégia.

Figura 26 - Total de energia anual para cada zona e para cada estratégia.

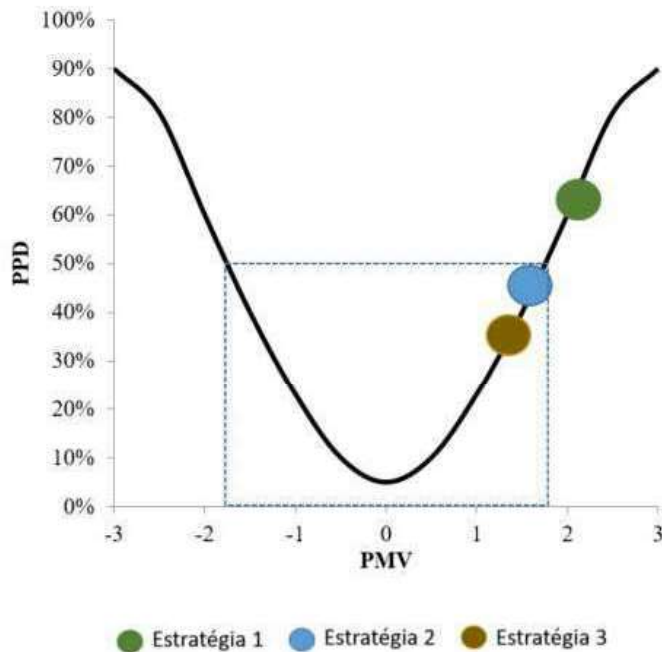


Fonte: Elaboração própria.

Os resultados em conforto térmico foram apresentados no *software* para cada dia simulado, mas para melhor compreensão dos resultados, verificou-se o maior pico do índice PMV (Voto Médio Estimado) em todo o período simulado, visto que esses índices não variavam significativamente com os dias, e sim com as estações do ano. Na Figura 27 são apresentados esses valores.



Figura 27 - Resultados médios em conforto térmico para cada estratégia simulada.



Fonte: Elaboraçaõ pr³pria.

Observa-se que na Estratègia 1 o conforto térmico foi além do limite estabelecido como premissa nessa simulaçaõ, mostrando que essa é uma estratègia não deve ser adotada, por causar percepções desconfortáveis na mudançã da climatizaçaõ ambiente.

### 3.2.2.5 Discussão dos resultados

A Estratègia 1 considera o armazenamento de energia na massa térmica, o que se chama passivo térmico. Essa técnica gera um deslocamento da carga para os momentos anteriores à RD. O conforto térmico foi bastante prejudicado durante os meses de verã, atingido valores pr³ximos a 2,5 ao final do evento de RD, que é a sensaçã de quente, em que 70% das pessoas estariam insatisfeitas. Nos meses de outono e inverno o conforto térmico manteve uma boa média, entre 1,5 e 2,0 e a resposta em consumo de energia foi 10% menor que nos meses de verã.

Na Estratègia 2, o conforto térmico foi ligeiramente prejudicado durante os meses de verã, atingido valores de no máxímo 2,5 ao final do evento de RD, em que 70% das pessoas estariam insatisfeitas. Nos meses de outono e inverno o conforto térmico se manteve pr³ximo

de 1,0, o que seria a sensação de “levemente quente”. A resposta em consumo de energia foi 25% menor que nos meses de verão.

Essa estratégia não considera o armazenamento de energia térmica no momento anterior à RD, ou seja, não possui deslocamento de carga.

Na Estratégia 3, o conforto térmico não sofreu grandes variações, ficando em no máximo 1,5 e dias de verão e 1,0 em meses de inverno. A resposta em consumo de energia foi 15 % menor que nos meses de verão.

Essa estratégia foi definida como uma alternativa para um tempo mínimo de 1 h de RD. Devido ao desligamento ser pelo curto período de 1h, pode-se aumentar significativamente a temperatura sem prejuízo ao conforto térmico dos usuários do ambiente.

Diante dos resultados obtidos, observa-se que a relevância da RD de HVAC aplicada apenas às áreas comuns de um único participante é relativa e depende da percepção de cada consumidor para justificar uma ação de desligamento de carga. Também fica evidente que mesmo prejudicando o conforto térmico e aumentando a quantidade de horas de redução de consumo, o montante em energia ainda representa pouco se comparado aos gastos em energia elétrica do participante.

Embora seja viável declarar a flexibilidade de carga pelo desligamento de equipamentos HVAC, para que essa prática seja significativamente lucrativa é necessário que haja incentivos adicionais. Em outros países analisados, esses incentivos se dão mediante isenções de impostos, ou preço diferenciado de energia elétrica para carga flexível, com a justificativa de se operacionalizar a segurança do sistema elétrico. Como no Brasil a RD ainda é um assunto muito novo, que inclusive não está apresentando resultados em seu primeiro ano de piloto, espera-se que com a maturidade da regulamentação esses incentivos passem a existir.

### **3.2.3 Centro universitário**

Nesse caso, foi estudado um Centro Educacional na Grande São Paulo, onde a climatização tem função principal em garantir o conforto térmico dos usuários. O custo médio mensal com energia elétrica é de aproximadamente R\$ 250 000,00 e a demanda máxima de 450 kW. Após visita técnica para coleta de informações do sistema HVAC e entendimento das necessidades e das particularidades da edificação, foi observado que os ambientes de mais fácil implementação de técnicas de RD são duas zonas utilizadas como ambiente de estudos, não contíguas e são frequentadas por alunos durante todo o dia.

De acordo com o diagrama unifilar analisado as plantas da edificação, define-se ambientes agrupados para aplicação das estratégias, definidos na Tabela 16.

Tabela 16 – Divisão dos ambientes para aplicação de estratégias de RD.

| <b>Ambiente</b>                             | <b>Área aproximada (m<sup>2</sup>)</b> | <b>Porcentagem em relação à área climatizada total do edifício (%)</b> | <b>Ocupação em pessoas</b> | <b>Potência de Ar Condicionado (kW)</b> |
|---|--|--|----------------------------|---|
| <b>Zona 1 (Ambiente amplo de estudos 1)</b> | 5600                                   | 25   | 2000                       | 1000                                    |
| <b>Zona 2 (Ambiente amplo de estudos 2)</b> | 3000                                   | 14   | 1000                       | 550                                     |

A ocupação dos ambientes e o uso de ar condicionado são intensos nos períodos matutino e noturno, com grande fluxo de alunos. No período vespertino, o fluxo é baixo, sendo ocupado em maior parte pelos funcionários em circulação e nas áreas administrativas. Por intermédio de uma análise dos usos de cada ambiente, foi possível definir o cronograma listado na Tabela 17.

A Estratégia 1 foi definida para o caso de haver participação no Piloto de Resposta da Demanda do ONS, onde é registrada uma flexibilidade de 5 horas. Para que essa RD seja possível sem prejudicar demasiadamente o conforto térmico, é necessário a utilização da técnica de passivo térmico horas antes do evento, utilizando a massa térmica para resfriar o ambiente.

A Estratégia 2 apresenta o limite de horas que se pode entregar RD, garantindo conforto térmico e sem necessidade de armazenar passivo térmico previamente, ou seja, efetuando apenas o corte efetivo, sem deslocamento de carga.

A Estratégia 3 consiste em um melhoramento da anterior do ponto de vista do conforto térmico, estabelecendo um período de apenas 1h para o evento de RD.

Foi decidido junto às equipes responsáveis pelo projeto que as estratégias deveriam garantir pelo menos 50% de satisfação dentro dos ambientes, para que fosse possível a implementação sem grandes prejuízos ao conforto térmico.

Tabela 17 – Cronograma de RD para HVAC no Centro Educacional.

| Ambientes        | Horários de ar condicionado ligado (baseline) | Estratégia 1   | Estratégia 2  | Estratégia 3   |
|------------------|---|--|---|--|
| Zona 1<br>Zona 2 | 7 às 23h                                      | <p>- Passivo Térmico: diminuir a temperatura para 21°C (69,8 °F) das 10h às 12h. Ajuste linear de temperatura: Aumentar a temperatura em 1°C por hora a partir das 13h, chegando em 27°C (80,6 °F) às 18h. Depois retornar suavemente ao <i>setpoint</i>, diminuindo 2°C por hora.</p> <p>- Aumentar o <i>setpoint</i> da água gelada para 9°C (48,2 °F) às 15h.</p> | <p>- Aumento exponencial do <i>setpoint</i> de temperatura para 25°C (77 °F) às 16h e mantendo essa temperatura das 16h às 19h.</p> <p>- Aumentar o <i>setpoint</i> da água gelada para 9°C (48,2 °F) às 16h.</p> | <p>- Aumento exponencial do <i>setpoint</i> de temperatura para 26°C (78,8 °F) às 15h.</p> <p>- Aumentar o <i>setpoint</i> da água gelada para 9°C (48,2 °F) às 15h.</p> |

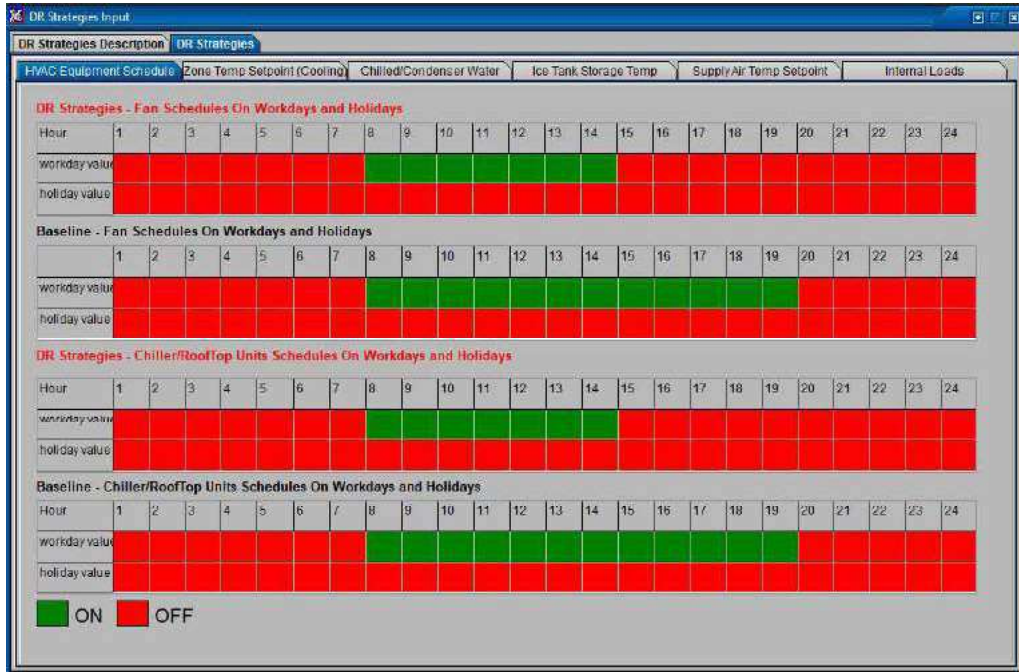
As estratégias adotadas nessa análise vão do nível conservador até um nível mais radical, variando na escala sétima ASHRAE entre -1,5 e 1,5, garantindo assim que as consequências das medidas tomadas não seja um ambiente muito quente.

Nesta seção é apresentada a implementação de cada estratégia no programa, inserindo cronogramas e *setpoints* de temperatura para sistemas *water cooled*. Primeiramente são mostrados os resultados de dados individuais para cada estratégia e em seguida uma compilação para comparação dos valores em energia e conforto térmico, para cada mês do ano e para cada ambiente analisado.

### 3.2.3.1 Estratégia 1

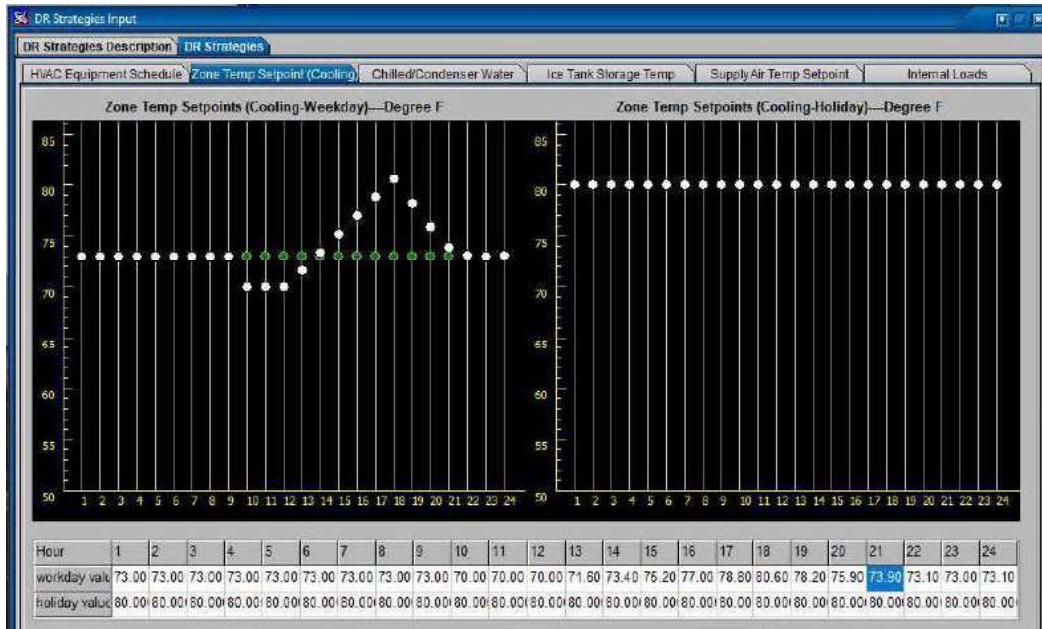
O cronograma da Estratégia 1 é apresentado na Figura 28, o *setpoint* da temperatura da zona na Figura 29 e o *setpoint* da água gelada na Figura 30.

Figura 28 - Cronograma da Estratégia 1 para equipamentos HVAC.



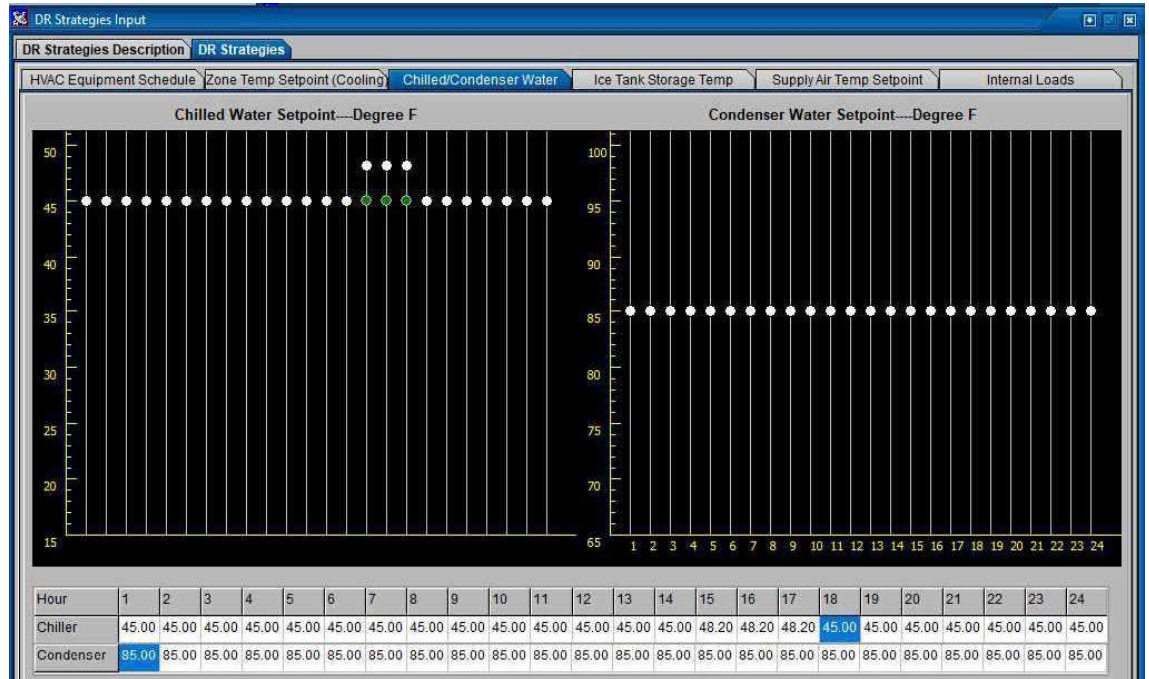
Fonte: DRQAT.

Figura 29 - Estratégia 1: setpoint da temperatura da zona.



Fonte: DRQAT.

Figura 30 - Estratégia 1: *setpoint* da temperatura da água gelada.



Fonte: DRQAT.

A Tabela 18 apresenta os resultados em RD para cada evento em flexibilidade de carga e energia total.

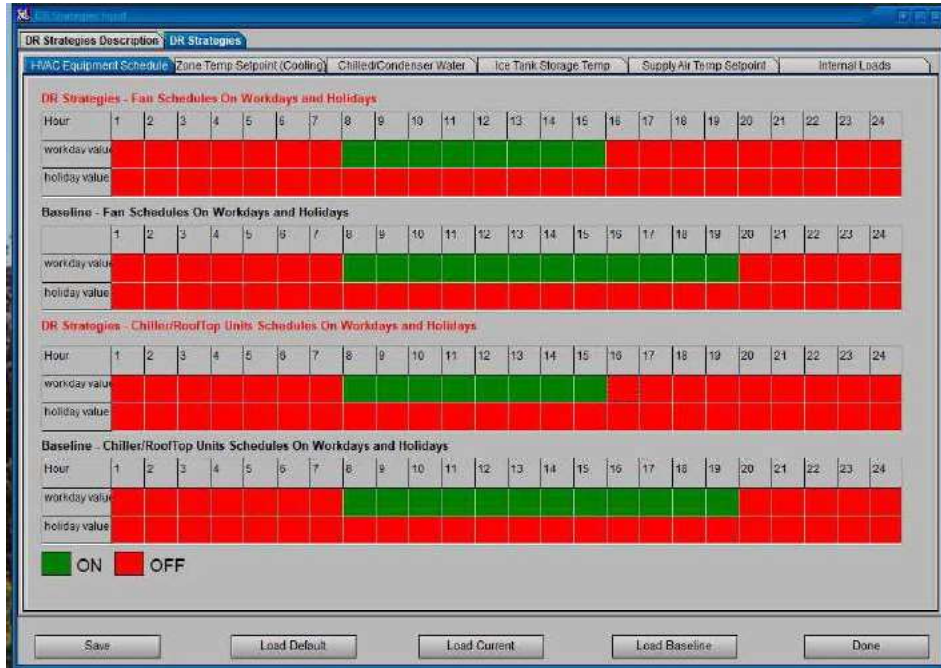
Tabela 18 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 1.

| Meses                   | Resultados para o período máximo de 5h | Zona 1 | Zona 2 | Total em kW | Total em kWh (produto de 5h) |
|-------------------------|--|--------|--------|-------------|------------------------------|
| <b>Outubro a março</b>  | Redução de carga (kW)                  | 200    | 130    | 330         | 1650                         |
| <b>Abril a setembro</b> | Redução de carga (kW)                  | 170    | 110    | 280         | 1400                         |

### 3.2.3.2Estratégia 2

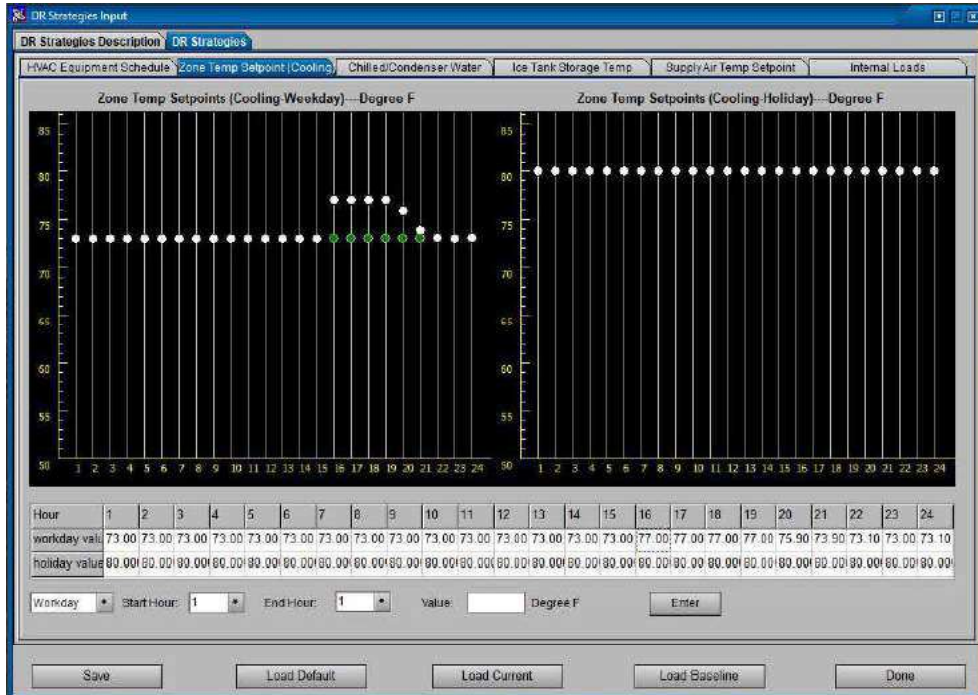
O cronograma da Estratégia 2 é apresentado na Figura 31, o *setpoint* da temperatura da zona na Figura 32 e o *setpoint* da temperatura da água gelada na Figura 33.

Figura 31 - Cronograma da Estratégia 2 para equipamentos HVAC.



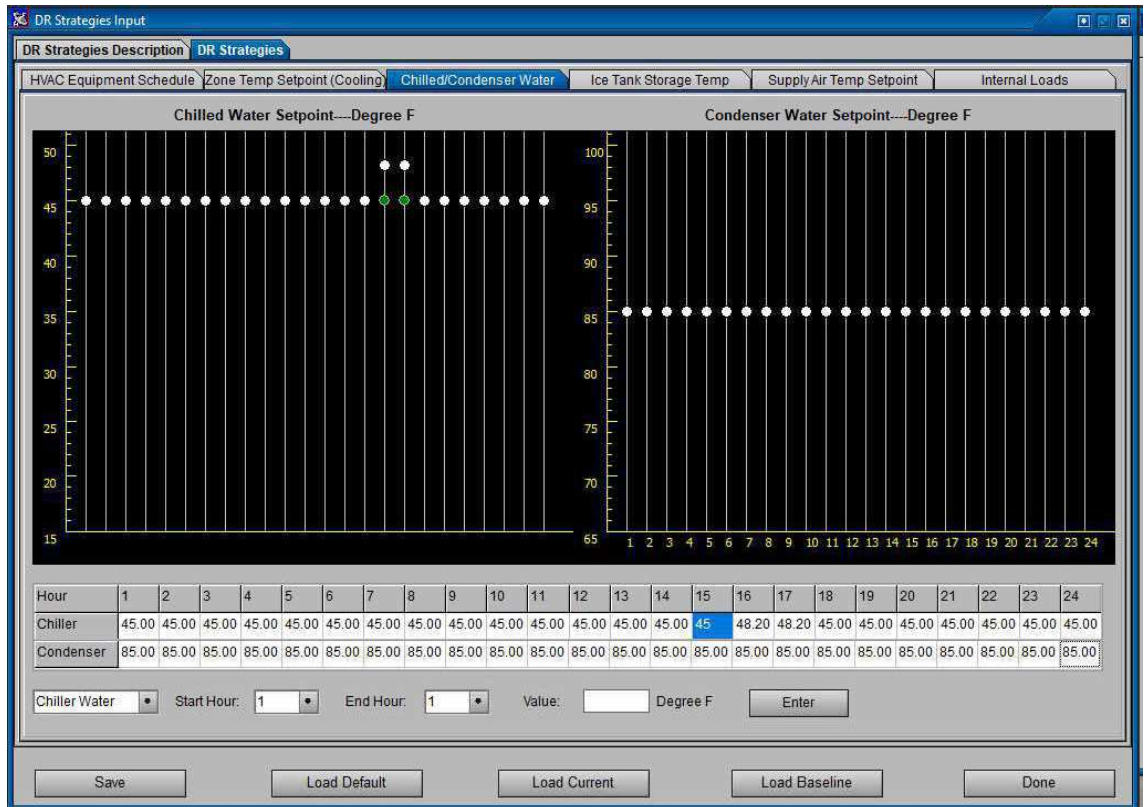
Fonte: DRQAT.

Figura 32 - Estratégia 2: setpoint da temperatura da zona



Fonte: DRQAT.

Figura 33 - Estratégia 2: *setpoint* da temperatura da água gelada.



Fonte: DRQAT.

A Tabela 19 apresenta os resultados em RD para cada evento em flexibilidade de carga e energia total.

Tabela 19 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 2.

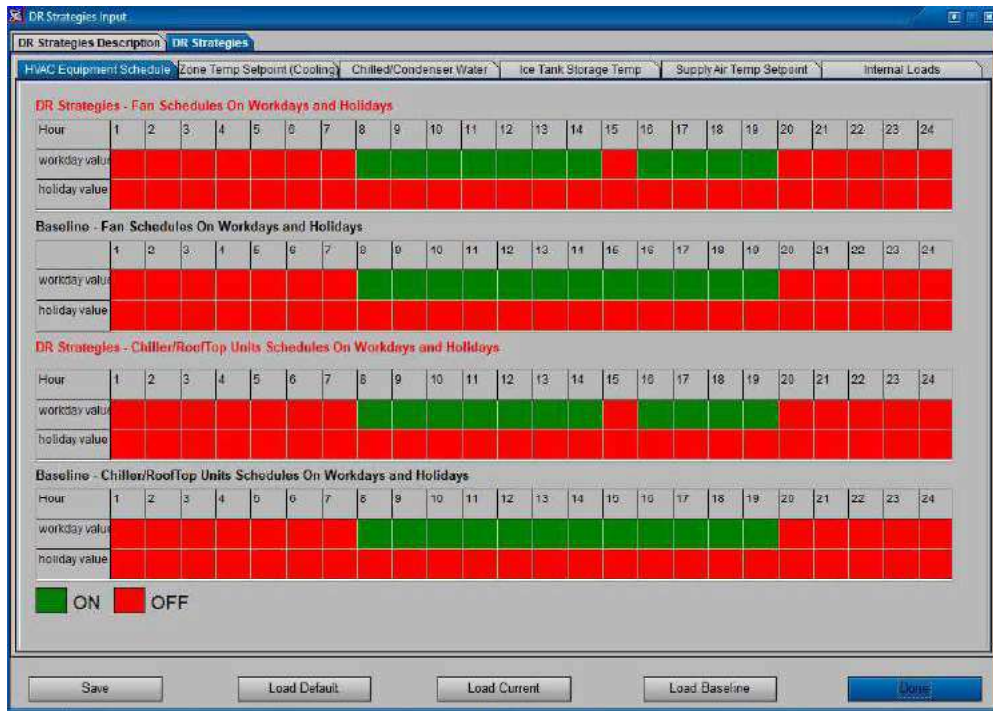
| Meses            | Resultados para o período máximo de 3h | Zona 1 | Zona 2 | Total em kW | Total em kWh (produto de 3h) |
|------------------|--|--------|--------|-------------|------------------------------|
| Outubro a março  | Redução de carga (kW)                  | 170    | 100    | 270         | 810                          |
| Abril a setembro | Redução de carga (kW)                  | 140    | 75     | 215         | 645                          |



### 3.2.3.3 Estratégia 3

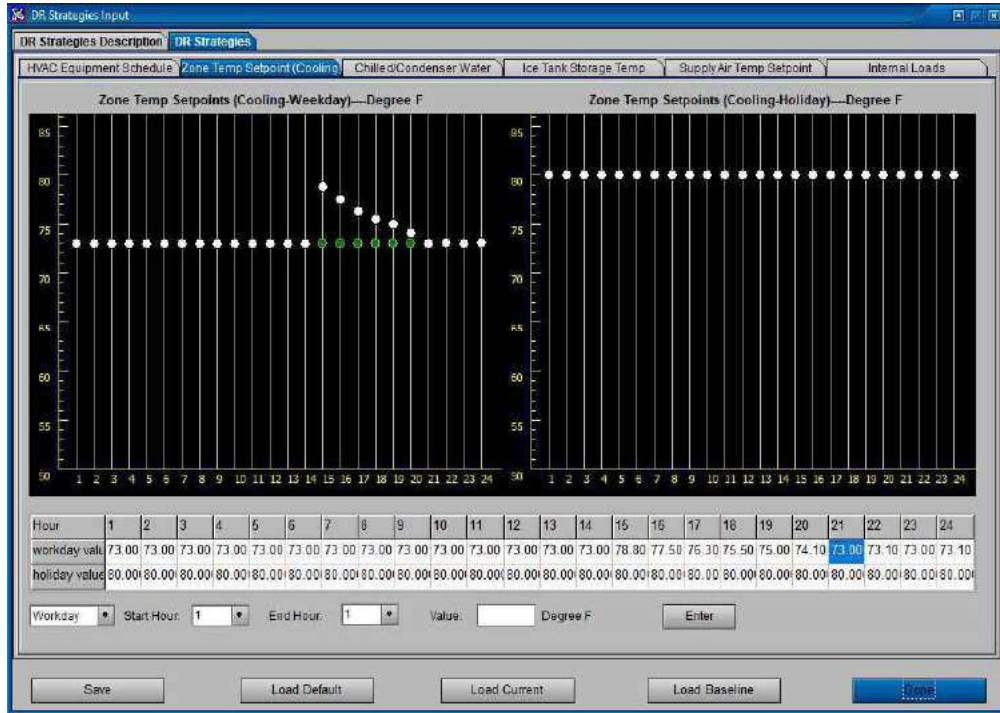
O cronograma da Estratégia 2 é apresentado na Figura 34, o *setpoint* da temperatura da zona na Figura 35 e o *setpoint* da temperatura da água gelada na Figura 36.

Figura 34 - Cronograma da Estratégia 3 para equipamentos HVAC.



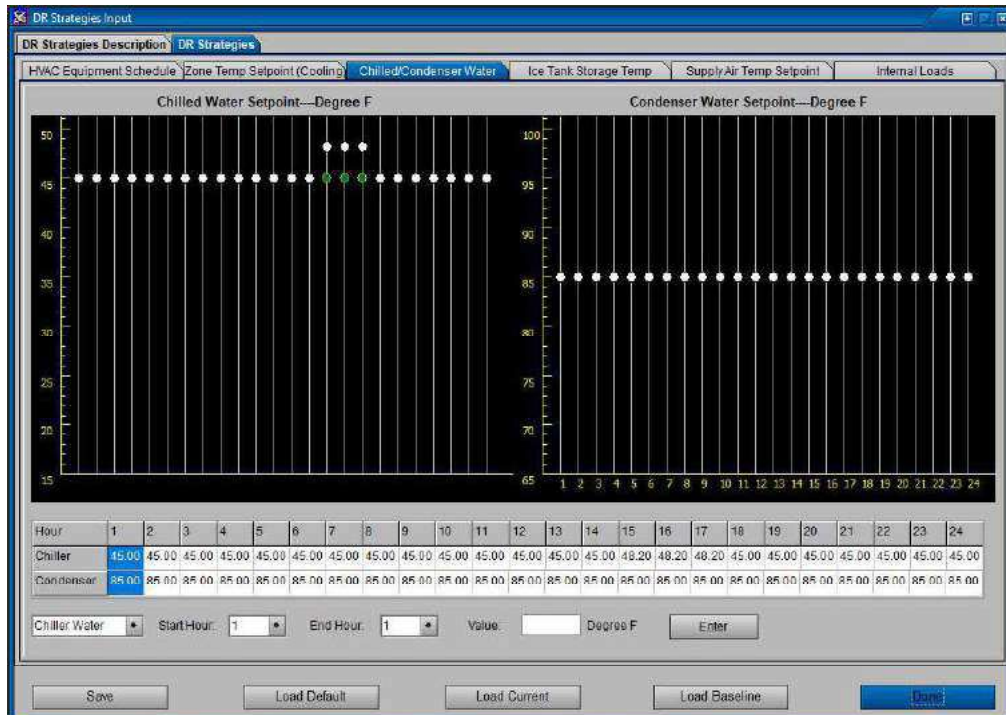
Fonte: DRQAT.

Figura 35 - Estratégia 3: *setpoint* da temperatura da zona.



Fonte: DRQAT.

Figura 36 - Estratégia 3: *setpoint* da temperatura água gelada.



Fonte: DRQAT.

A Tabela 20 apresenta os resultados em RD para cada evento em flexibilidade de carga e energia total.

Tabela 20 – Resposta da demanda possível para a Estratégia 3.

| Meses                   | Resultados para o período máximo de 1h | Zona 1 | Zona 2 | Total em kW | Total em kWh (produto de 1h) |
|-------------------------|--|--------|--------|-------------|------------------------------|
| <b>Outubro a março</b>  | Redução de carga (kW)                  | 160    | 95     | 255         | 255                          |
| <b>Abril a setembro</b> | Redução de carga (kW)                  | 135    | 75     | 210         | 210                          |

### 3.2.3.4 Compilação dos resultados

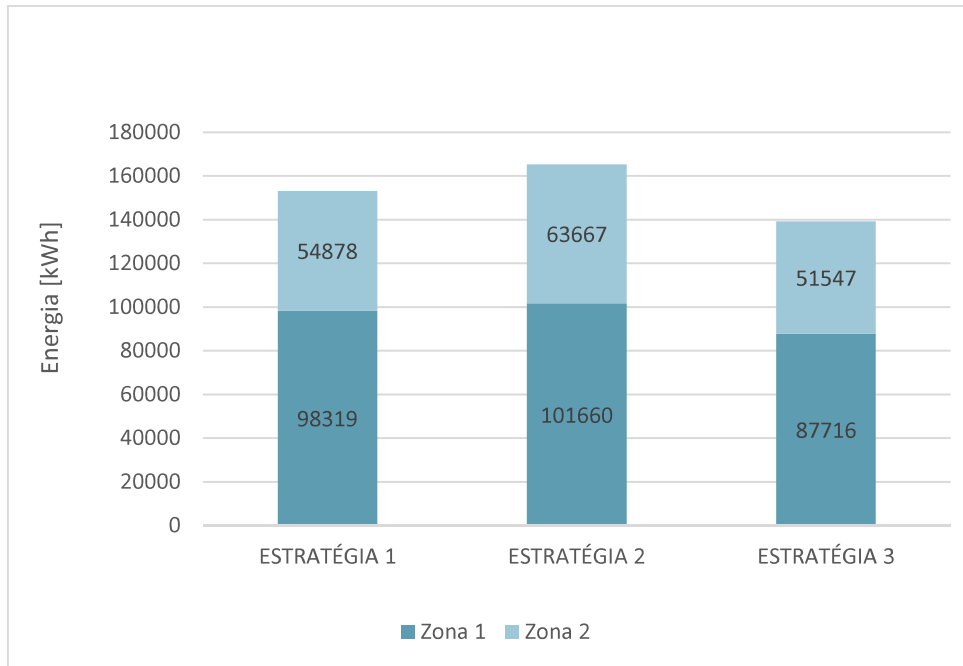
Para a comparação dos resultados obtidos, a Tabela 21 apresenta os dados em energia e conforto térmico em todas as simulações efetuadas, para todas as estratégias e para todas as zonas. Os resultados consideram que a RD ocorre em todos os dias de semana (segunda a sexta-feira) e agregam mensalmente a quantidade de energia que se deixou de consumir.

Tabela 21 – Resultados mensais em energia para cada zona e estratégia em kWh no centro universitário.

| Mês       | Zona 1       |              |              | Zona 2       |              |              |
|-----------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|           | Estratégia 1 | Estratégia 2 | Estratégia 3 | Estratégia 1 | Estratégia 2 | Estratégia 3 |
| Janeiro   | 10251        | 10367        | 9357         | 5699         | 6404         | 5394         |
| Fevereiro | 8563         | 8921         | 8038         | 4893         | 5521         | 4511         |
| Março     | 9632         | 9939         | 8979         | 5483         | 6157         | 5147         |
| Abril     | 6145         | 6669         | 5308         | 3568         | 4325         | 3315         |
| Mai       | 7125         | 7316         | 5821         | 3852         | 4702         | 3692         |
| Junho     | 6565         | 6972         | 5527         | 3603         | 4429         | 3419         |
| Julho     | 7256         | 7564         | 6205         | 4035         | 4824         | 3814         |
| Agosto    | 6987         | 7215         | 5857         | 3941         | 4755         | 3745         |
| Setembro  | 6189         | 6332         | 5264         | 3537         | 4165         | 3155         |
| Outubro   | 10254        | 10643        | 9591         | 5652         | 6379         | 5369         |
| Novembro  | 9987         | 10124        | 9151         | 5441         | 6143         | 5133         |
| Dezembro  | 9365         | 9598         | 8618         | 5174         | 5863         | 4853         |

Com os dados obtidos em todas as simulações, os valores foram agrupados para se ter uma estimativa anual de redução de consumo por resposta da demanda. A Figura 37 apresenta os resultados anuais em energia entregue por RD para cada estratégia e separado por zonas, considerando que esses eventos ocorram apenas em dias de semana.

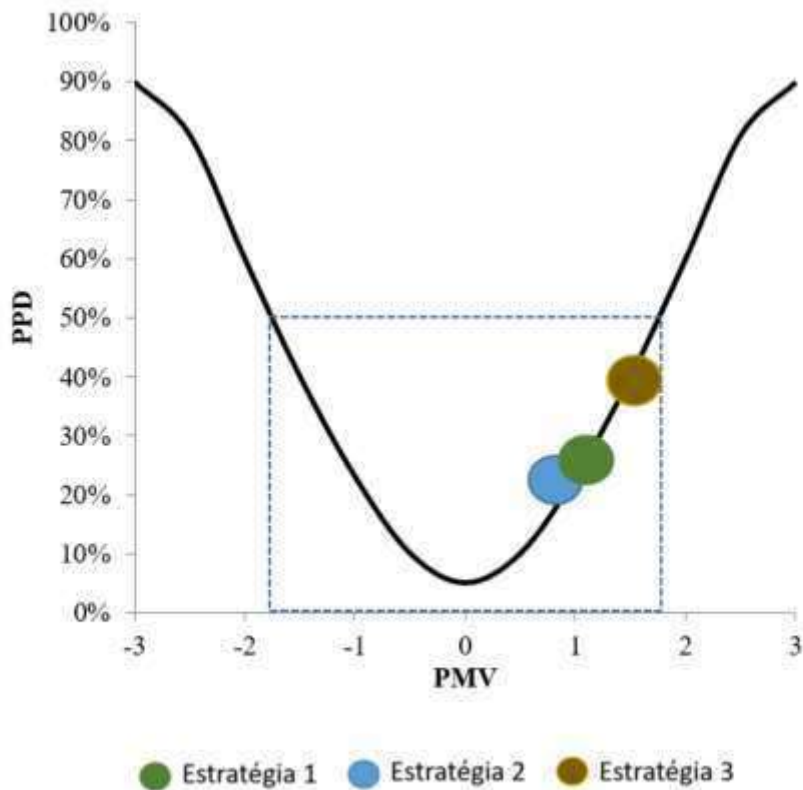
Figura 37 - Total de energia anual para cada zona e para cada estratégia.



Fonte: Elaboração própria.

Os resultados em conforto térmico foram apresentados no *software* para cada dia simulado, mas para melhor compreensão dos resultados, verificou-se o maior pico do índice PMV (Voto Médio Estimado) em todo o período simulado, visto que esses índices não variavam significativamente com os dias, e sim com as estações do ano. Na Figura 38 são apresentados esses valores.

Figura 38 - Resultados médios em conforto térmico para cada estratégia simulada.



Fonte: Elaboração pr3pria.

Observa-se que nesse caso, as estratègias se mantiveram dentro do esperado em conforto térmico, n3o trazendo grande percepç3o de alteraç3o climática para a maioria dos ocupantes do ambiente.

### 3.2.3.5 Discuss3o dos resultados

A Estratègia 1 considera o armazenamento de energia na massa térmica, o que se chama passivo térmico. Essa técnica gera um deslocamento da carga para os momentos anteriores à RD.

O conforto térmico foi consideravelmente prejudicado durante os meses de ver3o, atingido valores máximos de 1,5 ao final do evento de RD, que é a sensaç3o de ambiente quente. Nos meses de outono e inverno o conforto térmico manteve uma boa média, por volta de 1,0 e a resposta em consumo de energia foi 16% menor que nos meses de ver3o.

Na Estratégia 2, o conforto térmico foi ligeiramente prejudicado durante os meses de verão, atingido valores de no máximo 2,5 ao final do evento de RD, em que 90% das pessoas estariam insatisfeitas. Nos meses de outono e inverno o conforto térmico se manteve próximo de 1,8, o que seria a sensação de “levemente quente”. A resposta em consumo de energia foi 21% menor que nos meses de verão. Essa estratégia não considera o armazenamento de energia térmica no momento anterior à RD.

Na Estratégia 3, o conforto térmico não sofreu grandes variações, ficando em no máximo 1,6 e dias de verão e 1,0 em meses de inverno. A resposta em consumo de energia foi 18% menor que nos meses de verão.

Essa estratégia foi definida como uma alternativa para um tempo mínimo de RD. Devido ao desligamento ser pelo curto período de 1 h, pode-se aumentar significativamente a temperatura sem prejuízo ao conforto térmico dos usuários do ambiente.

Diante dos resultados obtidos, observa-se que a RD de equipamentos HVAC aplicada apenas às zonas tratadas, durante o horário da tarde onde o participante pode ter sua carga flexibilizada, gera resultados relevantes em termos de energia, para justificar uma ação de desligamento de carga. O conforto térmico foi ligeiramente prejudicado, mas por ser um período de utilização pontual dos ambientes simulados, essas medidas são facilmente implementadas. Dessa maneira, se mostra uma opção interessante para as operações no mercado de energia, embora os resultados em energia ainda sejam muito pequenos se comparado aos gastos em energia elétrica do participante.

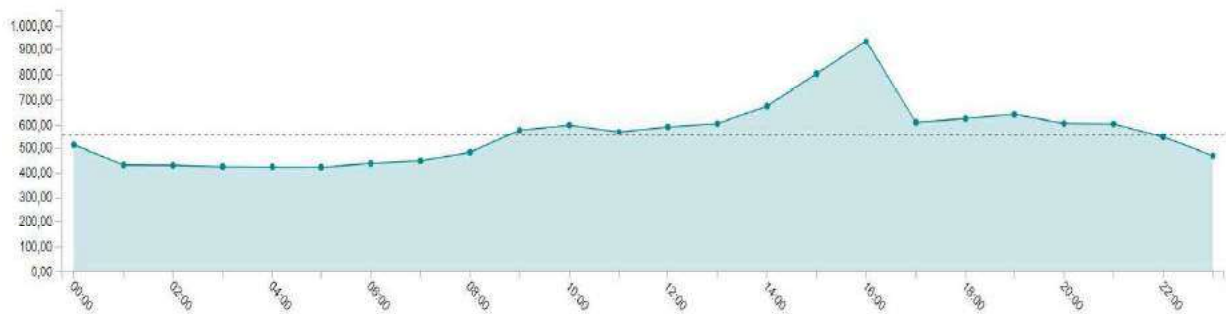
### **3.3 Análise de preços**

Considerando que os participantes de eventos de RD são consumidores dentro do mercado livre de energia, os contratos de compra de energia desses agentes já são celebrados, sendo consumido ou não. A diferença entre a energia contratada e a energia consumida é liquidada ao PLD na contabilização mensal feita pela CCEE. Idealmente, espera-se que essa diferença se aproxime de zero, para que os preços efetivamente pagos pela energia sejam os celebrados em contrato e não os decorrentes de uma possível exposição no mercado de curto prazo. Entretanto, em alguns casos, a exposição pode gerar maiores lucros do que os contratos firmados anteriormente, principalmente considerando a ampla possibilidade de variação do PLD horário.

Assim, foi feita uma análise considerando todo o período de PLD sombra no ano de 2020, buscando identificar momentos nos quais seria interessante ter uma exposição ao mercado de curto prazo por meio de eventos de RD, visando propositalmente obter os lucros dessa liquidação e, ao mesmo tempo, contribuir para a segurança do sistema participando de chamadas no Programa Piloto de Resposta da Demanda do ONS no futuro.

A Figura 39 apresenta o PLD sombra calculado em um dia de novembro para o submercado Sudeste. Observa-se que existe uma variação significativa entre o preço mínimo e o preço máximo da energia, sendo R\$ 421,54 e R\$ 933,67, respectivamente.

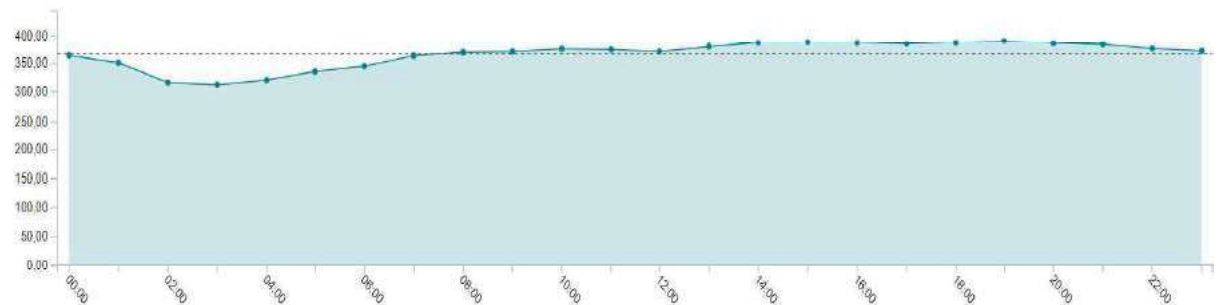
Figura 39 – PLD sombra calculado para o dia 17/11/2020 no submercado Sudeste em R\$/MWh.



Fonte: (CCEE, 2020).

A Figura 40 apresenta o PLD sombra calculado em outro dia de novembro para o submercado Sudeste. Já nesse caso, não existe uma diferença significativa entre os preços mínimo e máximo, alcançando valores de R\$ 313,09 e R\$ 389,66, respectivamente.

Figura 40 - PLD sombra calculado para o dia 04/11/2020 no submercado Sudeste em R\$/MWh.



Fonte: (CCEE, 2020).

Esses gráficos mostram apenas um recorte do comportamento do preço horário, mas quando são plotados os dados de todos os dias durante o mês de novembro, conforme a Figura 41, observa-se que os preços de energia variam muito ao longo das horas no dia. Como era de se esperar pelo próprio objetivo do cálculo do preço horário, as diferenças de preço incentivam o deslocamento de carga e, assim, é possível guiar o comportamento do consumidor.

Figura 41 – PLD horário sombra para novembro/2020 no submercado Sudeste.



Fonte: Adaptado de CCEE (2020).

Para que seja viável economicamente participar de chamadas de RD é necessário que o valor do PLD seja minimamente maior que o valor pago no contrato de energia. Considerando que o preço médio de contratações para longo prazo é aproximadamente R\$ 200,00/MWh, se tornaria possível deslocar a carga, retirando de momentos onde o PLD esteja acima desse limite para horários onde o preço do PLD esteja mais baixo.

Para o mês analisado especificamente, quase todos os pontos estão acima do valor mínimo, ou seja, seria economicamente viável atender a eventos de RD em qualquer horário e em qualquer dia. Resta, entretanto, verificar se, além de viável, essa operação é atrativa, ou seja, se o lucro obtido é suficientemente relevante para guiar um comportamento de deslocamento de carga.

Para isso, considera-se que no mês de novembro sejam atendidos eventos de RD em todos os dias úteis, conforme os resultados apresentados no desenvolvimento deste trabalho. Para verificar a atratividade, considera-se dois cenários de preços: melhor caso e pior caso. No melhor caso, será considerado o maior *gap* entre o PLD mínimo e o PLD máximo no mesmo



dia, conforme a Figura 39. Para o pior caso, será considerado o menor *gap* encontrado em um mesmo dia, conforme a Figura 40.

Assim, será possível obter uma faixa de valores onde a os lucros estarão distribuídos e assim verificar se dentro dessa faixa existe atratividade ou não do ponto de vista do consumidor, de acordo com a Equação 1.

$$Receita = (PLD_{m\acute{a}x} - PLD_{m\acute{i}n}) * Energia Mensal \quad (1)$$

A representatividade da receita obtida pelos eventos de RD em relação aos custos mensais com energia é dada pela Equação 2.

$$Representatividade\ na\ receita\ (\%) = \frac{Receita\ Mensal}{Custo\ m\acute{e}dio\ mensal\ com\ energia} \quad (2)$$

A Tabela 22 apresenta os dados utilizados e os resultados em receita para todos os segmentos estudados considerando o cenário de melhor caso. Para os dados de energia, foram consideradas as estratégias que resultaram maior valor agregado e atenderam à premissa de conforto térmico de no máximo 50% de pessoas insatisfeitas. Assim:

- Hotel: Estratégia 1;
- Data Center: Estratégia 2; e
- Centro Universitário: Estratégia 2.

Tabela 22 – Resultados da análise de preços para o cenário de melhor caso no mês de Novembro.

|                             | <b>PLD máximo no período [R\$/MWh]</b> | <b>PLD mínimo no período [R\$/MWh]</b> | <b>Energia mensal [kWh]</b> | <b>Receita mensal obtida [R\$]</b> | <b>Representatividade na receita [%]</b> |
|-----------------------------|--|--|-----------------------------|------------------------------------|--|
| <b>Hotel</b>                | 933,67                                 | 421,54                                 | 3442,58                     | 1763,05                            | 1,06                                     |
| <b>Data Center</b>          | 933,67                                 | 421,54                                 | 1927,0                      | 986,87                             | 0,45                                     |
| <b>Centro universitário</b> | 933,67                                 | 421,54                                 | 16267,0                     | 8330,82                            | 3,33                                     |

A Tabela 23 apresenta os dados utilizados e os resultados em receita para todos os segmentos estudados considerando o cenário de pior caso. Para os dados de energia, foram consideradas as estratégias que resultaram maior valor agregado.

Tabela 23 – Resultados da análise de preços para o cenário de pior caso.

|                             | <b>PLD máximo no período [R\$/MWh]</b> | <b>PLD mínimo no período [R\$/MWh]</b> | <b>Energia mensal [kWh]</b> | <b>Receita mensal obtida [R\$]</b> | <b>Representatividade na receita [%]</b> |
|-----------------------------|--|--|-----------------------------|------------------------------------|--|
| <b>Hotel</b>                | 389,66                                 | 313,09                                 | 3442,58                     | 263,60                             | 0,16                                     |
| <b>Data Center</b>          | 389,66                                 | 313,09                                 | 1927,0                      | 147,55                             | 0,07                                     |
| <b>Centro universitário</b> | 389,66                                 | 313,09                                 | 16267,0                     | 1245,56                            | 0,49                                     |

A representatividade no custo com energia mensal é calculada dividindo a receita proveniente dos eventos de RD pelo custo total com energia no mês, para verificar o quão significativo é para a empresa a receita a ser obtida.

### 3.3.1 Discussão dos Resultados

Por meio dessa análise, é possível perceber que existem diversas operações possíveis dentro do mercado de energia que podem incentivar a resposta da demanda, dadas principalmente pelas diferenças observadas entre os preços máximo e mínimo do PLD horário ao longo de um dia.

Entretanto, considerando apenas as cargas HVAC, esse valor ainda é pouco representativo no gasto total com energia, o que pode não ser considerado atrativo pelos consumidores candidatos a participarem ativamente desses processos. Existem, é claro, particularidades e, da mesma maneira que alguns consumidores são pouco propensos a mudar seu comportamento, existem também consumidores que podem verificar essa possibilidade de redução nos seus gastos como uma boa oportunidade.

De todo modo, para que a RD seja mais atrativa economicamente, é necessário que os consumidores participantes utilizem cargas que representem maior parcela do seu consumo de energia, como por exemplo as indústrias eletrointensivas. Assim, um deslocamento de carga, além de favorecer financeiramente o cliente, contribui com grande parcela para a confiabilidade do sistema.

Já para a participação no Programa Piloto de Reposta da Demanda, a carga reduzida resultado das simulações ainda não pode ser considerada para o despacho do Operador. Uma maneira de tornar essas cargas relevantes é por meio da agregação de unidades consumidoras dentro de Usinas Virtuais, formando um *pool* de ativos de RD e assim respondendo à demanda em blocos acumulados.

Outra maneira de tornar a RD mais atrativa, é com incentivos que remunerem as cargas flexíveis considerando o peso que as mesmas têm no planejamento da expansão e na confiabilidade do sistema. Para isso é necessário que a precificação não seja apenas proporcional à energia flexível, mas calculada considerando os investimentos a serem evitados em novas fontes de geração e transmissão para o atendimento à carga.

#### 4 CONCLUSÃO

Este trabalho permitiu a simulação de RD em equipamentos HVAC, em um estudo de caso para três segmentos diferentes, atendendo a uma necessidade real de um projeto de pesquisa e desenvolvimento. Foi utilizado um *software* ainda pouco conhecido no Brasil, esclarecendo as incógnitas relacionadas à relevância desses equipamentos em deslocamento de carga. Ainda, foi possível fazer uma análise de preços, considerando os dados de PLD sombra, para se obter uma base de precificação que justificasse eventos de RD baseados em preço.

Embora as estratégias adotadas tenham mostrado uma redução do custo com energia das unidades consumidoras participantes, a relevância ainda é pequena em relação ao total gasto, o que pode não ser atrativo para se atender aos eventos de RD com foco no mercado de energia. Dessa maneira, a RD baseada em preços conforme se estabelece hoje, tem poucas chances de ser consolidada no cenário brasileiro.

Levando em consideração a importância da RD para evitar investimentos com expansão do sistema, colaborar na resolução dos problemas enfrentados pela inserção das renováveis na matriz elétrica brasileira e contribuir para a segurança e confiabilidade do sistema, é importante que existam políticas de RD baseadas em incentivos. Assim, será possível colocar o devido peso para a RD, remunerando um mercado de flexibilidade e, assim, aumentando a participação dos agentes.

Para trabalhos futuros, sugere-se criar uma metodologia de precificação para a RD considerando o mercado de capacidade, que, embora ainda não exista no Brasil, tem grandes chances de ser implementado nos próximos anos a partir da modernização do setor.

## 5 Bibliografia

ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Norma Brasileira. **NBR 16401-2**: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários, [S. l.], 2008.

BERKELEY LAB. DRQAT-V-3-0-0: **User's Manual**: Manual for Using the Demand Response Quick Assessment Tool in Large Commercial Buildings. California, 2009. Disponível em: <https://buildings.lbl.gov/sites/default/files/drqat-user-manual.pdf>. Acesso em: 20 jul. 2019.

BERKELEY LAB. DRQAT-V-3-0-0: **Engineer's Manual**: Manual for Using the Demand Response Quick Assessment Tool in Large Commercial Buildings. California, 2009. Disponível em: <https://buildings.lbl.gov/sites/default/files/drqat-engineer-manual.pdf>. Acesso em: 30 jul. 2019.

BGE. Batimore Gas and Electric Company. **Peak Time Rebate Batimore Gas and Electric Company**. Maryland, 2014. Disponível em: <https://bgesavings.com/>. Acesso em: 30 mar. 2019.

BLG. Borden Ladner Gervais. **New Opportunities in the Alberta Electricity Market**. Alberta, 2017. Disponível em: <https://blg.com/en/News-And-Publications/Documents/New-Opportunities-in-the-Alberta-Electricity-Market.pdf>. Acesso em: 5 jun. 2019.

BLUM, David H. **Improving the Use of Commercial Building HVAC Systems for Electric Grid Ancillary Services**. 2016. Tese (Doutorado em Arquitetura: Tecnologias de Construção) - Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2016.

BRADLEY, Peter; LEACH, Matthew; TORRITI, Jacopo. **A review of the costs and benefits of demand response for electricity in the UK**. Energy Policy, Massachusetts, ano 2013, v. 52, p. 312-327, Janeiro 2013. DOI 10.1016/j.enpol.2012.09.039. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301421512008142>. Acesso em: 13 mar. 2021.

CCEE. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Coletânea de Legislação Setor Elétrico Brasileiro**: Setor Elétrico Brasileiro. São Paulo, 2009. Disponível em: [https://www.ccee.org.br/portal/wcm/idc/groups/bibpublic\\_juridicoregulatorio/documents/cont\\_eudoccee/ccee\\_031561.pdf](https://www.ccee.org.br/portal/wcm/idc/groups/bibpublic_juridicoregulatorio/documents/cont_eudoccee/ccee_031561.pdf). Acesso em: 12 ago. 2020.

CCEE. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Com quem se relaciona**. São Paulo, 2016. Disponível em: [https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/onde-atuamos/com\\_quem\\_se\\_relaciona](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/onde-atuamos/com_quem_se_relaciona). Acesso em: 12 maio 2020.

CCEE. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Preço Horário "Sombra"**. São Paulo, 2020. Disponível em: [https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos/como\\_ccee\\_atua/precos/preco\\_sombra](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/preco_sombra). Acesso em: 12 dez. 2020.

CCEE. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **Regras de Comercialização: Caderno Algébrico.** São Paulo, 2018. Disponível em: [https://www.ccee.org.br/portal/faces/aceso\\_rapido\\_footer/biblioteca\\_virtual](https://www.ccee.org.br/portal/faces/aceso_rapido_footer/biblioteca_virtual). Acesso em: 6 abr. 2020.

CCEE. Câmara de Comercialização de Energia Elétrica. **1º Relatório de Análise do Programa Piloto de Resposta da Demanda.** São Paulo, 2018. Disponível em: [https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos/resposta\\_demanda](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/resposta_demanda). Acesso em: 30 set. 2020.

D. B. S. de Oliveira et al., "**Analysis of the feasibility of Demand Response on HVAC systems in Brazil: application for the hotel sector,**" 2019 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference - Latin America (ISGT Latin America), Gramado, Brazil, 2019, pp. 1-6, doi: 10.1109/ISGT-LA.2019.8895487.

ENERGY POOL (França). **January 2021: Energy Pool offers significant Demand Response capacity to contribute to grid stability in both France and Japan.** 2021. Disponível em: <https://www.energy-pool.eu/en/energy-pool-offers-significant-demand-response-capacity-to-contribute-to-grid-stability-in-both-france-and-japan/>. Acesso em: 20 abr. 2021.

EPE. Empresa de Pesquisa Energética. **Resposta da Demanda: Conceitos, Aspectos Regulatórios e Planejamento Energético.** [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/resposta-da-demanda-conceitos-aspectos-regulatorios-e-planejamento-energetico>. Acesso em: 20 nov. 2019.

ERCOT. **Demand Response in the ERCOT Markets.** [S. l.], 2011. Disponível em: [https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f24/demand\\_response\\_in\\_the\\_ercot\\_markets\\_mark\\_patterson.pdf](https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/06/f24/demand_response_in_the_ercot_markets_mark_patterson.pdf). Acesso em: 20 out. 2018.

GE, Jing *et al.* **An Overview of the Success Story of Jiangsu Electric's Residential Time of Use Program in China and Related Behavior Changes.** ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, California, 2016. Disponível em: [https://www.aceee.org/files/proceedings/2016/data/papers/6\\_408.pdf](https://www.aceee.org/files/proceedings/2016/data/papers/6_408.pdf). Acesso em: 13 mar. 2019.

HANSEN, Daniel G. *et al.* **Load Impact Evaluation of California Statewide Base Interruptible Programs (BIP) for Non-Residential Customers: Ex-post and Ex-ante Report.** Madison, 2016. Disponível em: [http://www.calmac.org/publications/6\\_Statewide\\_2015\\_BIP\\_Report.pdf](http://www.calmac.org/publications/6_Statewide_2015_BIP_Report.pdf). Acesso em: 11 fev. 2019.

LABEEE. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos climáticos INMET 2012.** Florianópolis, 2012. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw>. Acesso em: 6 maio 2019.

MOTEGI, Naoya; PIETTE, Mary Ann; WATSON, David S. **Introduction to Commercial Building Control Strategies and Techniques for Demand Response.** California, 2007. Disponível em: <https://gaia.lbl.gov/btech/papers/59975.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2019.

MULLER, Glaysson de Melo. **Impacto de Novas Tecnologias e Smart Grids na demanda de longo prazo do sistema elétrico brasileiro**. Orientador: Djalma Mosqueira Falcão. 2016. 222 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <http://www.pee.ufjf.br/index.php/pt/producao-academica/teses-de-doutorado/2016/2016033141--32/file>. Acesso em: 23 abr. 2019.

MINISTÉRIO DO TRABALHO. Norma Regulamentadora. **NBR 17**: Ergonomia (117.000-7), Brasília, 1990.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Consulta Pública nº 33**: Proposta Compilada de Aprimoramento contemplando todas as alterações. Brasília, 2018. Disponível em: <http://antigo.mme.gov.br/web/guest/servicos/consultas-publicas>. Acesso em: 6 mar. 2019.

ONS. Operador Nacional do Sistema Elétrico. **ONS celebra o primeiro contrato de resposta da demanda**. [S. l.], 2018. Disponível em: <http://www.ons.org.br/Paginas/Noticias/20180612-respostademandas.aspx>. Acesso em: 25 mar. 2019.

PINTO, Vera Lúcia Rodrigues. **Reabilitação integrada de um edifício visando a melhoria da qualidade do ambiente interior**. 2014. 148 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Portugal, 2014. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1822/36431>. Acesso em: 23 abr. 2019.

PJM. **Demand Response Operations Markets Activity Report**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.pjm.com/-/media/markets-ops/dsr/2018-demand-response-activity-report.ashx>. Acesso em: 25 maio 2019.

PJM. **Reliability Pricing Model**. [S. l.], 2017. Disponível em: <https://www.pjm.com/-/media/aboutpjm/newsroom/fact-sheets/reliability-pricing-model-fact-sheet.ashx?la=en>. Acesso em: 10 jul. 2019.

POWERSTREAM. **Time-of-Use (TOU) Pricing and Schedules**. [S. l.], 2019. Disponível em: <https://www.powerstream.ca/customers/rates-support-programs/time-of-use-pricing.html>. Acesso em: 30 jun. 2019.

SULLIVAN, FREEMAN & CO. **California Statewide Non-residential Critical peak Pricing Evaluation**. California, 2012. Disponível em: [http://www.calmac.org/publications/2012\\_non-res\\_cpp\\_statewide\\_evaluation\\_-\\_final.pdf](http://www.calmac.org/publications/2012_non-res_cpp_statewide_evaluation_-_final.pdf). Acesso em: 30 abr. 2019.







### APÊNCIDE A – Manual para alterações no *software*

O *software* DRQAT *Demand Response Quick Assessment Tool* (DRQAT) é uma ferramenta de livre uso do desenvolvida e disponibilizada por *Berkeley Lab* e visa auxiliar a análise de estratégias de eventos de Resposta da Demanda (RD) para equipamentos *Heating Ventilation and Air Conditioning* (HVAC).

O *software* foi desenvolvido com base em dados climáticos da América do Norte, sendo assim, foi preciso realizar algumas adaptações em seus arquivos para que as análises fossem feitas no cenário brasileiro. Para isso, foi necessário estudar sua utilização, os dados de entrada e saída e as relações entre os parâmetros adotados. Os manuais do engenheiro e do usuário elaborados pelo próprio desenvolvedor foram constantemente consultados e após diversos testes, foi possível estabelecer uma sequência para mudança dos dados para adaptar o *software* complementemente para uso.

Para replicar os estudos apresentados nesse trabalho, é necessário efetuar as seguintes alterações no *software*:

*Tabela - Alterações feitas no software para adaptar o uso às zonas climáticas no Brasil.*

| Arquivo                         | Pasta         | Alterações   |
|---------------------------------|---------------|--|
| Todos os arquivos de clima .epw | weather       | Buscaram-se arquivos de clima em formato epw para o Brasil. O país foi dividido em 23 regiões para corresponder ao que já existia no programa.                           |
| CLIMATE_ZONES_ZIPCODE.csv       | Input         | Com os dados de todos os CEPs do Brasil, fez-se um arquivo com os CEPs, nome do estado e região climática na qual se encontra.   |
| Hottestdays12.awk               | weather       | Para não considerar os CPPdays, pois no Brasil não existem esses dias críticos, foi alterado o arquivo hottestdays.awk na linha 253<br>if (month>0 && month<13) {cflg=1} |
| city.dat                        | DRQAT-V-4-0-0 | O arquivo foi alterado para conter todos os nomes de cidade relacionados em CLIMATE_ZONES_ZIPCODE.csv, ou seja, todas as capitais do Brasil                              |
| zip.dat                         | DRQAT-V-4-0-0 | O arquivo foi alterado para conter todos os CEPs relacionados em CLIMATE_ZONES_ZIPCODE.csv, ou seja, todos os CEPs do Brasil   |

# Analysis of the feasibility of Demand Response on HVAC systems in Brazil: application for the hotel sector

Débora Batissoco Sanches de Oliveira  
*CERTI Foundation*  
 Florianópolis, Brazil  
 dbo@certi.org.br

Cesare Quinteiro Pica  
*CERTI Foundation*  
 Florianópolis, Brazil  
 cqp@certi.org.br

Bruna Peixoto de Souza  
*CERTI Foundation*  
 Florianópolis, Brazil  
 bps@certi.org.br

Julia Howat da Rosa Rodrigues  
*AES Tietê*  
 São Paulo, Brazil  
 julia.rodrigues@aes.com

Alexandre Monteiro Sanches  
*AES Tietê*  
 São Paulo, Brazil  
 alexandre.sanches@aes.com

Luna Leão Glória  
*CERTI Foundation*  
 Florianópolis, Brazil  
 leg@certi.org.br

Tania Nalborczyk Leites  
*CERTI Foundation*  
 Florianópolis, Brazil  
 tnl@certi.org.br

Indianara Camello  
*CERTI Foundation*  
 Florianópolis, Brazil  
 idc@certi.org.br

Neimar de Almeida Oliva  
*CERTI Foundation*  
 Florianópolis, Brazil  
 nav@certi.org.br

**Abstract**— This article deals with the Demand Response (DR) application on refrigeration equipment for the hotel sector, establishing strategies at various levels of aggressiveness, by taking into account the thermal comfort in the facilities. The simulations are based on DRQAT software adapted to the Brazilian scenario. The analysis consists in a comparison of the results obtained with the electricity price in the short-term market, in order to obtain an estimate of profits from DR, besides establishing a relation between the value of DR per period of application and levels of thermal comfort. In this way, the circumstances in which DR becomes viable for the hotel sector are verified. The result of this analysis indicates that, in order to provide opportunities for supplying DR with maximum efficiency of use of the resource, it is necessary to create mechanisms for load aggregation. Thus, the added flexibility becomes significant in both economic and energy terms.

**Keywords** – Demand Response, thermal comfort, HVAC.

## I. INTRODUCTION

Demand Response (DR) is a new subject in the Brazilian electrical system, having come on high with the launching of the National System Operator (ONS) Demand Response Pilot Project. The regulation for the implementation of this modality in the balancing market is underway and the operationalization is still quite complex, as there are currently no practical cases for an application. The DR of HVAC equipment has a greater chance of adhering to the pilot project since it does not considerably affect the productive process of a participant. Therefore, this case study aims at analyzing the opportunities and limitations for DR participation of refrigeration systems in Brazil, considering energy, climatic, physical and financial factors that may influence this result.

Based on the real data of a hotel business and the routine of its facilities usage, DR strategies were developed, considering the levels of thermal comfort. The free software

DRQAT (Demand Response Quick Assessment Tool), developed and made available by Berkeley Lab, was adapted to the Brazilian climatic conditions and used to analyze the relations between temperature variation and energy consumption. The main objectives of this study are: (i) to allow the implementation and replication of DR strategies and (ii) to show the economic feasibility of them.

In order to present such analysis, section II introduces the initial concepts pertaining to the subject and describes the software used in the simulations. Section III presents the applied case, the characteristics and the limitations for the elaboration of the strategies applied on the selected hotel enterprise. Section IV explains those strategies and their application in the software. Section V shows the results, relating thermal comfort, energy savings and profit simulation, followed by the conclusion, in section VI.

## II. INITIAL CONCEPTS

### A. Refrigeration Equipment

HVAC systems are a very relevant resource for dispatching in response actions of the demand of commercial buildings, because they have great representability in their total electric load. In addition, the possibility of having thermal storage in the internal rooms allows the temporary shutdown of the air conditioning systems without immediate impact to the occupants. In commercial ventures, it is common to have the automation of HVAC systems with centralized temperature control, which is essential for the provision of a reliable response. The use of automation eliminates the need for interaction with a resource operator when a demand response event occurs [1].

### B. Software Demand Response Quick Assessment Tools

The Demand Response Quick Assessment Tool (DRQAT) software is a free tool developed and made available by Berkeley Lab [2]. This software assists the

analysis of DR event strategies for HVAC equipment, considering the load curve, equipment capacity, peak hours of the energy utility, internal ambient temperatures, weather data, building types and location.

The software uses North American weather data and, therefore, some adaptations in its data files were necessary for the simulations to be compatible with Brazilian scenario. For this purpose, after a study of the software's inputs and outputs and with the authorization of the DRQAT software developers, the climate files and the locations of the climatic zones were changed, adapting the software to the Brazilian conditions [3].

### C. Thermal Comfort

The software used in the analysis presents the thermal comfort graphs, and it is possible to verify the consequences of the adopted strategies. According to [4], the measurement of the thermal comfort of the environment uses indexes such as Predicted Percent of Dissatisfied (PPD) and Predicted Mean Vote (PMV), with the purpose of characterizing the user's thermal sensation. The PMV is an index that indicates the satisfaction and dissatisfaction of the environment in the seventh ASHRAE scale [5], classifying the thermal discomfort by low or high temperature. PPD is an index that, related to PMV, indicates the percentage of people thermally dissatisfied with the environment, varying the classification between "very hot" and "very cold". Figure 1 shows the variation curve of the PPD index as a function of the PMV [4].

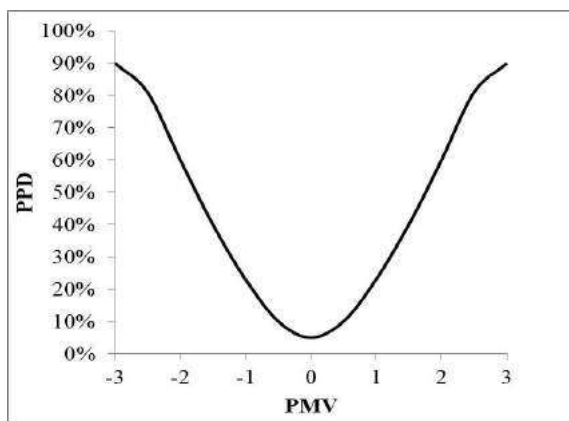


Fig. 1. PPD as a function of PMV.

Thus, the premise is that the number of dissatisfied people does not exceed 50% during the DR event, which means that the PMV index should not be higher than 1.7 in the same period.

### III. APPLICATION

A hotel complex in the city of Sao Paulo – Brazil was selected as a case study for DR strategies simulation and analysis. The complex is located under the concession area of an energy distribution utility which peak hours spans from 18h until 21h.

For this building, all the dependencies in which DR can be performed were analyzed as disaggregated loads, considering the operation hours and the number of people in each room, in order to maintain thermal comfort norms. The main common areas, such as restaurants, the gym, and the

convention center, were considered. The apartments were not included in the simulation since it is not practical for a hotel complex to interfere with the individual thermal comfort of the accommodations, which temperature is controlled by the guests themselves.

Due to the business characteristics and the variation of its load during the seasons, the analysis considers two distinct periods: high season and low season (in the southern hemisphere), the former defined by the months of July, December, January and February and the latter by the remaining months.

For the simulations of HVAC equipment, the software establishes as a premise that the refrigeration was optimally dimensioned for the environment and for the occupation of people, considering that it is not the focus of the software to interfere in energy efficiency projects already implemented, but to simulate DR in buildings.

In order to model the equipment, the inputs were inserted in DRQAT:

- the type of system: water cooled;
- the building dimensions;
- the thermal mass of the building: medium;
- the operational hours of each room;
- the maximum number of people in each room;
- the position of the windows and the lighting schedule;
- data from the chilled water temperature setpoint and the air temperature;
- chillers and fan coils schedules; and
- weather data obtained in [6].

From these software inputs specific to this case study, DR events were simulated.

### IV. STRATEGIES

Among the DR strategies in HVAC equipment described in [7], the techniques listed in Table 1 were chosen because they are the most used in DR events already consolidated in the United States, precisely because they present satisfactory results and do not require great sophistication of control in order to be applied. The schedules elaborated for DR events took into account the peculiarities of the client, aiming to guarantee the standard thermal comfort.

Three strategies were defined: conservative, average and bold. These strategies differ according to the level of thermal comfort reached during the event, and even in the most audacious strategies, it is expected to take into account the results of the PMV and PPD indexes, in order to avoid excessive discomfort. Section IV further explains these strategies.

TABLE I. DR TECHNIQUES FOR HVAC

| Category     | DR techniques                 | Definition  |
|--------------|-------------------------------|---|
| Zone Control | Global temperature adjustment | Increases the zones temperature setpoints for the entire building.  |
|              | Passive thermal               | Decreases the zone temperature setpoints before DR operation in order to store cooling energy in the building mass and increases the zone setpoints to decrease cooling system demand |

| Category | DR techniques | Definition           |
|----------|---------------|----------------------|
|          |               | during the DR event. |

All strategies contemplate 1h of DR. The baselines of load are the same in all simulations, in order to ensure that the results of the savings correspond exactly to the same DR event, in different strategies.

### A. Conservative strategy

The first strategy, based on the global temperature adjustment, is very conservative and consists in turning off the HVAC equipment at 18h, increasing the temperature set point from 22°C to 24°C and the chilled water temperature from 7°C to 9°C. The duration of the DR event for this case is 1h, returning abruptly to the previous levels as soon as the established time ends.



Fig. 2. Schedule for conservative strategy.

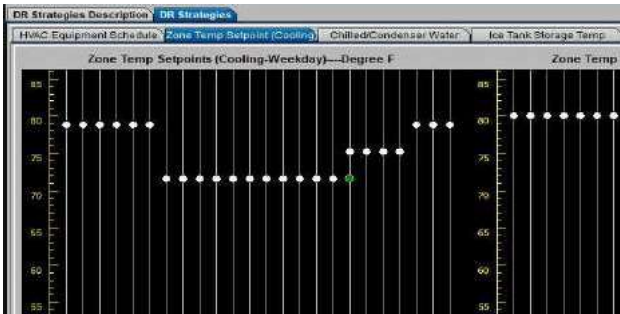


Fig. 3. Air temperature set point for conservative strategy.

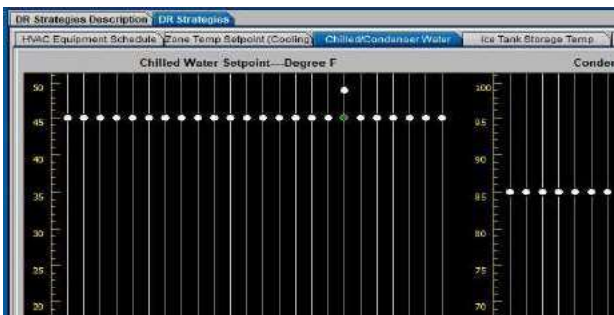


Fig. 4. Chilled water temperature set point for conservative strategy.

### B. Average strategy

The second strategy differs from the previous one by using thermal passive simultaneously with global

temperature adjustment. To force the DR event to take place in one hour – from 18h to 19h – the temperature set point was gradually increased from 17h; the equipment was then switched off at 18h and turned back on at 19h, gradually decreasing the temperature until it reaches the values prior to the event. The temperature variation should be, as well as in the previous strategy, of 2°C, both for the air and for the cold water.



Fig. 5. Schedule for average strategy.

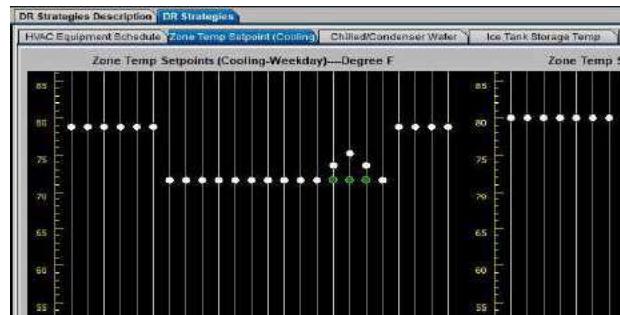


Fig. 6. Air temperature set point for average strategy.

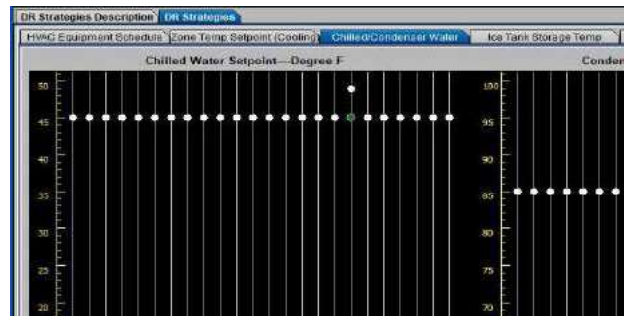


Fig. 7. Chilled water temperature set point for average strategy.

### C. Bold strategy

This conservative strategy aims to leverage DR by turning off the chiller at 20h and keeping it off, increasing the temperature to 24 ° C. The DR will take place from 20h to 21h.



Fig. 8. Schedule for bold strategy.

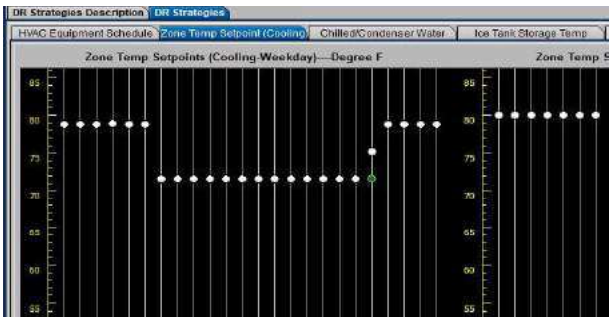


Fig. 9. Air temperature set point for average strategy.

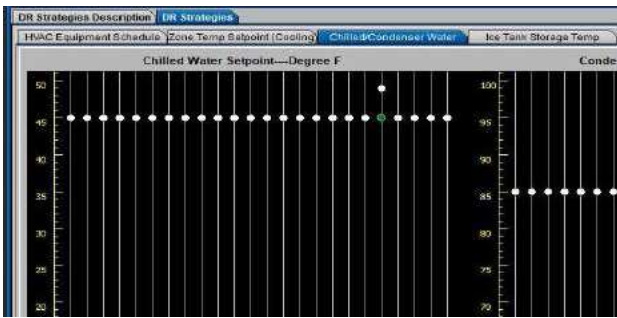


Fig. 10. Chilled water temperature set point for bold strategy.

## V. RESULTS

After applying the aforementioned strategies, the program issues a report that contains energy values and thermal comfort. This section presents the analysis of the compiled results.

### A. Thermal Comfort

For each strategy, there is a graph of thermal comfort, where it is possible to observe the variation of the PMV index throughout the day. For a better comparison of the strategies, Fig 11 shows the overlap of graphs in the same hot day of the year.

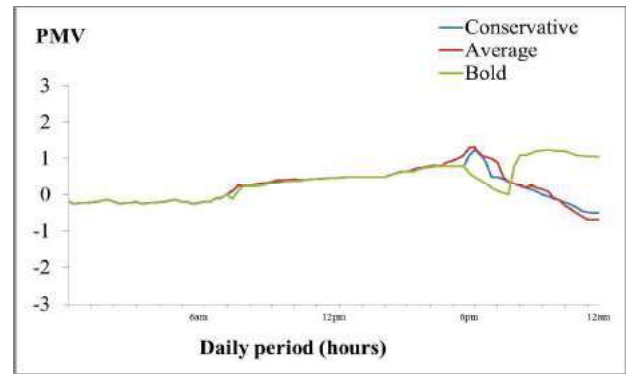


Fig. 11. Results in thermal comfort over the same day for the three strategies

In all the adopted strategies, the thermal comfort did not show great alterations, having reached a maximum point of 1.25, which means a sensation of "slightly warm". Hence, there is scope to implement bolder strategies than the ones developed in this work.

### B. Energy savings

The results in Fig. 12 show that average strategy is the most effective for reducing the load. This strategy still ensures that the load does not increase in the previous moment of the realization of the DR, avoiding more energy expenditure in the total accounting.

The analyses were divided into the low season (March, April, May, June, August, September, October and November) and high season (July, December, January and February) due to differences in climate and occupation of the rooms at these times of the year. On hotter days, the electric charge is higher due to the higher demand of the refrigeration equipment and this has a relation with the relevance of DR events in those days. In this way, the 10 hottest days are presented in the following graph, which brings a mean of the results in energy delivered, accumulated by the simulated environments, for each strategy. The values correspond to a DR event of 1h.

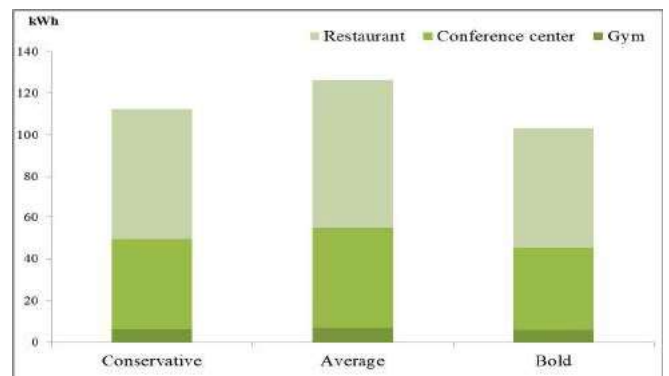


Fig. 12. Simulation results for each of the three strategies by rooms.

The values obtained, summing up the three simulated areas in the hotel development, reach a maximum of 125.2 kWh in average strategy, which represents almost the total load coming from the restaurants and the convention center.

The results generated are in accordance with other simulations using the same software as presented in [8], where for enterprises of similar area, the 1-hour demand

response period presents approximate values of energy savings.

### C. Price Simulation

In order to establish a relationship between the price (in R\$/MWh) ask by a DR bidder and the number of events that would be called by that price, it is possible to simulate operations in the short-term market and verify their viability.

In Brazil, the hourly Difference Settlement Price (PLD) schedule is being tested and will be implemented in 2020, making it possible to carry out transactions through the variation of prices during the day. By taking into account the PLD values of the last month of September, it is possible to establish, during the monthly period, the periods in which the DR would be requested. The following premises are considered:

- Maximum activation of 1h on days in which the PLD is higher than the price demanded by the consumer;
- The DR event would be carried out at the peak hours of the PLD, to maximize the profit obtained.

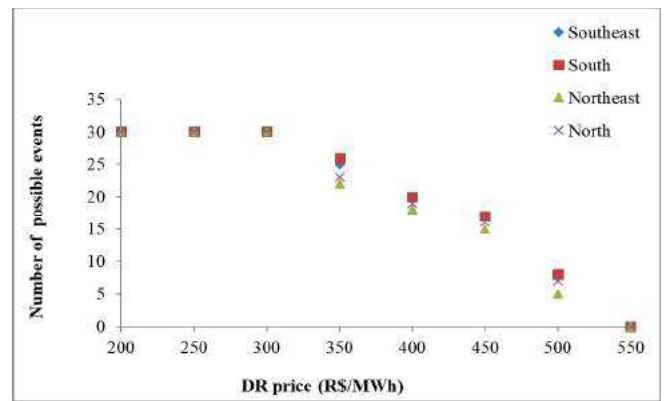


Fig. 14. Monthly frequency of DR events that would be called into action according to their pricing levels.

In order to simulate the profit obtained, two scenarios were established, based on the PLD variation in September of 2018, as shown in Figure 13.

- Worst case: minimum PLD price of R\$ 308.01;

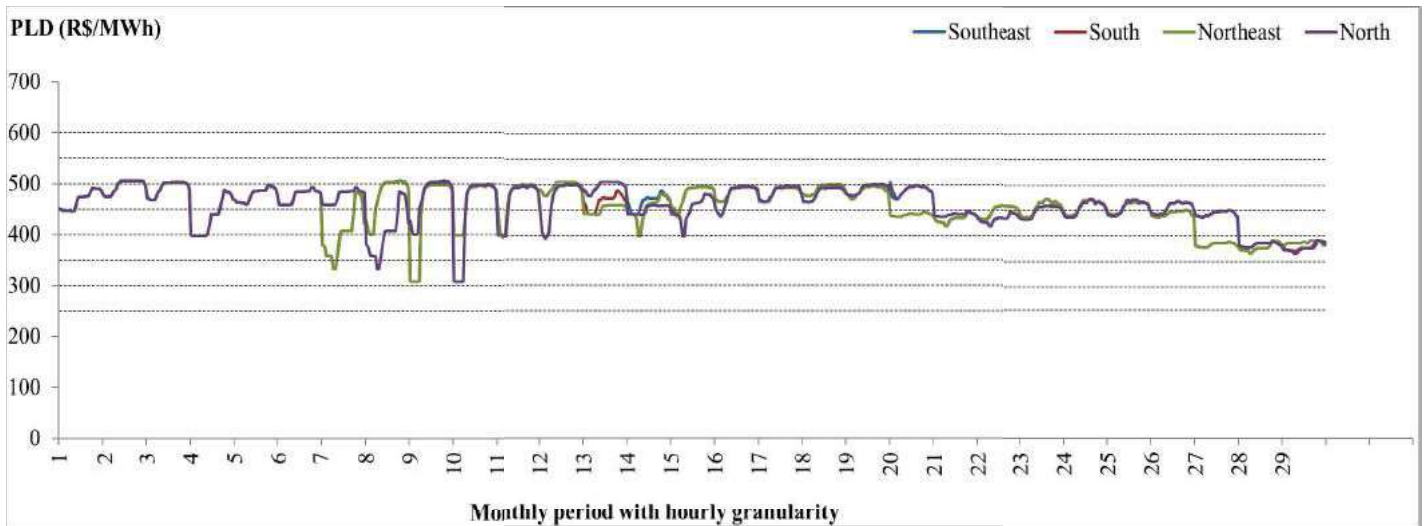


Fig. 13. PLD hourly and pricing levels for the month of September 2018.

- Best case: maximum PLD price of 505.18.

The Brazilian Electric System is divided into four submarkets (South, Southeast, Northeast and North). Each of them concentrates regions of the country where energy circulates freely. The line dividing each submarket is determined by the exchange limits present in the transmission system, that is, electrical constraints in the energy flow between the different regions of the country. Each submarket has a specific PLD and currently the PLD is set weekly, but the hourly PLD is being tested. Figure 13 relates pricing levels and shadow PLD data in September 2018, for all submarkets, establishing a generic function [9].

Analyzing the peaks of the graph in Figure 13 and following the assumptions adopted, the amount of DR events that would be triggered is estimated as a function of the price charged by the consumer to make their load more flexible. Figure 14 lists the DR price and the number of events that would be called.

For this simulation, the DR price started at R\$ 200/MWh, as this is the average energy cost price for long term contracts. This value was obtained from analyzes of average prices of PLD in recent years adjusted for inflation. Thus, the profit obtained by this transaction is given by Equation 1.

$$Profit = PLD - DR_{price} \quad (1)$$

The Table III shows the price simulation results, considering the DR estimate of 125.2 kWh.

TABLE II. ESTIMATION OF REVENUE FOR SEP/2018

| $DR_{price}$<br>(R\$/MWh) | Number of<br>events<br>(Southeast) | Total monthly revenue (R\$) |           |
|---------------------------|------------------------------------|-----------------------------|-----------|
|                           |                                    | Worst Case                  | Best Case |
| 200                       | 30                                 | 405.03                      | 1144.42   |
| 250                       | 30                                 | 217.53                      | 956.92    |
| 300                       | 30                                 | 30.03                       | 769.42    |

| $DR_{price}$<br>(RS/MWh) | Number of<br>events<br>(Southeast) | Total monthly revenue (RS) |           |
|--------------------------|------------------------------------|----------------------------|-----------|
|                          |                                    | Worst Case                 | Best Case |
| 350                      | 25                                 | -131.21                    | 484.93    |
| 400                      | 20                                 | -229.97                    | 262.95    |
| 450                      | 17                                 | -301.72                    | 117.25    |
| 500                      | 8                                  | -191.99                    | 5.18      |
| 550                      | 0                                  | 0                          | 0         |

Exchange August 15, 2019: 1 R\$ = 0.25 USD

It is important to highlight that negative values mean that the transaction results in damage, as the DR price is less than the PLD.

Applying the results obtained in the hotel sector, even in the best case, the individual revenues obtained from participation in DR events are not yet attractive from the economic point of view for participation in the energy market.

## VI. CONCLUSIONS

Considering the results obtained, the DR of HVAC equipment, considering DR for sale in the energy market, is not yet economically viable in the current scenario in Brazil, since the profitability generated by the participation in such events is not sufficiently significant to the consumer.

However, with the evolution of other markets in Brazil, such as capacity and balancing markets, the DR of these types of equipment becomes more attractive. With the evolution of these markets, this type of program no longer has a purely economic bias on the part of the consumer and becomes a product of security and reliability of the system, having its value measured not only by the energy saved but by the disconnected load.

In addition, this work allowed the research team to conclude that in order to provide opportunities for DR supply, an essential resource to make energy use more efficient, it is necessary to create load aggregation mechanisms, so that added flexibility becomes significant both in terms of energy and economy.

## ACKNOWLEDGMENT

The authors thank the Research Program and Technological Development of the electricity sector regulated by ANEEL and AES for the financial support to the project. This paper is related to the project "Virtual Power Plant AES with Focus on Large Clients Aggregation and Energy Market: Platform Development, Pilot Deployment and Business Modeling" under 0064-1051/2017 ANEEL.

## REFERENCES

- [1] A. G. Zamani, A. Zakariazadeh e S. Jadid, "Day-ahead resource scheduling of a renewable energy based virtual power plant" in *Applied Energy*, vol. 169, n. 1, p. 324–340, 2016.
- [2] Berkeley Lab. "DRQAT-V-3-0-0: Engineers Manual". [Online]. Available: <https://drcc.lbl.gov/tools/demand-response-quick-assessment-tool-drqat>.
- [3] Berkeley Lab. "DRQAT-V-3-0-0: User's Manual - Manual for Using the Demand Response Quick Assessment Tool in Large Commercial Buildings". [Online]. Available: <https://drcc.lbl.gov/sites/default/files/drqat-user-manual.pdf>.
- [4] Pinto, Vera Lúcia Rodrigues. "Reabilitação Integrada de um Edifício Visando a Melhoria da Qualidade do Ambiente Interior," Master dissertation, Escola de Engenharia, Universidade do Minho, 2014.
- [5] ASHRAE. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Guideline, Measurement of Energy and Demand Savings. 2002.
- [6] UFSC, LabEEE. Arquivos climáticos. *Laboratório de Eficiência Energética em Edificações*. [Online]. Available: <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/formato-epw>
- [7] Motegi, Naoya, Piette, Mary Ann e Watson, David S. (2007, May). Introduction to Commercial Building Control Strategies and Techniques for Demand Response. [Online]. Available: <http://gaia.lbl.gov/btech/papers/59975.pdf>.
- [8] Yin, Rongxin. (2008, Nov). Auto-DR and Pre-cooling of Buildings at Tri-City Corporate Center. [Online]. Available: <https://drcc.lbl.gov/publications/auto-dr-and-pre-cooling-buildings-tri>.
- [9] CCEE (2018, Sep). Preço horário sombra. [Online]. Available: [https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos/como\\_ccee\\_atua/precos/preco\\_sombra](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/como_ccee_atua/precos/preco_sombra).
- [10] CCEE, (2017, Dec). InfoMercado Boletim nº 126. [Online]. Available: [https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/o-que-fazemos/infomercado](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/o-que-fazemos/infomercado).
- [11] ANEEL (2017). Sistema de Informações Geográficas do Setor Elétrico-SIGEL. [Online]. Available: <https://sigel.aneel.gov.br/>.