



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

**Estudo de modelo de resposta à demanda
Em tempo real com Smart-grids**

Nayron Henrique Da Silva Lima Goncalves

Brasília, 30 de junho 2017

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB

FACULDADE DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
Faculdade de Tecnologia
Departamento de Engenharia Elétrica

Nayron Henrique Da Silva Lima Gonçalves

Estudo de modelo de resposta à demanda Em tempo real com Smart-grids

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade de Brasília como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovado por

**Prof. D. SC. Pablo Eduardo Cuervo Franco, UnB/ENE
Orientador**

**Prof. D. Sc. Rafael Amaral Shayani, UnB/ENE
Examinador interno**

**Prof. D. Sc. MarcoAntonio Freitas do Egito Coelho, UnB/ENE
Examinador interno**

Brasília, 30 de Junho 2017

FICHA CATALOGRÁFICA

Da Silva Lima Goncalves, Nayron Henrique

TÍTULO TÍTULO e Subtítulo. [Distrito Federal] 2016.

N.Romano,número de páginas (arábicos) p. (ENE/FT/UnB, Graduação, Engenharia Elétrica, 2017).

Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Elétrica.

1. - Respostade Demanda
2. - Smart-Grids

I. ENE/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

Gonçalves , N.H. (2017). Estudo de modelo de resposta à demanda em tempo real com smart-grids. Trabalho de Conclusão de Curso, Publicação, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, n.79.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Nayron Henrique Da Silva Lima Goncalves

TÍTULO DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO: Estudo de modelo de resposta à demanda em tempo real com smart-grids

GRAU/ANO: Graduação em Engenharia Elétrica/2017.

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta monografia do Trabalho de Conclusão de Curso e emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta monografia do Trabalho de Conclusão de Curso pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Nayron Henrique Da Silva Lima Goncalves
Endereço
Email: Nayron.ene@gmail.com

Dedicatória

Dedico este trabalho ao meu pai Josemir, por tudo que fez por mim. Pelas broncas que me deu, pelos conselhos e por sempre acreditar em mim mesmo quando eu não acreditava em mim mesmo.

Nayron Henrique da Silva Lima
Gonçalves

Agradecimentos

Meus agradecimentos:

Primeiramente à Deus, pelo dom da vida, que me deu forças, sabedoria para chegar a lugares que nunca imaginei pode chegar e por sempre guiar meus passos no caminho certo me abençoando e me ensinando a ser uma pessoa melhor a cada dia e ao meu querido são Jorge, por me proteger dos perigos da vida.

Ao meu pai Josemir e minha vó, por terem me proporcionados meios de chegar até aqui. Também agradeço a todos familiares pelo apoio que foi me dado.

À minha namorada Kristen pela ajuda, amor, conselhos e companheirismo em todos os momentos.

Ao Professor Pablo Cuervo pela ajuda, confiança, paciência durante todo este tempo, pelas ideias e por ter me ajudado a gostar de programação.

Aos meus dois grandes amigos que são como irmãos Roberto (soldado) e Leônidas(mr.Lions) por sempre me motivarem desde ensino fundamental e por sempre estarem do meu lado até nos momentos mais difíceis.

Ao amigos que fiz na elétrica , pois sem vocês a elétrica seria um lugar mais sofrido do que é hoje.

Ao departamento de Engenharia Elétrica e seus funcionários em geral que sempre estão a disposição para ajudar.

E agradeço todas as dificuldades que enfretei e enfreto; não fosse por elas, eu não teria saído do lugar. As facilidades nos impedem de caminhar. Mesmo as críticas nos auxiliam muito.

Nayron Henrique Da Silva Lima Gonçalves.

RESUMO

Smart grid é uma nova área de pesquisa que vem crescendo muito nos últimos anos e que inclui operações de otimizações confiáveis para picos e baixas de energia, de modo que a geração venha atender demanda ou a demanda se ajustar aos níveis de energia disponíveis. Este trabalho apresenta um modelo de otimização linear, para ajustar o consumo de energia de um dado consumidor com relação ao preço desta energia bem como a demanda e a oferta da energia variando durante o dia. O objetivo do modelo é maximizar a utilidade do consumidor, sujeito a restrições de consumo diário: quantidade de carga disponível durante as horas do dia, limites para variações da energia e variações no preço da energia. São apresentados os modelos lineares analisados de energia e de demanda do problema e, utilizando o GAMS uma ferramenta computacional, são apresentados os resultados dos testes realizados para diferentes casos. Além disso, ao final é proposto um modelo que apresenta mais restrições, que utiliza otimização robusta, para trabalhos futuros.

Palavras-chave: comunicação bidirecional, resposta à demanda, preço em tempo real, otimização, smart-grids.

ABSTRACT

Smart-grids is area of research that has grown in the last year which includes optimum reliable operation for power peaks and lows, so that the generation may be able to dealing with demand or the demand may be able to adjust to the power level available. This work presents an optimization linear model to adjust the available energy levels, to adjust the consumption of energy of a given consumer in relation to the fluctuating cost of the energy throughout the day. Analyzed linear models of energy and demand of the problem are presented, and using the GAMS a computational software, General Algebraic Modeling System, the results of different tests are presented. In addition, a robust optimization model for future work is proposed at the end.

Keywords: Bidirectional communication, demand response, real time-pricing, optimization, smart –grids.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 MOTIVAÇÃO	2
1.3 OBJETIVO DO TRABALHO	3
1.4 JUSTIFICATIVA	4
1.5 CONTRIBUIÇÕES	4
1.6 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	5
2. MODELO	6
2.1 CONCEITO	6
2.2 MODELAGEM MATEMÁTICA	8
2.3 MODELOS DE RESPOSTA À DEMANDA E ENERGIA EM TEMPO REAL.....	9
2.4 MODELO DE RESPOSTA À DEMANDA EM TEMPO REAL.....	11
2.5 MODELO DE RESPOSTA À ENERGIA EM TEMPO REAL.....	13
3. ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO	15
3.1 MÉTODOS DE SOLUÇÃO	15
3.2 FERRAMENTA COMPUTACIONAL GAMS	16
3.3 ALGORÍTIMO RESPOSTA À DEMANDA.....	17
3.4 ALGORÍTIMO RESPOSTA À ENERGIA.....	19
4. ESTUDO DE CASOS	21
4.1 CASOS DO MODELO DE RESPOSTA À DEMANDA COM SMART GRID EM TEMPO REAL	21
4.1.1 Teste e Resultados 1	21
4.1.2 Teste e Resultados 2.....	24

4.1.3	Teste e Resultados 3	26
4.1.4	Teste e Resultados 4	27
4.1.5	Teste e Resultados 5	29
4.1.6	Teste e Resultados 6	31
4.1.7	Teste e Resultados 7	34
4.2	CASOS DO MODELO DE RESPOSTA À ENERGIA COM SMART GRID EM TEMPO REAL	36
4.2.1	Testes e Resultados 1,2 e 3.....	37
4.2.4	Teste e Resultados 4	40
4.2.5	Teste e Resultados 5	41
4.2.6	Teste e Resultados 6	43
4.2.7	Teste e Resultados 7	46
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
5.1	CONCLUSÃO	50
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	53
	APÊNDICES...	56
	APÊNDICE A. TABELA DE PREÇOS.....	56
	APÊNDICE B. Código do modelo de resposta à demanda com smart grid em tempo real.....	57
	APÊNDICE B. 1 Código do modelo de resposta à energia com smart grid em tempo real.....	63

LISTA DE FIGURAS

2.1 -Funções dos índices de tempo t e h no modelo de otimização de resposta à demanda.....	12
2.2 Funções dos índices de tempo t e h no modelo de otimização de resposta à energia.....	14
3.1 fluxograma do algoritmo da resposta à demanda.....	17
3.2 fluxograma do algoritmo da resposta à energia.....	19
4.1-Preço do modelo de resposta à demanda.....	22
4.2 Custo minimizado do modelo de resposta à demanda teste 1.....	23
4.3 -consumo de energia do modelo de resposta à demanda teste 1.....	23
4.4 -Custo minimizado do modelo de resposta à demanda teste 2.....	25
4.5 - Consumo do modelo de resposta à demanda teste 2.....	25
4.6 -Custo minimizado do modelo de resposta à demanda teste 3.....	26
4.7 - Consumo do modelo resposta à demanda teste 3.....	27
4.8 -Custo minimizado do modelo de resposta à demanda teste 4.....	28
4.9 – Consumo do modelo resposta à demanda teste 4.....	29
4.10 -Custo minimizado do modelo resposta à demanda teste 5.....	30
4.11 -Consumo do modelo resposta à demanda teste 5.....	31
4.12-Preço do modelo resposta à demanda teste 6.....	32
4.13-Custo minimizado do modelo resposta à demanda teste 6.....	33
4.14- Consumo do modelo resposta à demanda teste 6.....	33
4.15-Preço do modelo de resposta à demanda teste 7.....	34
4.16-Custo minimizado do modelo resposta à demanda teste 6.....	35
4.17- Consumo do modelo resposta à demanda teste 7.....	35
4.18 - Preço da modelo resposta à energia.....	37
4.19- custo minimizado do modelo de resposta à energia testes 2.1, 2.2,2.3.....	38
4.20- Consumo do modelo de resposta à energia testes 2.1, 2.2,2.3.....	39

4.21- custo minimizado do modelo de resposta à energia teste 2.4.....	40
4.22- Consumo do modelo de resposta à energia teste 2.4.....	41
4.23- custo minimizado do modelo de resposta à energia teste 2.5.....	42
4.24- Consumo do modelo de resposta à energia teste 2.5.....	43
4.25 - Preço do modelo de resposta à energia teste 2.6.....	44
4.26 - custo minimizado do modelo de resposta à energia teste 2.6.....	45
4.27 consumo do modelo de resposta à energia teste 2.6.....	45
4.28 - Preço do modelo de resposta à energia teste 2.7.....	46
4.29 - custo minimizado do modelo de resposta à energia teste 2.7.....	47
4.30 - Consumo modelo de resposta à energia teste 2.7.....	48

LISTA DE TABELAS

4.1- dados do consumidor teste 1.1.....	22
4.2 - dados do consumidor teste 1.2.....	24
4.3 - dados do consumidor teste 1.3.....	26
4.4 - dados do consumidor teste 1.4.....	28
4.5 - dados do consumidor teste 1.5.....	30
4.6 - dados do consumidor teste 1.6.....	32
4.7 - dados do consumidor teste 1.7.....	34
4.8 - dados do consumidor teste 2.1,2.2,2.3.....	37
4.9 - dados do consumidor teste 2.4.....	40
4.10- dados do consumidor teste 2.5.....	42
4.11- dados do consumidor teste 2.6.....	44
4.12- dados do consumidor teste 2.7.....	46

1. INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A energia elétrica é um bem de grande importância para sociedade, e seu desenvolvimento é crucial para a prosperidade de um país. Desde meados do século XIX, muitos estudiosos tentaram obter luz utilizando a eletricidade, sendo Thomas Alva Edison o primeiro a concretizar este objetivo, criando uma lâmpada elétrica que, de fato, funcionou.

Entretanto, passados mais de cem anos do começo da utilização da energia elétrica pelos consumidores, o modo pela qual é feita a distribuição da energia sofreu poucas mudanças. Isso se dá pois os sistemas atuais de geração de energia elétrica possuem grande necessidade de fontes não muito diversas em certas partes do mundo para geração da energia elétrica, proporcionando uma maior possibilidade de falhas no fornecimento ao consumidor, níveis altos de roubo de energia e prejuízos para as unidades geradoras e consumidoras.

No entanto, esta realidade vem mudando nos últimos anos com a criação das redes elétricas inteligentes, conhecidas popularmente como smart-grids (SMARTGRIDS).

De acordo com (MORAIS, 2010)

Smart Grid é uma rede inteligente de eletricidade que pode integrar o comportamento e as ações de todos os usuários conectados a ele -geradores, consumidores e aqueles que fazem as duas coisas- a fim de garantir fornecimento de energia elétrica de forma eficiente, sustentável, econômica e segura.

Muito tem sido falado e escrito sobre as redes inteligentes as smart-grids . Dentre os vários temas temos a análise da capacidade -utilizando o gerenciamento pelo lado da demanda (CHAMBERLING, 1987), (GROUP)-, melhorias no controle de geração de energia (WOLLENBERG, 2005) e seus benefícios associados por exemplo, habilitação da infraestrutura para integrar grandes quantidades de energia renovável (SHORT, 2009), (VITTAL, 2010).

Contudo, não se pode esquecer que a resposta da demanda é um dos maiores surgimentos que se obteve com o advento e desenvolvimento das redes inteligentes, pois tem como intuito a redução dos picos de demanda e, por conseguinte, dos custos de transmissão e de geração da energia elétrica. Nos sistemas elétricos, não existe uma área para o armazenamento da energia elétrica pronta para consumo e os parques elétricos devem ser projetados para suprir uma demanda maior do que a necessária. No mundo, as fontes de energia estão ficando cada vez mais escassas, logo, um aumento da eficiência do sistema elétrico é algo muito visado pelos gestores de políticas energéticas e por aqueles que detêm o poder de tomar decisões .

Sendo a energia elétrica classificada como commodity, ela está exposta a variações do seu valor conforme a oferta, demanda e disponibilidade de matéria prima para sua produção. Mas, em maior parte, as tarifas energéticas são inerciais, ou seja, não alteram seus valores no decorrer do dia ou do mês. Um desenvolvimento na troca de informações entre o provedor e o consumidor final ajudará ambas as partes nesta dinâmica de mercado, na qual há possibilidade de regulação da tarifa energética no decorrer do dia, proporcionando maior eficiência e menos gastos.

1.2 MOTIVACÃO

O setor elétrico, por muitos anos, não evoluiu tecnologicamente em comparação com outros setores, como o setor de telecomunicações. Existe, então, um forte interesse no aprimoramento dos sistemas de energia elétrica, de forma a melhorar a troca de informações entre a concessionária e o consumidor, para que se obtenha uma relação mais adequada entre oferta da concessionária e demanda do consumidor.

Pesquisas sobre como melhorar a troca de informação na rede, de forma a aprimorar a oferta e a demanda, nem sempre levam em consideração fatores como variações do preço da energia, variações da demanda e da oferta. Apesar desse aspecto negativo, muitas transformações vêm ocorrendo em diferentes áreas de geração, transmissão e distribuição, ocasionando um aumento na eficiência para os consumidores.

Com base no modelo energético brasileiro, há três pilares principais, como é explicado pela (ONS): proporcionar a segurança do fornecimento de energia elétrica, proporcionar o

controle da tarifa e proporcionar a introdução social no Setor Elétrico Brasileiro, em especial por meio do programa chamado de universalização de atendimento.

Com base em modelos matemáticos e softwares de otimização, é possível prever variações no preço da energia, bem como variações na demanda utilizando programação de dinâmica Estocástica Bellman (BELLMAN, 1952) e, simultaneamente, definir os melhores parâmetros para aprimorar a demanda e oferta para o consumidor. Assim, há a necessidade de novos modelos capazes de gerar melhorias no sistema energético, verificando a possibilidade de inclusão ou de retirada de fatores que possam afetar a rede energética e o consumidor final.

1.3 OBJETIVO DO TRABALHO

Um programa de resposta à demanda possui seis objetivos segundo (GELLINGS, 1985), os quais são: atenuação dos picos, variação nas curvas de carga, preenchimento de vales de demanda, preservação estratégica, crescimento estratégico bem como levantamento de curvas de cargas flexíveis. Logo, avaliar os impactos da smart-grid na demanda, em termos de energia disponível e demanda máxima, com base em simulações. Utilizar o processo de Real-time pricing, que, de acordo com (BORENSTEIN, 2005), na pré determinação em tempo real, os compradores devem pagar preços que, em um período de tempo, sejam de fato reflexo da disponibilidade de oferta e demanda do sistema. Realizar teste para obter resultados dos dois modelos determinísticos que serão analisados: o modelo de demanda que visa variação nas demandas e o modelo de energia que visa a variação da energia disponível. Com base nos modelos de energia e demanda que serão utilizados, analisar mudanças em seus parâmetros e levantar as respostas necessárias para um melhor entendimento da dinâmica de resposta à demanda utilizando smart-grids.

1.4 JUSTIFICATIVA

O uso de smart-grid relacionada à resposta à demanda energética é um tema novo e que possui muitas alternativas de pesquisas em diversas áreas. As pesquisas que vêm sendo feitas, entretanto, visam avaliar o impacto da smart-grid na rede elétrica utilizando diferentes parâmetro e fatores.

Ainda há muitas alternativas de pesquisas utilizando novos modelos de otimização para medir o real impacto da smart-grid no sistema energético, que podem ser mais eficientes que os que já foram testados.

O presente trabalho, por sua vez, visa estudar as consequência no controle de oferta, de demanda e de energia elétrica, de modo a se obter uma maior eficiência energética. Faz-se o uso de programação dinâmica Estocástica (SIQUEIRA, ZAMBELLI, *et al.*, 2006), que proporciona uma otimização da função objetivo do modelo adotado, baseado em sequências lógicas de decisões controlados ao longo de todo o horizonte de tempo adotado no projeto.

1.5 CONTRIBUIÇÕES

Esse trabalho visa contribuir para o estudo da tecnologia smart-grids com relação à resposta da demanda em tempo real. São apresentados os modelos matemáticos de energia e demanda que foram utilizados nas tomadas de decisões, considerando-se que o principal objetivo é a minimização da utilidade do consumidor (despesa do consumidor), ou seja, as variações na demanda, energia disponível e parâmetros de restrição que auxiliam na execução do trabalho.

São apresentados dois modelos de programação dinâmica estocástica, que consideram na função objetivo variações na energia, na demanda, e em seus preços ao longo do dia. Avalia-se, também, a possibilidade de estudos futuros, utilizando os modelos e variáveis que serão apresentadas nos próximos capítulos.

O modelo de energia que já foi citado e que será apresentado é um modelo inicial, que proporciona uma análise diferente do modelo base que é o modelo envolvendo a demanda. Apesar de inicial, a formulação apresentada tem como principal objetivo, apresentar uma

forma alternativa, diminuindo o esforço computacional. O modelo de energia, apesar de não envolver a demanda, dá uma base para entender de forma mais precisa o efeito da resposta à energia em tempo real com smart-grids (HOLLAND, 2006). O presente trabalho possibilita continuação em trabalhos futuros, aprimorando os modelos que são explicados nos próximos capítulos.

1.6 ORGANIZACÃODO TRABALHO

O capítulo 2 apresenta uma explanação dos conceitos teóricos de resposta à demanda e smart grids, bem como os modelos que são utilizados e os diferentes casos que podem ser utilizados.

O capítulo 3 detalha a metodologia utilizada, explicando os passos para obtenção dos resultados. Os resultados foram obtidos com a utilização do software computacional GAMS.

No capítulo 4, faz-se a análise de casos para cada modelo apresentado neste trabalho.

O capítulo 5, por fim, traz as conclusões do trabalho desenvolvido e também são sugeridos temas para continuidade em trabalhos futuros.

2. MODELO

2.1 CONCEITO

De forma geral, seja qual for a infraestrutura que permite o acontecimento de um congestionamento, devido a alta quantidade de usuários, ela está sujeita à aplicação da resposta à demanda e resposta à energia. O principal foco destes dois tipos de programa, resposta à demanda e resposta à energia, é diminuir a sobrecarga do sistema em momentos de alto consumo

Podemos citar vários exemplos de aplicações de resposta à demanda ou resposta à energia, como, por exemplo, é possível citar os rodízios de carros (CET) , que acontecem nas grandes cidades, com o intuito de diminuir a demanda pela infraestrutura das vias nos momentos em que os valores das multas são mais altos, para os veículos que estão fora do dia permitido do rodízio. O mecanismo de aplicar multas em motorista visa diminuir o engarrafamento nas vias.

Um outro exemplo são as companhias telefônicas, que definem preços mais baixos para períodos do dia de menor quantidade de uso e preços mais altos para as ligações feitas em momentos onde há uma alta taxa de utilização do serviço. Esse aumento no preço tem por objetivo mover os momentos de alto consumo para os momentos de baixo consumo. Da mesma forma, os hotéis também influenciam a demanda das suas acomodações, fazendo flutuações nos preços para períodos de alta e baixa temporada, com o intuito de equilibrar a quantidade de quartos oferecidos com a demanda do consumidor (SILVA, 2013).

No entanto, com o advento dos milhares de tendências que surgiram com a evolução da automação das redes elétricas foi possível fazer a implementação de sistemas de comunicação entre usuários e a concessionária em tempo real, o que é caracterizado por smart-grids. A resposta à demanda vem ganhando mais espaço nas concessionárias de energia elétrica e Albadi (ALBADI, 2007) define que a resposta à demanda são mudanças que ocorrem nos padrões de consumo dos consumidores finais em consequência das oscilações dos preços durante o dia. Ou seja, é uma ferramenta que tem como objetivo alterar o perfil da demanda de energia durante um período específico de alta demanda, de forma a aumentar a qualidade e a segurança da rede, evitando quedas de energia devido a falhas do sistema.

Pesquisas de como implementar programas de resposta à demanda no setor elétrico não é um tema recente . De acordo com Campos (CAMPOS, 2004), ao final do século XIX na cidade de Nova York, Thomas A. Edison Pearl Street iniciou a criação de equipamentos e serviços elétricos para utilização durante o dia, visando o aumento da utilização e do fator de carga das matrizes geradoras de energia, ocasionando uma diminuição dos custos vindos da eletricidade. No século XIX, a eletricidade era usada quase que exclusivamente para iluminação das ruas durante a noite. Em meados dos anos 80, Gellings (GELLINGS, 1985) já tratava sobre os conceitos de resposta à demanda, visando diminuir o momentos de maior utilização de energia, por meio de gerenciamento de energia disponível ao consumidor , uma outra solução para a resposta à demanda.

Há diferentes formas de realizar o gerenciamento de resposta à demanda. Vale citar as três mais usadas: Real-time pricing, Time-Of-use e critical Peak pricing. Neste trabalho, foi utilizado a Real-time pricing, que, segundo USDE (USDE, 2006), é definida como um valor no qual o preço da energia flutua a cada hora do dia, levando à mudanças no preço do atacado, possibilitando que os consumidores finais sejam notificados com antecedência sobre os preços . Para Souza (SOUZA, 2010) , o tipo de tarifação do Real-time pricing permite aos consumidores receberem o incentivo de alterar suas demandas de energia durante todo o dia, ajudando o equilíbrio de todo o mercado consumidor e por conseguinte, há um aumento da estabilidade do sistemas, pois há diminuição dos altos picos de energia. Mas, como é falado por Lafferty (LAFFERTY, 2001), os usuários não gostam de riscos, logo, o programa de Real-time pricing poderia conter mecanismos de controle para controlar as flutuações nos preços durante o dia.

2.2 MODELAGEM MATEMÁTICA

Para se ter a resolução de um problema na engenharia, é preciso entender como se faz a implementação de dois processos sequenciais: a modelagem matemática, que é um modelo que vai ser utilizado, e a técnica que vai ser empregada para achar a solução do modelo matemático empregado. A modelagem matemática visa demonstrar apropriadamente o problema real, por meio de técnicas de soluções disponíveis para se obter a solução desejada. Habitualmente, à medida que melhorias são implementadas no modelo matemático do problema real, a técnica de solução aplicada vai se tornando mais complexa. Desta maneira, é preciso ter um comprometimento entre a modelagem matemática escolhida e a técnica de solução, para que se possam empregar os recursos computacionais cabíveis, ou seja, dentro das limitações computacionais.

O planejamento do estudo de modelos de resposta à demanda em tempo real com Smart-grids é um problema bem discutido no setor elétrico e que vem sendo muito estudado. Seu principal objetivo é a otimização no consumo de energia e, para se chegar à tal meta, é necessário realizar o gerenciamento pelo lado da demanda.

As principais bases para as decisões tomadas referentes a resposta à demanda e a resposta à energia, são a minimização da função objetivo, que visa fazer uma otimização da energia ou da demanda, com a tomada de sequências de decisões. Esta minimização da função objetivo é feita utilizando programação dinâmica estocástica, que consiste em uma técnica matemática desenvolvida por Richard E. Bellman (BELLMAN, 1952), com a qual são tomadas sequências de decisões ou faz-se o uso de controle durante o horizonte de tempo analisado. Bertsekas (BERTSEKAS, 2005) explica que uma concepção principal das decisões sequenciais é que elas não podem ser avaliadas isoladamente. Assim sendo, a programação dinâmica busca alcançar a negociação entre a vontade de se obter um custo baixo e as consequências para o sistema de custos indesejáveis mais expressivos para o futuro.

Com relação ao horizonte de tempo analisado, o estudo dos modelos de resposta à demanda em tempo real com smart-grids e de resposta à energia em tempo real com smart-grids, podem ser realizados em apenas um instante de tempo ou estágio, modelo designado estático que é o momento de decisão na programação dinâmica. Este estágio para um único momento de tempo não necessita obrigatoriamente estar ligado ao tempo cronológico,

entretanto esse estágio de tempo sempre caracteriza um horizonte de tempo. Ainda existe a oportunidade de realizar o modelo de resposta à demanda em tempo real com smart-grids e o modelo de resposta à energia em tempo real com smart-grids para todo o horizonte de tempo, a qual é definida como um estudo dinâmico, dividindo a análise em vários tempos os multiestágios, o qual será emprego neste trabalho.

No modelo de resposta à demanda em tempo real com smart-grids e de resposta à energia, levamos em consideração os estados, que são as soluções possíveis de serem alcançadas em determinado estágio. Estes estados, tem o papel de representar toda a informação passada que é importante para otimização futura da função objetivo (KIRK, 1970), levando em consideração as informações de entradas ao sistema para $t \geq t_0$.

Entretanto, podem ocorrer incertezas em relação às soluções obtidas para o horizonte de tempo analisado. Algumas dessas incertezas devem ser consideradas, para tornar a solução do problema mais próxima da realidade. Pela programação dinâmica estocástica, pode-se dividir o problema em vários casos, desta forma, fazendo o estudo de cada caso, é possível achar soluções diferentes e utilizar as incertezas para auxiliar na solução do problema.

Porém, neste trabalho consideramos o preço da energia um parâmetro dado, logo foi utilizado a programação determinística dinâmica, pois os parâmetros de entrada para o modelo são valores já conhecidos a priori, logo não há possibilidades de aparecerem cenários com valores diferentes.

2.3 MODELOS DE RESPOSTA À DEMANDA E ENERGIA EM TEMPO REAL

Os modelos são considerados para um horizonte diário de 24 h que abrange os períodos $t - 1$ antes da hora atual, a hora atual t , e $24 - t$ seguidas após a hora atual.

É importante destacar que:

1. Os preços e decisões para o consumo de energia por hora e níveis de demanda para o modelo de demanda e os níveis de energia para o modelo de energia para as primeiras $t - 1$ horas são conhecidas.
2. O preço para a hora atual é conhecido a Priori da hora atual e também a demanda do consumidor para o modelo de demanda e a energia para o modelo de energia no início desta hora, mas não o seu consumo de energia, que precisa ser determinado e informado à companhia energética.
3. Os níveis preliminares do consumo de energia para as $24 - t$ horas, são variáveis a serem determinadas.
4. A incerteza do preço horário para $24 - t$ horas é modelado usando um valor determinado, entretanto para sistemas estocásticos, se faz o uso de uma previsão e um intervalo de certeza, ao redor de tal valor de previsão. Técnicas de previsão são usadas para calcular o intervalo de confiança (D. PENÃ, 2001)

Para a tomada de decisão em cada horário, é considerado o horizonte de planejamento para $24 - t$ horas descrito acima, que permite calcular com base nas restrições que serão apresentadas ainda neste capítulo, os níveis de consumo para hora atual e para seguintes horas. No entanto, apenas o consumo atual, ou seja, na hora atual é realmente “usado” e enviado ao fornecedor de energia, como consumo real naquela hora. De forma mais ilustrativa, o modelo para todo o horizonte de tempo de $24 - t$ horas é usado como uma base para obter o consumo ideal para a hora atual t a ser transmitida ao consumidores. Os modelos considerados podem ser traduzidos em um problema de programação dinâmica, que fornece um procedimento ordenado para obter a combinação de decisões que maximiza a eficiência do problema. Dessa maneira, a programação dinâmica lida com sistemas dinâmicos, ou seja, aqueles que variam no tempo (SIQUEIRA, ZAMBELLI, *et al.*, 2006).

2.4 MODELO DE RESPOSTA À DEMANDA EM TEMPO REAL

O modelo de resposta à demanda permite que o consumidor receba informações sobre o preço horário da energia vários minutos antes da hora correspondente e responda a esta informação, ajustando seu consumo de energia a esse novo preço da energia. Esse ajuste de energia por hora é feito dentro de uma estrutura de planejamento diário, para que seja garantido um consumo mínimo de energia diária. Outras restrições de consumo, como a carga horária e os limites de variação de carga, também são aplicadas.

A implementação das decisões obtidas usando o modelo de resposta à demanda proposto resulta em importantes ganhos para o custo da energia, o que é ilustrado neste trabalho através de diferentes casos que serão abordados Antonio (ANTONIO J. CONEJO, 2005). Dessa forma, o modelo tem a seguinte formulação Conejo (CONEJO, 2010)

$$\begin{aligned} & \text{Min } \{e_{t+h}, h = 0, \dots, 24 - t\} \cup \{d_{t+h}, h = 1, \dots, 25 - t\} \\ z = & \lambda_t^a e_t - u_t(e_t) + \sum_{h=1}^{24-t} [\{\lambda_{t+h}\} e_{t+h} - u_{t+h}(e_{t+h})] \end{aligned} \quad (1a)$$

s.a.:

$$\sum_{h=1}^{t-1} e_h^a + e_t + \sum_{h=1}^{24-t} e(t+h) \geq e_{day} \quad (1b)$$

$$e_{t+h} = \frac{d_{t+h} + d_{t+h+1}}{2} \quad h = 0, \dots, 24 - t \quad (1c)$$

$$d_{t+h} - d_{t+h+1} \leq r^D \quad h = 0, \dots, 24 - t \quad (1d)$$

$$d_{t+h+1} - d_{t+h} \leq r^U \quad h = 0, \dots, 24 - t \quad (1e)$$

$$d_{t+h+1}^{\min} \leq d_{t+h+1} \leq d_{t+h+1}^{\max} \quad h = 0, \dots, 24 - t \quad (1f)$$

Em que:

- d_t é a demanda do consumidor no início da hora t ;
- e_{day} consumo mínimo de energia requerido pelo consumidor;
- e_t é o consumo de energia na hora t ;
- r^U/r^d rampa de subida e descida para o limite da demanda;
- u_t utilidade do consumidor na hora t ;
- λ_t preço da energia na hora t .

O modelo de resposta à demanda é definido para as 24 horas do dia. Deve-se observar que, para cada hora t , os preços e o consumo de energia para as $t-1$ horas passadas são conhecidos pelo usuário e pela companhia energética, entretanto o consumo de energia para $(e_{t+h}, h = 0, \dots, 24 - t)$ e os níveis de energia $(d_{t+h}, h = 1, \dots, 25 - t)$ para hora atual t e para as seguintes $24 - t$ horas, são variáveis para serem determinadas.

A função objetivo a ser minimizada (1a) é a menor utilidade do consumidor, que abrange a hora atual t e demais $t - 1$ horas seguintes. As horas $t - 1$ passadas a partir da hora atual t não são consideradas na função objetivo, pois a utilidade do consumidor para as horas $t - 1$ passadas é conhecida e considera constante. O preço para hora t , λ_t^a , é conhecido, mas o preços para a demais $24 - t$ horas, $\{\lambda_{t+h}\}, h = 1, \dots, 24 - t$, não são conhecidos pelo consumidor. A restrição (1b) estabelece um piso para o consumo diário, ou seja, esta restrição garante um consumo mínimo de energia diário para cada consumidor. A restrição (1c) relaciona a energia em cada hora usando uma aproximação trapezoidal (KHANACADEMY), que é uma técnica de aproximação por integral definida, pela aproximação de uma região abaixo do gráfico em forma trapezoidal, na qual se faz o cálculo. As restrições (1d) e (1e) são as rampas de subida e descida para o limite de carga em cada hora t . As restrições (1f) aplicam os limites mínimos e máximos de carga horária para cada período de tempo t .

A figura 2.1 ilustra de forma clara, os papéis dos índices de tempo t e h na otimização do problema do modelo de resposta à demanda.

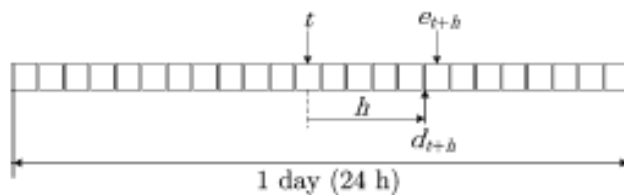


Figure 2.1 -Funções dos índices de tempo t e h no modelo de otimização de resposta à demanda.

2.5 MODELO DE RESPOSTA À ENERGIA EM TEMPO REAL

Como explicado na seção 2.4, o modelo de resposta à demanda permite que o consumidor receba informações sobre o preço horário da energia vários minutos antes da hora correspondente e responda a esta informação ajustando seu consumo de energia a esse novo preço da energia. Entretanto, o modelo de resposta à energia, como já mencionado, é um modelo inicial, que proporciona uma análise um pouco diferente do modelo de resposta à demanda.

Apesar de inicial, o modelo que será apresentado tem como objetivo fornecer uma análise quantitativa diferente do modelo de resposta à demanda, pois aborda a possibilidade de uma análise com base na energia disponível para hora atual t , para as horas passadas $t - 1$ e para as horas futuras $24 - t$ (PETTERSEN, 2003). Este modelo também possibilita que o usuário possa ajustar seu consumo de energia, mas com base na carga disponível e no preço da energia para cada hora t . O ajuste que o consumidor pode fazer também é dentro de um planejamento diário para todo o horizonte de 24 horas do dia. Restrições de rampa de subida e descida para energia e limites de energia máxima e mínima são levadas em consideração na minimização da função objetivo. Desta forma, é proposto o modelo de resposta à energia apresentado abaixo.

$$\text{Min } \{e_{t+h}, h = 0, \dots, 24 - t\}$$

$$z = \lambda_t^a e_t - u(e_t) + \sum_{h=1}^{24-t} [\{\lambda_{t+h}\}e_{t+h} - u_{t+h}(e_{t+h})] \quad (2a)$$

s.a :

$$\sum_{h=1}^{t-1} e_h^a + e_t + \sum_{h=1}^{24-t} e_{t+h} \geq e_{\text{d_day}} \quad (2b)$$

$$e_{t+h} - e_{t+h+1} \leq r^D \quad h = 0, \dots, 24 - t \quad (2c)$$

$$e_{t+h+1} - e_{t+h} \leq r^U \quad h = 0, \dots, 24 - t \quad (2d)$$

$$e_t^{\min} \leq e_{t+h+1} \leq e_t^{\max} \quad h = 0, \dots, 24 - t \quad (2e)$$

Em que:

e_{t+h} é o vetor de energia para todo o horizonte do dia para $24 - t$ horas;

e_{day} consumo mínimo de energia requerido pelo consumidor;

e_t é o consumo de energia na hora t ;

r^U/r^d rampa de subida e descida para o limite da demanda;

u_t utilidade do consumidor na hora t , valor;

λ_t preço da energia na hora t .

O modelo de resposta à energia é definido para as 24 horas do dia, como ocorre para o modelo de resposta à demanda. Como observado para o modelo de resposta à demanda, em que para cada hora t , os preços e o consumo de energia para as $t - 1$ horas passadas são conhecidos pelo usuário e pela companhia energética, entretanto o consumo de energia para ($e_t, h = 0, \dots, 24 - t$) e os níveis de energia ($e_{t+h}, h = 1, \dots, 24 - t$) para hora atual t e para as seguintes $24 - t$ horas, são variáveis para serem determinadas, no modelo de energia levamos exatamente em consideração os mesmos aspectos, pois o modelo de energia é um modelo proposto para atacar o problema de resposta à demanda, de uma forma diferente.

A função objetivo a ser minimizada (2a) é a menor utilidade do consumidor, que abrange a hora atual t e demais $24 - t$ horas seguintes. As horas $t - 1$ passadas a Priori da hora atual t , não são consideradas na função objetivo, pois a utilidade do consumidor para os horas $t - 1$ passadas é conhecida e considerada constante. O preço para hora t , λ_t^a , é conhecido, mas o preços para a demais $24 - t$ horas, $\{\lambda_{t+h}\}, h = 1, \dots, 24 - t$, não são conhecidos pelo consumidor. A restrição (2b) estabelece um piso para o consumo diário, ou seja, esta restrição garante um consumo mínimo de energia diário para cada consumidor. As restrições (2c) e (2d) são as rampas de subida e descida para o limite de energia em cada hora t . As restrições (2e) aplicam os limites mínimos e máximos de energia para cada período de tempo t .

A figura 2.2 ilustra de forma clara, os papéis dos índices de tempo t e h na otimização do problema do modelo de resposta à energia, .

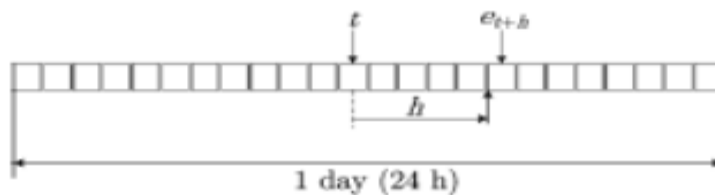


Figure 2.2 Funções dos índices de tempo t e h no modelo de otimização de resposta à energia

3. ESTRATÉGIA DE SOLUÇÃO

3.1 MÉTODOS DE SOLUÇÃO

Antes da modelagem do problema de resposta à demanda e resposta à energia com smart grids é preciso escolher dentre as diversas técnicas existentes a mais adequada, pois problemas de otimização buscam encontrar soluções eficientes para cenários do mundo real, por meio de modelos matemáticos que estão associados a parâmetros incertos, como por exemplo: demanda, preços e custos. Essas duas etapas de modelagem e escolha do método são associadas e, para que se adquira um resultado satisfatório, devem ser feitas em conjunto.

As técnicas de otimização envolvendo smart grids podem ser divididas em três grupos: método de otimização por programação robusta, método de programação por otimização estocástica e método de otimização por programação determinista dinâmica.

Conforme Kluwer (KLUWER, 1997), o método de programação por otimização robusta, lida com os parâmetros incertos por meio de cenários discretos, e tem por meta obter soluções próximas ao ótimo, independente do cenário utilizado. E segundo Dimitris Bertsimas (DIMITRIS BERTSIMAS, 2004), esta abordagem trabalha com a questão de repulsão ao risco, pois busca encontrar soluções que não tenham muitas mudanças com a mudança dos cenários analisados. Rj Butler (RJ BUTLER, 2003) defende que a programação robusta pode ser decomposta em duas categorias: modelo de arrependimento, onde busca-se minimizar ou limitar a desigualdade entre o custo da solução utilizada e o custo da solução mais adequada para o cenário utilizado. E modelo de variabilidade, onde se faz o controle dos custos através da incorporação do desvio padrão ou da variância na função objetivo, com isso minimizam-se os custos e diminui-se a variabilidade dentro dos possíveis cenários.

O método de otimização por programação estocástica dedica-se a problemas com parâmetros que possuem uma distribuição de probabilidade discreta ou contínua. Neste tipo de otimização, se considera todos os cenários de forma simultânea, cada cenário com sua probabilidade de ocorrência (JULIA L HIGLE, 1991/8) e como já mencionado, os cenários são considerados de forma simultânea, pois as sequências de decisões não podem ser consideradas de forma separada (BERTSEKAS, 2005), pois todas as sequências são consideradas de forma simultânea para encontrar a solução.

O método de otimização por programação determinística dinâmica, o qual foi usado nesse trabalho, leva em consideração que todos os parâmetros são conhecidos. Este modelo, diferentemente do modelo de programação estocástica, possibilita encontrar a solução ótima para cada cenário de forma separada. E, como comentado por John R. Birge (JOHN R BIRGE, 1997), o método de programação estocástica usualmente requer muito processamento computacional e torna difícil encontrar uma solução, logo, opta-se por obtenção de soluções utilizando o modelo determinístico, a média das variáveis aleatórias ou solucionando cada problema determinístico com relação a cada cenário.

Isto posto, há vários estudos para otimizações que podem ser aplicados juntamente com o modelo matemático utilizado para se encontrar a melhor solução para os problemas analisados.

3.2 FERRAMENTA COMPUTACIONAL GAMS

Neste trabalho foram analisados modelos desenvolvidos que fizeram o uso da programação linear (LP) e, para realizar testes nos modelos de resposta à demanda e resposta à energia, foi utilizado o software computacional General Algebraic Modelling System - GAMS/CPLEX (2008, GAMS Development Corporation, Washington, DC, USA).

GAMS é um sistema de modelagem de alto nível para programação e otimização matemática. É composto por um compilador de linguagem e um estável de solucionadores integrados de alto desempenho. O GAMS é adaptado para aplicações de modelagem complexas e em grande escala, e permite ao usuário construir grandes modelos que podem ser adaptados rapidamente a novas situações (MEERAUS).

O Gams tem a capacidade de modelar problemas de otimização lineares (Linear Programming – LP), não lineares (Non Linear Programming – NLP) e inteiro misto (Mixed Integer Programming – MIP). Este software possui a habilidade de solucionar problemas complexos mesmo com um computador com configurações simples.

Para problemas que possui um número muito grande de parâmetros, o GAMS possui uma opção chamada GDX que permite importa (ou exporta) planilhas diretamente do Excel. Também há a possibilidade de exporta (ou importa) dados diretamente do Matlab ou Gnuplot.

Logo, o GAMS possui todas as ferramentas necessárias para à implementação dos objetivos desse trabalho que é a implementação dos modelos de demanda e energia utilizando otimização determinística dinâmica que foi utilizado em todos os estudos de cada modelo.

3.3 ALGORÍTIMO RESPOSTA À DEMANDA

Como já mencionado, o modelo de resposta à demanda com smart grid, será resolvido com auxílio da programação dinâmica determinística. Abaixo está o fluxograma do algoritmo da resposta à demanda.

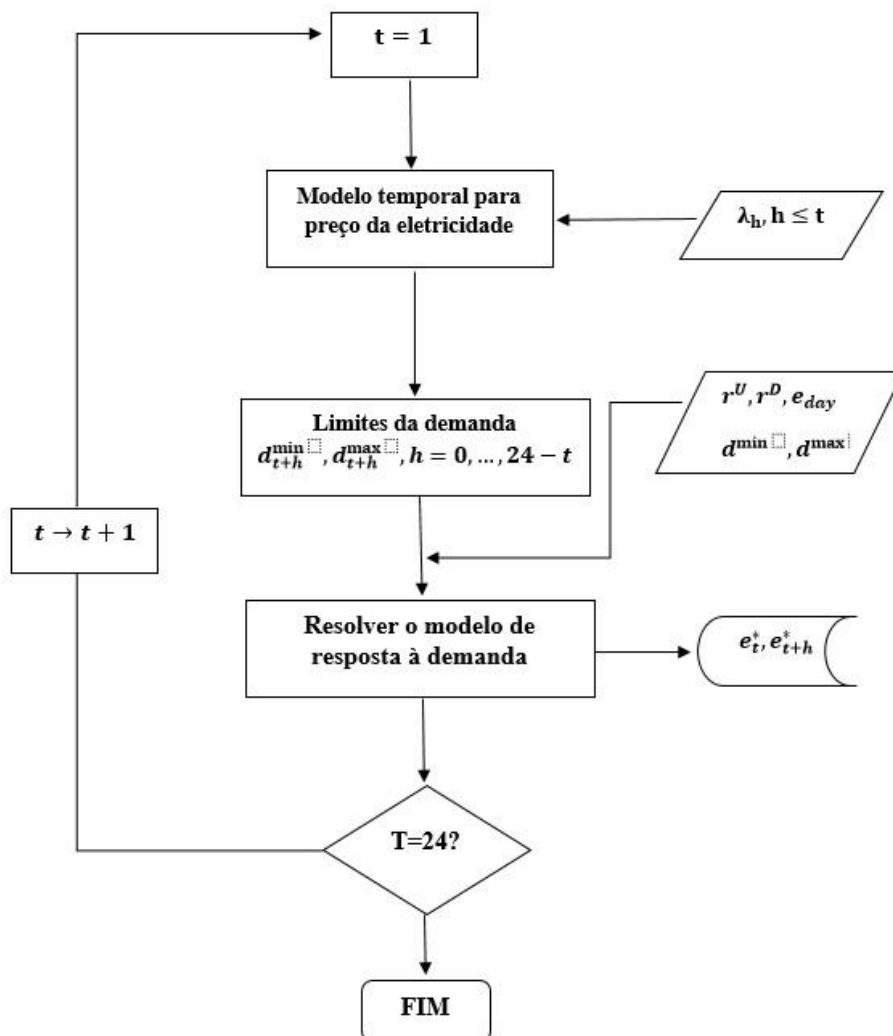


Figure 3.1 fluxograma do algoritmo da resposta à demanda.

A Figura 3.1 acima ilustra a rotina para solução do problema de resposta à demanda. O problema é inicializado com valores de entrada $t=1$. A partir daí o modelo temporal para preço da eletricidade, que é o modelo de resposta à demanda, é inicializado e é feita a avaliação do preço da energia naquele determinado momento. Analisa-se se a demanda requisitada está dentro dos limites mínimos e máximos para demanda daquela hora, e, logo após esta verificação, a energia disponível para o consumidor é calculada com base nos valores da demanda como apresentado no capítulo 2, restrição 1C.

$$e_{t+h} = \frac{d_{t+h} + d_{t+h+1}}{2} \quad (1C)$$

como o valor da energia e_{t+h} resolve-se o modelo de resposta à demanda, onde utiliza-se o valor de e_t que é encontrado com o auxílio do e_{day} e e_{t+h} como apresentado no capítulo 2 restrição 1b,

$$\sum_{h=1}^{t-1} e_h^a + e_t + \sum_{h=1}^{24-t} e(t+h) \geq e_{day} \quad (1b)$$

Para resolver o modelo de resposta à demanda, apresentado na figura 3.1, e com ambos os valores de e_t e e_{t+h} a função objetivo apresentada no capítulo 2 dada pela restrição 1a

$$\lambda_t^a e_t - u_t(e_t) + \sum_{h=1}^{24-t} [\{\lambda_{t+h}\} e_{t+h} - u_{t+h}(e_{t+h})] \quad (1a)$$

é minimizada de modo a encontrar o menor custo para o usuário em cada hora t até $t = 24$. Logo em horários que o preço da energia λ_t e λ_{t+h} são altos, o programa regula o consumo do consumidor de modo a encontrar o melhor valor para o usuário de forma que o mesmo pague menos pela energia consumida. Esta rotina é repetida até $t = 24$, com isso o programa encerra sua atividade e apresenta os valores de energia consumida em cada horário pelo usuários, bem como os valores da função objetivo para cada períodos de tempo no decorrer do dia

3.4 ALGORÍTIMO RESPOSTA À ENERGIA

O modelo de resposta à energia, como explicado anteriormente, é um modelo análogo ao modelo de resposta à demanda. O modelo de resposta à energia do mesmo modo que o modelo anterior, será resolvido com auxílio da programação dinâmica determinística. Abaixo está apresentado o fluxograma do algoritmo da resposta à energia. Nota-se que o fluxograma é bem semelhante ao modelo da Figura 3.1, entretanto o mesmo não leva em consideração a demanda.

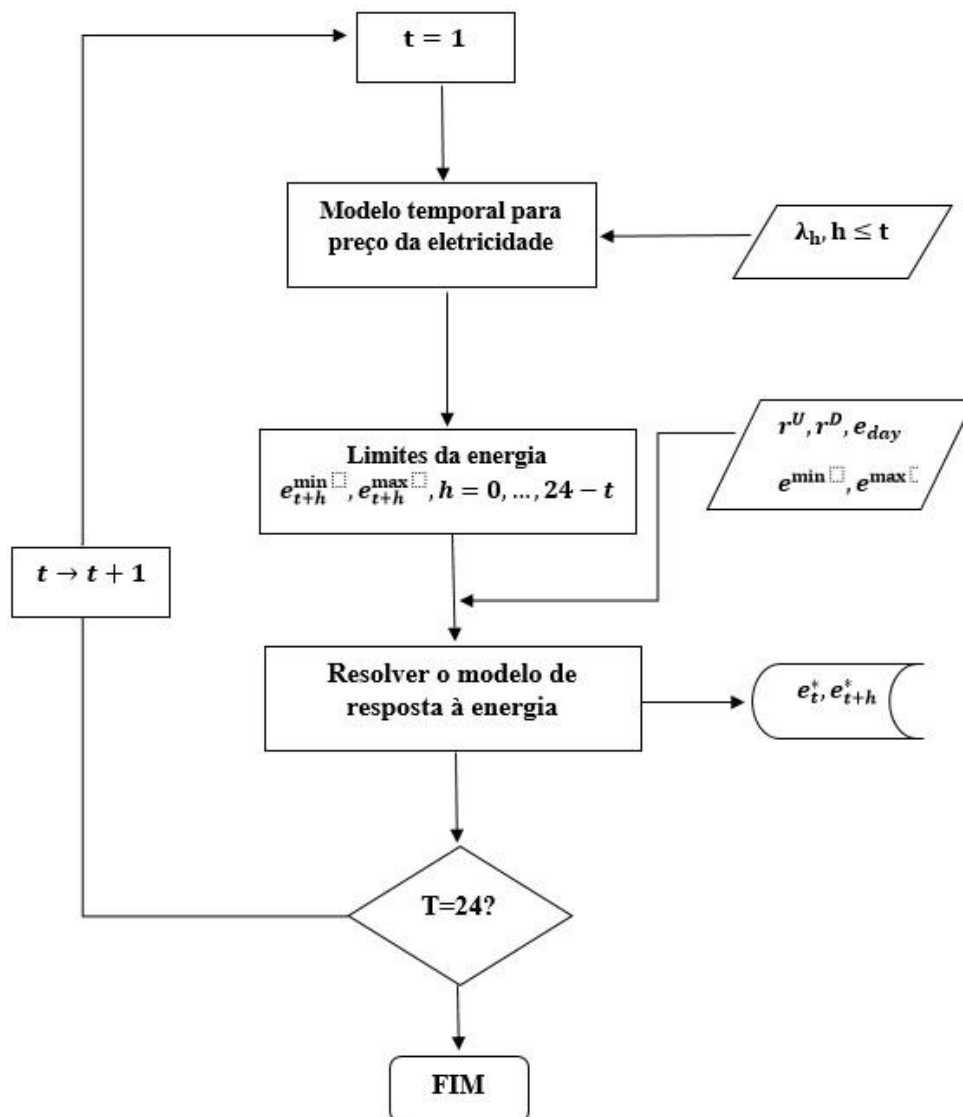


Figure 3.2 fluxograma do algoritmo da resposta à energia.

A figura 3.2 acima ilustra a rotina para solução do problema de resposta à energia. A partir do instante $t = 1$ o modelo temporal para preço da eletricidade é inicializado e é

verificado qual o valor da energia para aquele momento. Logo, após o processo anteriormente descrito, são analisados os limites de energia dado no capítulo 2 restrição 2e ,

$$e_t^{\min} \leq e_{t+h+1} \leq e_t^{\max} \quad (2e)$$

a qual restringe o valor da variável e_{t+h+1} dentro de um intervalo. A partir deste momento o programa utiliza o valor de e_{t+h+1} e faz a verificação das rampas de subida e descida dadas no capítulo 2 pelas restrições 2c e 2d,

$$e_{t+h} - e_{t+h+1} \leq r^D \quad (2c)$$

$$e_{t+h+1} + e_{t+h} \leq r^U \quad (2d)$$

Com o valor de e_{t+h} é determinado o valor de e_t que é encontrado com base no capítulo 2 restrição 2b ,

$$\sum_{h=1}^{t-1} e_h^a + e_t + \sum_{h=1}^{24-t} e_{t+h} \geq e_{day} \quad (2b)$$

Com os valores de e_t e e_{t+h} a função objetivo dada no capítulo 2 pela restrição 2a,

$$\lambda_t^a e_t - u(e_t) + \sum_{h=1}^{24-t} [\{\lambda_{t+h}\} e_{t+h} - u_{t+h}(e_{t+h})] \quad (2a)$$

é minimizada de modo a encontrar o menor custo para o usuário. Do mesmo modo que ocorre para o modelo de resposta à demanda, em horários que o preço da energia λ_t e λ_{t+h} são altos, o programa regula o consumo do consumidor de modo a encontrar o melhor valor para o usuário de forma que o mesmo pague menos pela energia consumida. Esta rotina é repetida até $t = 24$, com isso o programa encerre sua atividade e apresente os valores do custo em cada horário para o usuário.

4. ESTUDO DE CASOS

4.1 CASOS DO MODELO DE RESPOSTA À DEMANDA COM SMART GRID EM TEMPO REAL

O modelo de resposta à demanda com smart-grid em tempo real considera os limites para variação da demanda, valores para as rampas de subida e descida dos geradores, a mínima quantidade de energia que o consumidor pode consumir durante todo o horizonte de 24 horas e a utilidade do consumidor. Os valores para máxima variação da demanda em cada hora foram calibrados em cada teste, de modo que o modelo respeite os limites das rampas.

Abaixo, serão apresentados os testes feitos com o modelo proposto por (CONEJO, 2010) e apresentados na seção 2.4 capítulo 2. Estes testes visaram testar a eficiência do modelo com variações controladas nos parâmetros adotados nesse trabalho. Os testes foram realizados na seguinte ordem: testes 1,2 e 3 visaram variar a energia mínima que pode ser consumida no dia; nos testes 4 e 5 foram realizadas mudanças nas rampas de subida e descida e nos testes 6 e 7 variou-se o perfil de preço utilizado. Os testes de 1 a 5 foram feitos com os mesmos valores de preços da energia para cada hora do dia, dados pelos preços 1 da tabela A no apêndice A. Os valores utilizados para energia e demanda, são valores típicos encontrados em indústrias, mas os parâmetros podem ser ajustados outras finalidades.

4.1.1 Teste e Resultados 1

Em cima do teste 1, que é o caso base, foram feitos os demais testes que serão analisados nesse projeto. Foram utilizados os valores dos preços da energia em cada hora providos por (CONEJO, 2010) para verificação do modelo na seção 2.4 do projeto, os demais testes, foram feitos com variações feitas nos dados do teste 1. Abaixo está a tabela com os valores utilizados para cada parâmetro do modelo de resposta à energia com smart grid em tempo real do consumidor para o teste 1.

Tabela 4.1 - dados do consumidor teste 1.1

Máxima demanda por hora	14.5 MW
Mínima demanda por hora	0 MW
Consumo mínimo de energia por dia	15 MWh
Limite da rampa de subida	1 MW/h
Limite da rampa de descida	1 MW/h
Utilidade do consumidor	41.5 Reais/MWh

Os valores da tabela acima foram utilizados nas restrições do modelo exposto na seção 2.4 do capítulo 2 deste trabalho.

Os valores dos preços da energia λ para o tempo t e $t + h$ são dados no apêndice A. Note que, no modelo proposto, está indicado λ_t e λ_{t+h} e na tabela só temos λ , isso se deve ao fato que para cada tempo t os valores de $h = 1, 24 - t$ são incrementados a cada valor de t variando assim os valores dos preços com base na tabela A do apêndice A.

Abaixo está apresentado o gráfico dos valores dos preços 1 da tabela A do apêndice A.

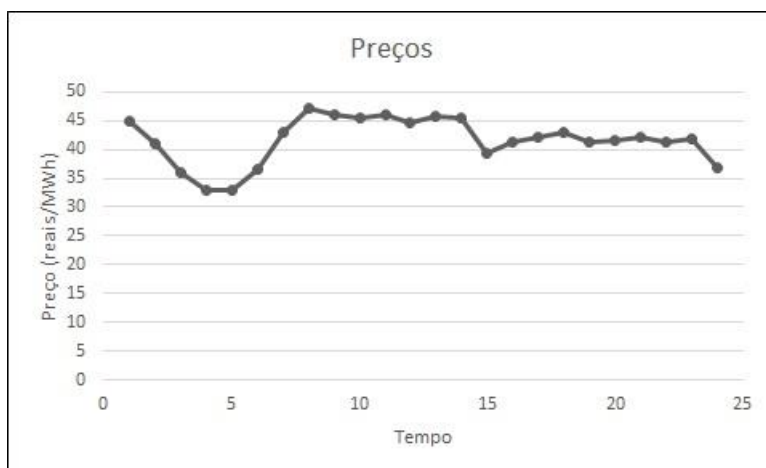


Figure 4.1-Preço do modelo de resposta à demanda

Abaixo estão apresentados os gráficos de consumo e do custo minimizado do consumidor para cada hora do dia, obtidos com o auxílio do software de otimização GAMS, exposto no tópico 3.2 capítulo 3. Custo total z é de 702.785 Reais.



Figure 4.2 Custo minimizado do modelo de resposta à demanda teste 1

A figura 4.2 apresenta o custo calculado para o consumidor para cada hora do dia com base nos dados da tabela 4.1 e com base nos valores dos preços da figura 4.1. A figura acima evidencia que em horários onde há os maiores valores de preços para energia, o consumidor reduz seu consumo de forma a pagar menos. A redução do consumo de energia por parte do consumidor é mostrado na figura 4.2 abaixo. Consumo total 218.5(MWh).

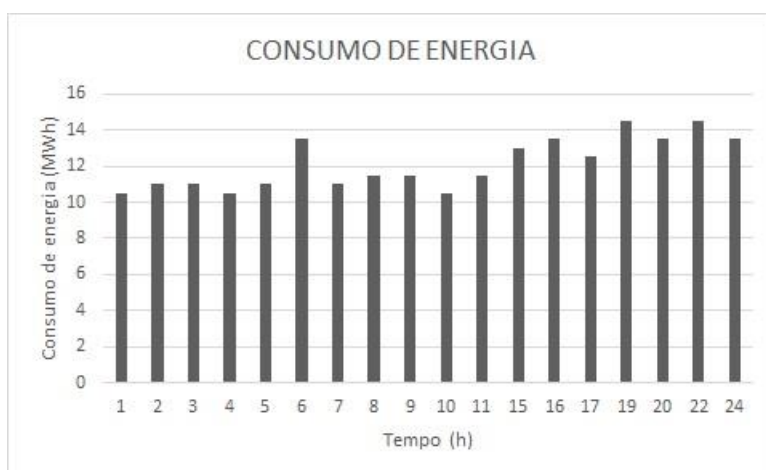


Figure 4.3 -consumo de energia do modelo de resposta à demanda teste 1

A figura 4.3 apresenta o consumo de energia em horários de pico de uso do consumidor. Vale notar que, ao contrário do que ocorre na figura 4.2, na qual pode-se ver

baixos valores de custos, na figura 4.3 estes valores não são amostrados, uma vez que o programa, no momento da solução do problema, não os considerou ao plotar o gráfico, por exemplo nas horas 12, 13 e 14 na figura 4.2 o custo minimizado, mas a figura 4.3 não apresenta o consumo nestas horas, pois são muito baixos.

4.1.2 Teste e Resultados 2

O teste 2 é semelhante ao teste 1, mas nele foi feita a redução da quantidade mínima de energia que o consumidor pode utilizar durante o dia. Enquanto no teste 1 a energia mínima que podia ser consumida por dia pelo consumidor era de 15 MWh por dia, no teste 2 este valor foi reduzido para 7.5 MWh. Abaixo está apresentada a tabela com os valores de todos os parâmetros utilizados neste teste. O teste 2 foi feito com base nos mesmos valores de preços para energia utilizados no teste 1 figura 4.1.

Tabela 4.2 - dados do consumidor teste 1.2

Máxima demanda por hora	7 MW
Mínima demanda por hora	0 MW
Consumo mínimo de energia por dia	7.5 MWh
Limite da rampa de subida	1 MW/h
Limite da rampa de descida	1 MW/h
Utilidade do consumidor	41.5 Reais/MWh

Abaixo está o custo calculado com a nova restrição para energia mínima que pode ser consumida por dia pelo o consumidor. Custo total z é de 301.035 Reais.

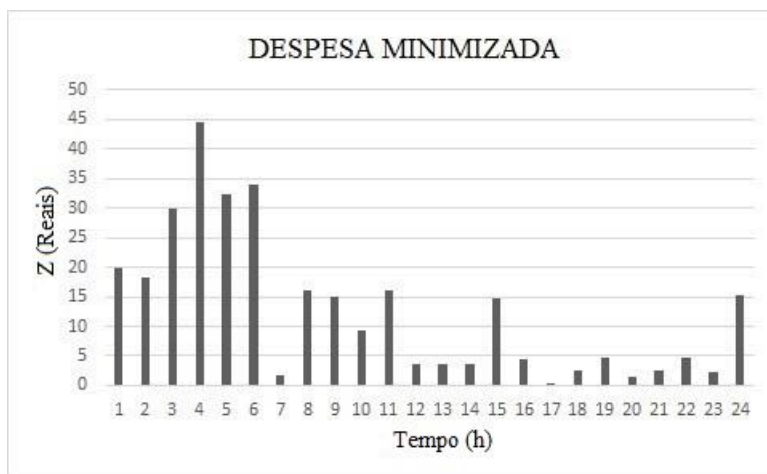


Figure 4.4 -Custo minimizado do modelo de resposta à demanda teste 2

Note que o resultado é muito semelhante ao resultado apresentado no teste 1, pois os valores do preço da energia se mantiveram constantes, e somente a energia mínima que pode ser consumida no dia foi diminuída. Evidencia-se este fato na figura a seguir, onde é apresentado o consumo para cada hora do dia. Consumo total 83.5(MWh).

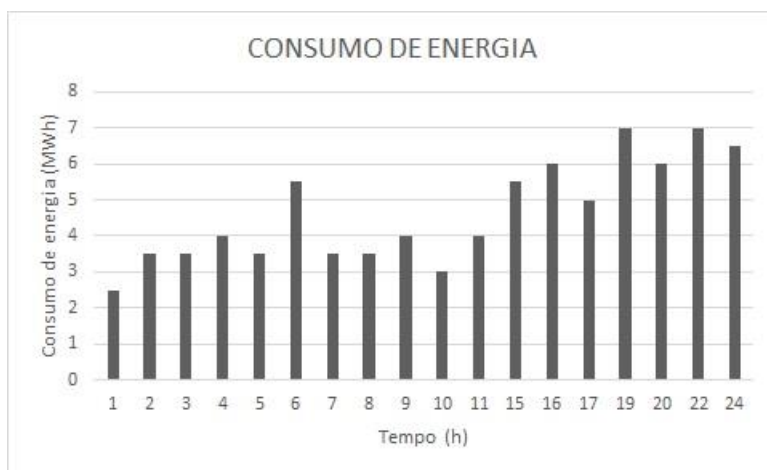


Figure 4.5 - Consumo do modelo de resposta à demanda teste 2

A figura 4.5 é semelhante à figura 4.1 do teste 1, mas ela deixa claro que, com a redução do consumo mínimo de energia por dia, o consumo de energia em cada horário foi reduzido também.

4.1.3 Teste e Resultados 3

O teste 3 é semelhante ao teste 1 e 2, entretanto, o consumidor aumentou seu consumo mínimo de energia do dia para 22 MWh. Abaixo está a tabela com os dados do consumidor avaliado no teste e que foram utilizados para examinar o modelo de resposta à demanda com smart grid em tempo real. Os preços da energia foram mantidos os mesmos utilizados no teste 1 e 2, apresentado na figura 4.1 ou na tabela A do apêndice A.

Tabela 4.3 - dados do consumidor teste 1.3

Máxima demanda por hora	20.5 MW
Mínima demanda por hora	0 MW
Consumo mínimo de energia por dia	22.5 MWh
Limite da rampa de subida	1 MW/h
Limite da rampa de descida	1 MW/h
Utilidade do consumidor	41.5 Reais/MWh

O custo do consumidor para cada hora do dia é apresentado na figura abaixo. Custo total z é de 1107.29 Reais.

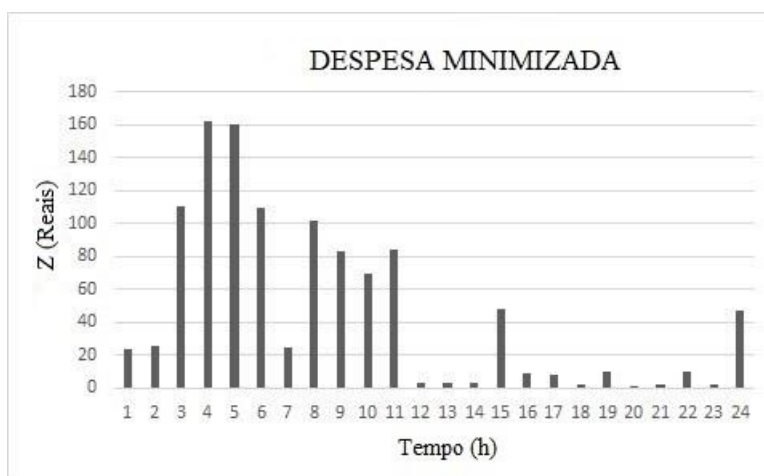


Figure 4.6 -Custo minimizado do modelo de resposta à demanda teste 3

A figura 4.6 mostra que, com o aumento da energia mínima que pode ser consumida no dia, o consumidor aumenta seus custos. Esse fato mostra que o consumidor aumentou seu consumo para cada hora do dia e é apresentado na figura abaixo. Consumo total 354 (MWh).

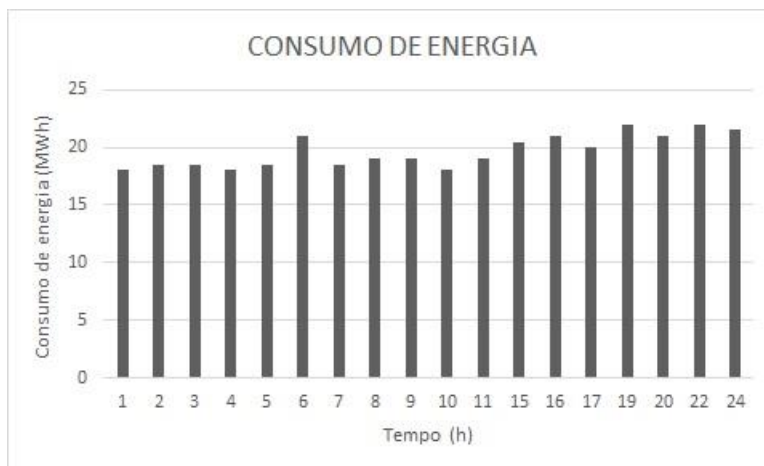


Figure 4.7 - Consumo do modelo resposta à demanda teste 3

A figura 4.7 é semelhante as figuras 4.3 e 4.5, que mostram o consumo para os testes 1 e 2, a grande diferença é que, agora, com um aumento na energia mínima que pode ser consumida, o consumidor aumentou o seu consumo.

O testes 1, 2 e 3 mostram que, com a variação da energia mínima que pode ser consumida no dia, os gráficos do consumo e do custo minimizado do consumidor variam de forma dinâmica, aumentando ou diminuindo de acordo com a energia mínima que no modelo de resposta à demanda com smart grid em tempo real é dado por e_{day} .

4.1.4 Teste e Resultados 4

O teste 4 realizado no modelo de resposta à demanda com smart grid em tempo real foi feito de forma semelhante ao teste 1, utilizando os mesmos dados do consumidor avaliado

neste teste, alterando-se apenas as rampas de subidas e de descidas (vistas no modelo explicado na seção 2.4 do capítulo), que são os limites para variação da demanda do consumidor para cada hora do dia. Os valores utilizados para este teste estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 4.4 - dados do consumidor teste 1.4

Máxima demanda por hora	14.5 MW
Mínima demanda por hora	0 MW
Consumo mínimo de energia por dia	15 MWh
Limite da rampa de subida	0.5 MW/h
Limite da rampa de descida	0.5 MW/h
Utilidadedo consumidor	41.5 Reais/MWh

O custo para cada hora encontrado neste teste, está apresentado na figura a seguir. Custo total z é de 760.193 Reais.

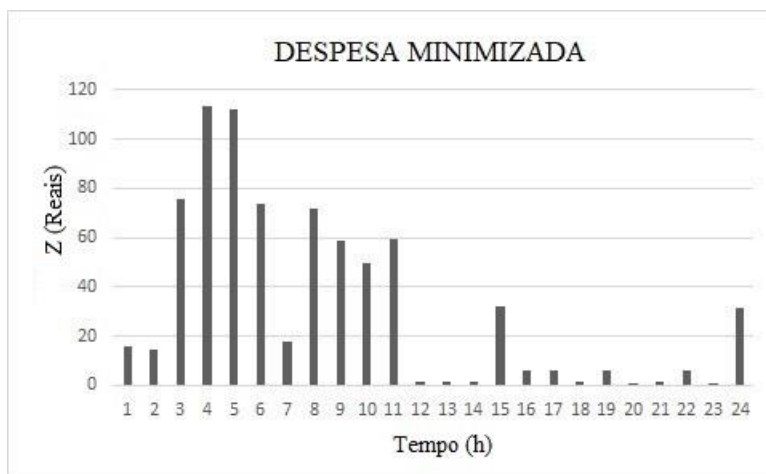


Figure 4.8 -Custo minimizado do modelo de resposta à demanda teste 4

A alteração nas rampas de subida e descida que limitam a demanda no modelo analisado ocasionaram uma alteração significativa nos custos apresentados na figura 4.8. O consumo também é afetado com a mudança nas rampas, como é apresentado na figura a seguir. Consumo total 244.25 (MWh).

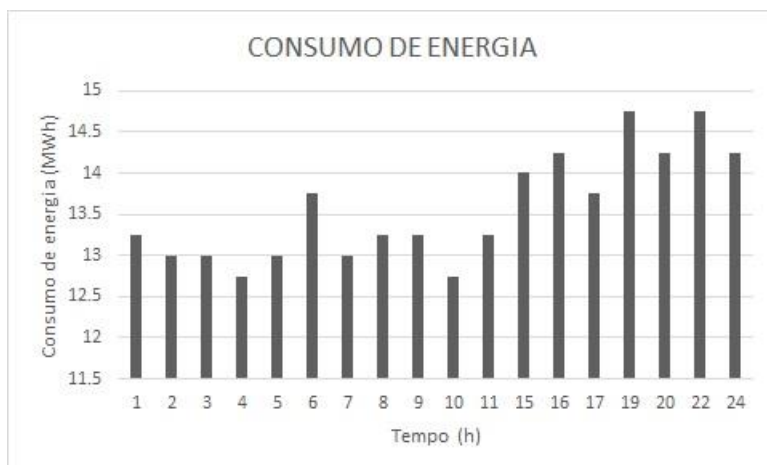


Figure 4.9 – Consumo do modelo resposta à demanda teste 4

A figura 4.9 apresenta as mudanças ocorridas no consumo do consumidor para cada hora do dia. Tanto o custo quanto o consumo são afetados diretamente com a mudança nas rampas que limitam a demanda no modelo analisado, uma vez que, com a diminuição das rampas, o consumidor necessita consumir uma quantidade maior de energia logo no início da primeira hora do dia, de forma a tentar respeitar os limites das rampas. Logo, mesmo com os mesmos valores de preços para energia utilizados no teste 1, variações nas rampas, ocasionam uma maior ou menor liberdade para o consumidor e, por conseguinte, variações no custo para e no consumo para cada hora.

4.1.5 Teste e Resultados 5

O teste 5 realizado no modelo de resposta à demanda com smart grid em tempo real também lida com a alteração dos valores das rampas que limitam os valores das demandas do consumidor para cada intervalo de tempo, como apresentado na seção 4.2 (capítulo 2, equações (1c) e (1f)). Nesse teste, as rampas tiveram seus valores aumentados, indo de 1MW/h para 1.5 MW/h. Esta mudança visa observar o efeito que uma folga nas restrições das rampas (1d) e (1e) (seção 2.4 do capítulo 2) irá trazer ao consumidor. A tabela a seguir apresenta os dados do consumidor. Este teste foi feito com base nos valores dos preços apresentados na figura 4.1 que é referente a tabela A coluna preços 1 no apêndice A.

Tabela 4.5 - dados do consumidor teste 1.5

Máxima demanda por hora	14 MW
Mínima demanda por hora	0 MW
Consumo mínimo de energia por dia	15 MWh
Limite da rampa de subida	1.5 MW/h
Limite da rampa de descida	1.5 MW/h
Utilidade do consumidor	41.5 Reais/MWh

Esta nova mudança, ao contrário do que foi feito no teste 4 reduzindo os valores da rampa de subida e descida, lidou com o aumento das rampas como apresentando na tabela 4.5.

O gráfico abaixo ilustra as mudanças ocorridas no custo minimizado para cada hora do usuário. Custo total z é de 643.498 Reais.



Figure 4.10 -Custo minimizado do modelo resposta à demanda teste 5

O gráfico da figura 4.10 acima evidencia que, com valor maior para as rampas de subida e descida que limitam a demanda do consumidor, este pode ter um controle maior sobre o custo em cada hora do dia, pois há uma margem maior para o consumo de energia neste período. O gráfico a seguir ilustra o consumo para cada hora do dia que foi gerado com base nos dados do teste 5 que está sendo analisado. Consumo total 192.5 (MWh).

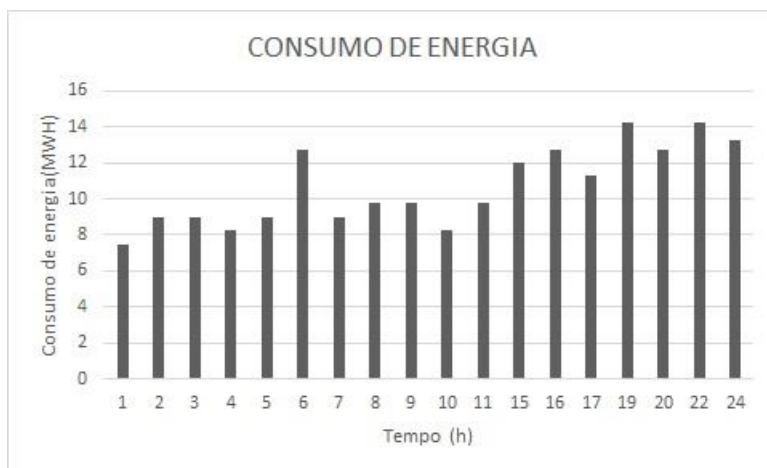


Figure 4.11 -Consumo do modelo resposta à demanda teste 5

A figura 4.10 apresenta o gráfico do consumo de energia para os dados do consumidor que está presente na tabela 4.5. É visto que, com valores maiores para as rampas de subida e de descida, o consumidor não precisa começar o dia com um valor alto de consumo para atender o necessário no restante do dia, pois há uma folga maior para a variação da demanda que interfere diretamente nos valores da energia consumida em cada hora dia, como apresentado na seção 4.2 capítulos 2 restrições (1c) e (1f).

Os testes realizados até o momento só lidaram com variações no consumo mínimo de energia do dia ou das rampas. Por este motivo, os gráficos ficaram tão parecidos, mudando somente os valores de consumo e custo, pois, até o momento só lidamos com o mesmo valor de preço de energia dado pelo gráfico 4.1 ou pelos preços 1 na tabela A apêndice A. Nos próximos dois testes, foram analisados os efeitos das mudanças no perfil de preço para cada hora do dia.

4.1.6 Teste e Resultados 6

O teste 6, diferentemente de todos até o momento, foi feito variando o perfil de preço para cada hora do dia. Até o momento só foi utilizado os preços 1 da tabela A apêndice A que estão ilustrados na figura 4.1. Abaixo está apresentado o perfil de preço utilizado para realização do teste 6.

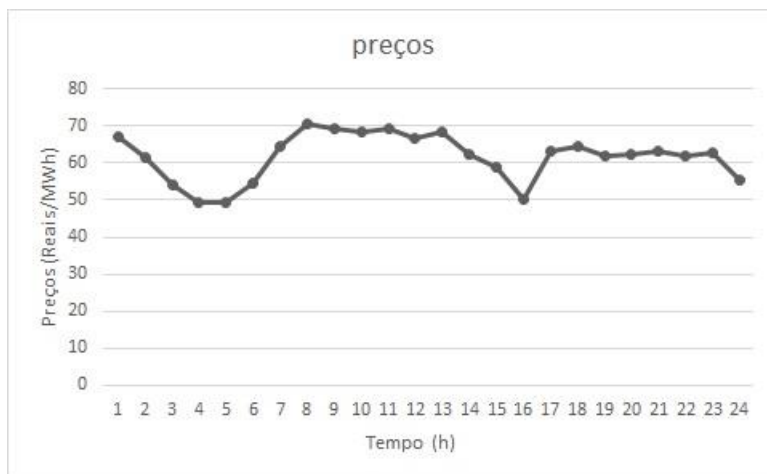


Figure 4.12-Preço do modelo resposta à demanda teste 6

Diferente dos preços da figura 4.1, os valores dos preços na figura 4.12 são valores mais altos para o preço da energia para cada hora do dia. Os valores da figura 4.12 estão na coluna preços 3 na tabela A no apêndice A. Este teste visou entender qual seria o comportamento do consumidor, frente ao aumento dos preços da energia para cada hora do dia.

A tabela a seguir apresenta os dados do consumidor utilizado para realização do teste 5. Notar que os dados presentes são os mesmos do teste 1, entretanto com um novo perfil de preço para cada hora do dia.

Tabela 4.6 - dados do consumidor teste 1.6

Máxima demanda por hora	15 MW
Mínima demanda por hora	0 MW
Consumo mínimo de energia por dia	15 MWh
Limite da rampa de subida	1 MW/h
Limite da rampa de descida	1 MW/h
Utilidade do consumidor	41.5 Reais/MWh

A figura a seguir ilustra o custo otimizado para o consumidor com base nos valores na tabela 4.6 e figura 4.11. Custo total z é de 6357.76 Reais.

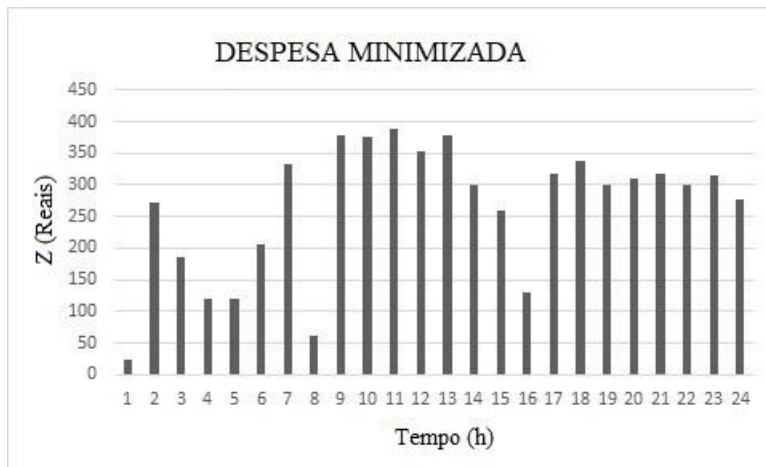


Figure 4.13-Custo minimizado do modelo resposta à demanda teste 6

A figura 4.13 apresenta o custo para o consumidor em cada hora do dia. Os valores apresentados são bem mais altos, pois agora o consumidor tem que pagar um preço maior pela energia em cada hora do dia como apresentado pela figura 4.12. A figura a seguir apresenta o consumo de energia para cada hora do dia. Consumo total 295.5(MWh).

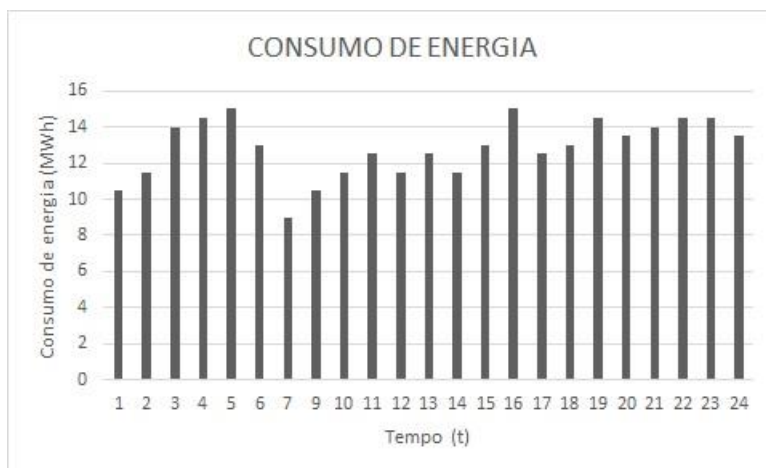


Figure 4.14- Consumo do modelo resposta à demanda teste 6

A figura 4.14 apresenta a quantidade de energia consumida para cada hora do dia. O gráfico 4.14 mostras que para, momentos onde o preço da energia é mais baixo, o consumidor consome mais e seu gasto é menor. É notado que, como ocorreu no teste 1, há valores que

foram colocados no gráfico de custo, mas não do de consumo. Este fato é devido aos baixos valores de energia naquela hora, em comparação com os altos valores analisados.

4.1.7 Teste e Resultados 7

O teste 7 é semelhante aos testes 1 e 6, entretanto com outro perfil de preço, como apresentado na figura abaixo. Este novo perfil de preço é registrado com valores bem menores para o preço da energia em cada hora do dia.

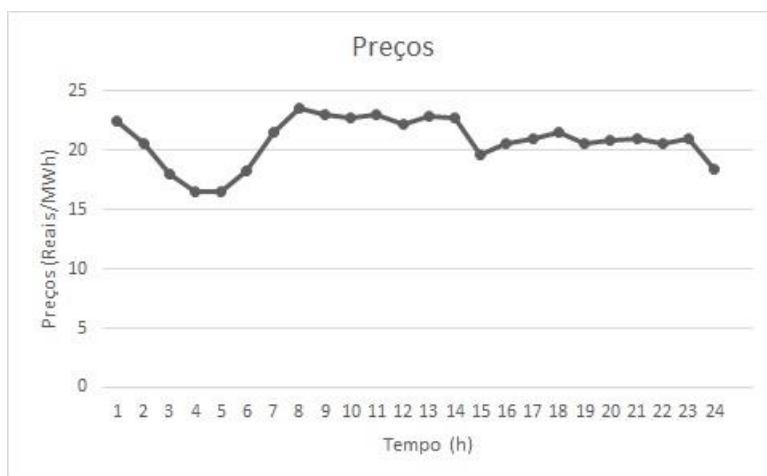


Figure 4.15-Preço do modelo de resposta à demanda teste 7

A tabela com os dados do usuário usados neste teste é apresentada a seguir.

Tabela 4.7 - dados do consumidor teste 1.7

Máxima demanda por hora	14.5 MW
Mínima demanda por hora	0 MW
Consumo mínimo de energia por dia	15 MWh
Limite da rampa de subida	1 MW/h
Limite da rampa de descida	1 MW/h
Utilidade do consumidor	41.5 Reais/MWh

Como foi feito nos testes 1 e 6, este teste visa avaliar como o consumidor se comporta à valores diferentes para o preço da energia. Estes novos valores são mostrados na figura 4.15

ou nos preços 2 tabela A, apêndice A. A figura a seguir ilustra o custo minimizado encontrado para os valores da tabela 4.7 e figura 4.15 do teste 7. Custo total z é de 7094.57 Reais.

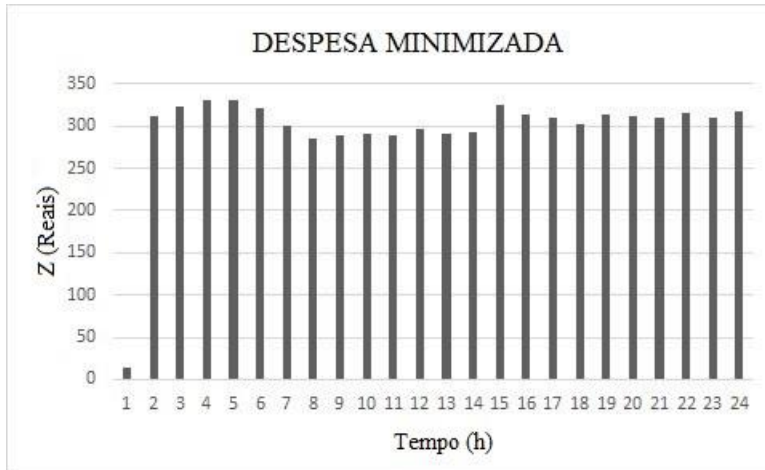


Figure 4.16-Custo minimizado do modelo resposta à demanda teste 6

A figura 4.16 apresenta o custo minimizado para todas as horas do dia, com base nos valores dos preços da energia na figura 4.15. Neste teste, foi notado algo interessante que será explicado com base na figura apresentada abaixo, que contém o consumo de energia para cada hora do dia. Consumo total 231.75 (MWh).

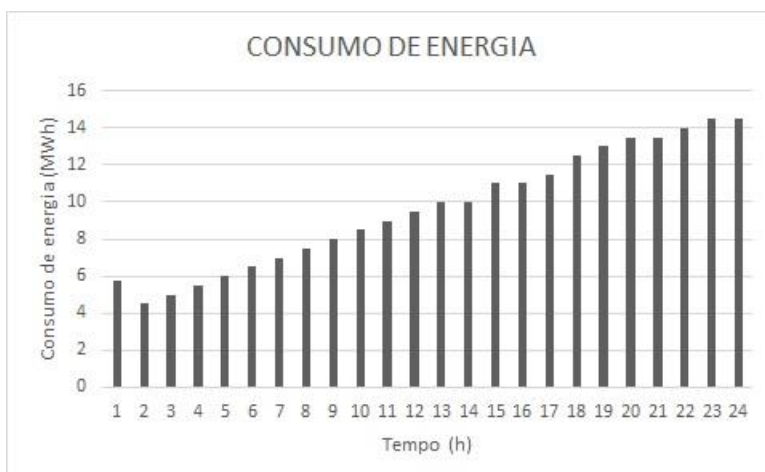


Figure 4.17- Consumo do modelo resposta à demanda teste 7

Na figura 4.17, o consumo vai aumentando com o passar das horas. Este aspecto do gráfico é devido aos baixos valores de preços para energia a cada hora do dia. Nota-se também outro fator que favoreceu a este aumento gradual do consumo: a utilidade do consumidor que é de 41.5 Reais/MWh. Como os preços da energia estão abaixo da utilidade, a tendência do consumidor foi de aumentar o consumo. Caso neste perfil de preço apresentado na figura 4.15 houvesse um valor mais alto que o valor da utilidade, o consumidor iria consumir o mínimo de energia, para garantir melhor custo. Este detalhe da utilidade do consumidor foi notado durante as várias simulações realizadas no modelo.

4.2 CASOS DO MODELO DE RESPOSTA À ENERGIA COM SMART GRID EM TEMPO REAL

Como explicado anteriormente, o modelo de resposta à energia é um modelo inicial proposto para solucionar o problema de resposta à demanda que é a base do trabalho. Os mesmos testes realizados no modelo de resposta à demanda foram também realizados no modelo de resposta à energia, entretanto, valores iniciais de alguns parâmetros foram mudados de forma a se conseguir com que o modelo funcione o mais parecido possível com o modelo base apresentado na seção 2.4 do capítulo 2. Estes parâmetros alterados serão explicados durante a análise dos testes. O modelo de resposta a energia foi mostrado na seção 2.5 do capítulo 2.

A seguir serão apresentados os testes realizados com o modelo proposto e quais foram os problemas, soluções e sugestão para o aperfeiçoamento do modelo de resposta à energia. Os testes, como no modelo de resposta à demanda, seguiram a seguinte ordem: testes 1,2 e 3 visaram variar a energia mínima que pode ser consumida no dia; nos testes 4 e 5 foram realizadas mudanças nas rampas de subida e descida e nos testes 6 e 7 variou-se o perfil de preço utilizado. Os testes de 1 a 5 foram feitos com o mesmo valor de preços da energia para cada hora do dia, e são dados pelos preços 1 da tabela A no apêndice A. Os valores utilizados para energia, são valores típicos encontrados em industrias,mas os parâmetros podem serem ajustados outras finalidades.

4.2.1 Testes e Resultados 1,2 e 3

Os testes 1,2 e 3 a seguir, foram realizados para perfil de preços apresentado na figura a baixo, o qual está na coluna preços 3 tabela A do apêndice A.

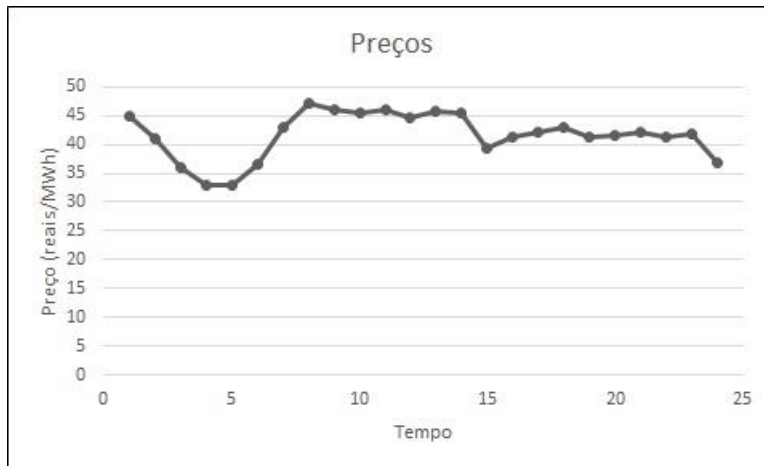


Figure 4.18 - Preço da modelo resposta à energia

Durante a realização dos testes 1, 2 e 3, que visaram variar o consumo mínimo diário requerido pelo consumidor, os testes apresentaram os mesmos valores para o custo minimizado e para o consumo de energia. Os dados do consumidor estão apresentados na tabela abaixo.

Tabela 4.8 - dados do consumidor teste 2.1,2.2,2.3

Máxima energia por hora	3 MW
Mínima energia por hora	0 MW
Consumo mínimo de energia por dia	15 MWh, 7.5 MWh, 22.5 MWh
Limite da rampa de subida	3 MW/h
Limite da rampa de descida	3 MW/h
Utilidade do consumidor	41.5 Reais/MWh

Como mencionado, os valores obtidos para o custo minimizado do consumidor e para o consumo de energia para os testes 1,2 e 3 que são referentes aos valores 15 MWh, 7.5 MWh, 22.5 MWh na tabela acima, foram os mesmos. Este fato se deve ao modo com que o problema foi formulado, pois este modelo, diferentemente do modelo de resposta à demanda, só possui como restrições as rampas que agora delimitam a energia no tempo e_{t+h} e e_{t+h+1} dadas pelas restrições (2c) e (2e) e os limites para o consumo de energia dado pela restrição (2e), sendo a restrição dada por (2b) a mesma usada no modelo de resposta à demanda. O modelo de resposta à energia não leva em consideração qual seria a demanda ou mesmo outros fatores nas restrições, mas somente a energia sendo este o único fator de controle para o consumo. Após vários testes de simulação notou-se que, para valores baixos para as rampas que limitam a energia, o modelo não apresentava um resultado satisfatório, pois não conseguia responder de forma similar ao modelo de resposta à demanda. Foi necessário, então, calibrar os valores dos parâmetros empiricamente, de forma a atender o maior número de testes possíveis, tornando o modelo o mais próximo do modelo de resposta à demanda. Abaixo é apresentado o gráfico do custo minimizado para os três valores de consumo mínimo de energia por dia. Custo total z é de 448.315 Reais.

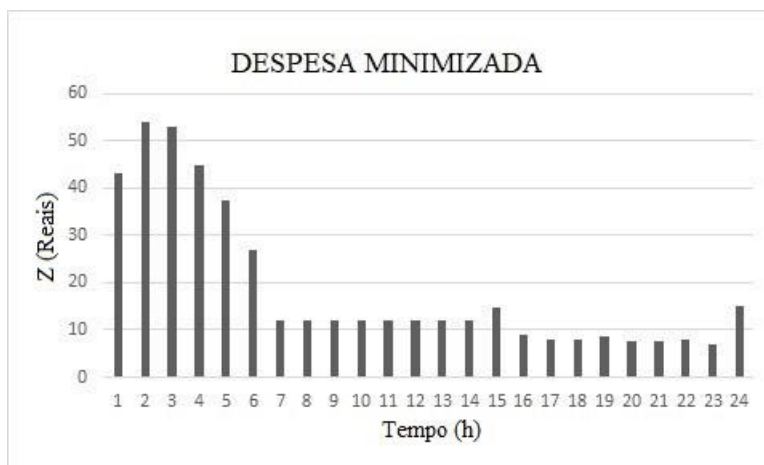


Figure 4.19- custo minimizado do modelo de resposta à energia testes 2.1, 2.2,2.3

Apesar do modelo não possuir uma boa regulação quando o consumo mínimo de energia por dia (*eday*) é alterado, o mesmo se prova bastante eficiente no quesito custo, pois assim como aconteceu no modelo de resposta à demanda, o modelo de resposta à energia

também respeita os valores dos preços da energia para cada hora, pois o consumidor varia seu consumo de acordo com o preço. O gráfico seguinte ilustra o gráfico de consumo que se manteve constante para os três testes (1,2 e 3). Consumo total 28.5(MWh).

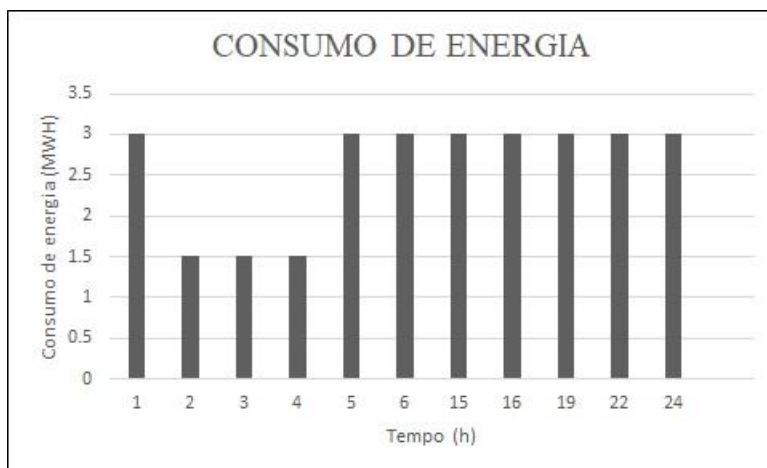


Figure 4.20- Consumo do modelo de resposta à energia testes 2.1, 2.2,2.3

O gráfico 4.19 de custo apresenta valores de preços para todas as horas, entretanto o de consumo não. Este fato foi mencionado no início do capítulo e é devido à quantidade de energia consumida, que foi muito baixa, de modo que o software utilizado desconsiderou no momento da plotagem do gráfico estes valores muito baixos. O fato dos gráficos para os testes 1,2 e 3 terem sido iguais, mesmo após a mudança nos valores do consumo mínimo de energia por dia ser alterado, evidenciou a importância de se considerar a demanda do consumidor ou mesmo outro fator auxiliar nas restrições do modelo, que foi explicado na seção 2.5 do capítulo 2, para solucionar o problema. Como foi relatado, por ser um tema relativamente novo, a resposta à demanda e resposta à energia com smart grids apresenta certas dificuldades na hora de propor modelos novos. Muitas das vezes, os testes computacionais são feitos por tentativa e erro, ou seja, cria-se um modelo novo que visa aprimorar um modelo existente e com isso são feitas mudanças controladas no modelo de forma a se observar quais mudanças se enquadram melhor a este novo modelo. No modelo de resposta à energia proposto neste trabalho, ficou evidenciado que este precisa ser mais aprimorado para respeitar a restrição do consumo mínimo de energia, mas este fato só foi confirmado após a solução do modelo base - o modelo de resposta à demanda-.

4.2.4 Teste e Resultados 4

O teste 4 visou alterar o valor das rampas que limitam a energia consumida que foi mostrado nas restrições (2c) e (2b) no capítulo 2. Este teste é muito semelhante ao teste 4.1.1 feito para o modelo de resposta à demanda. Abaixo está a tabela com os dados do consumidor utilizados neste teste.

Tabela 4.9 - dados do consumidor teste 2.4

Máxima energia por hora	3 MW
Mínima energia por hora	0 MW
Consumo mínimo de energia por dia	15 MWh
Limite da rampa de subida	1.5 MW/h
Limite da rampa de descida	1.5 MW/h
Utilidade do consumidor	41.5 Reais/MWh

Enquanto os teste 2.1, 2.2 e 2.3 foi analisado o efeito da alteração do consumo mínimo de energia por dia e_{day} , neste teste 2.4 foi feita a análise na alteração das rampas que limitam a energia e_{t+h} e e_{t+h+1} do modelo de resposta à energia O perfil de preço utilizado é o mesmo utilizado nos três testes passados e está apresentado na figura 4.18. Abaixo, está o gráfico do custo minimizado quando houve uma redução das rampas. Custo total z é de 308.33 Reais.



Figure 4.21- custo minimizado do modelo de resposta à energia teste 2.4

A figura 4.21 evidencia que, com a redução das rampas, o custo minimizado em cada hora diminuiu se comparado com o gráfico da figura 4.19. Este fato ocorre pela redução da liberdade do consumidor para variar seu consumo, assim seus custos em cada hora diminuiram. O consumo em cada hora é mostrado a seguir. Consumo total 18 (MWh).

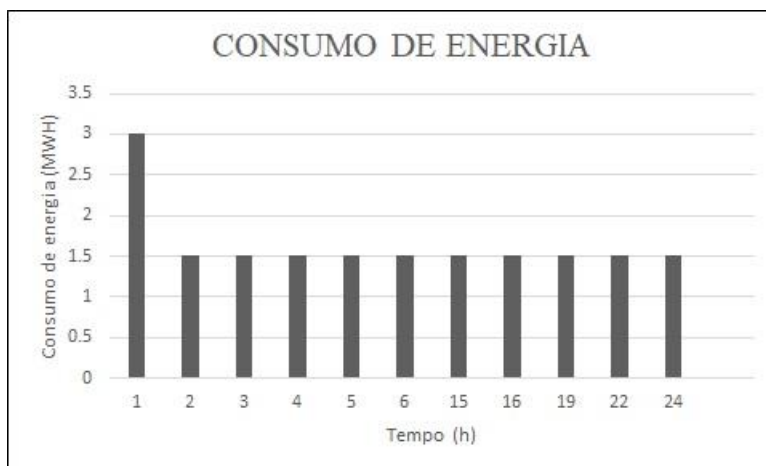


Figure 4.22- Consumo do modelo de resposta à energia teste 2.4

A figura 4.22 tabela a redução do consumo em cada hora, ao contrário da figura 4.20 onde o consumo começou alto, caiu e depois voltou para um valor alto novamente. Com a redução da rampa e possuindo o consumidor menor liberdade para variar seu consumo, ele tende a manter seu consumo estável e mais frequente nas horas mais baratas.

4.2.5 Teste e Resultados 5

O teste 5 é semelhante ao teste 2.1 e 2.4, neste teste, as rampas que limitam o consumo de energia que é explicado no capítulo 2, seção 2.5 restrições (2c) e (2d), foram aumentadas, dando maior liberdade para o consumidor. O perfil de preço utilizado para realização deste teste é dado na figura 4.18. A seguir está apresentada a tabela com os dados do consumidor para este teste.

Tabela 4.10- dados do consumidor teste 2.5

Máxima energia por hora	4.5 MW
Mínima energia por hora	0 MW
Consumo mínimo de energia por dia	15 MWh
Limite da rampa de subida	4.5 MW/h
Limite da rampa de descida	4.5 MW/h
Utilidade do consumidor	41.5 Reais/MWh

Agora, com maior liberdade para variar seu consumo de energia, o consumidor acaba apresentando custos maiores, por causa do aumento do consumo de energia proporcionado pela flexibilização das rampas. A figura seguinte apresenta o custo minimizado do consumidor para cada hora. Custo total z é de 499.92 Reais.



Figure 4.23- custo minimizado do modelo de resposta à energia teste 2.5

A figura acima, que tabela o custo minimizada para cada hora, mostra que houve um aumento do custo, pois, com um aumento nas restrições das rampas que limitam a quantidade de energia para cada hora seguinte, o consumidor tem mais liberdade para consumir mais.

Este fato é mostrado na figura a seguir, que apresenta o consumo para cada hora do dia. Consumo total 43.5 (MWh).

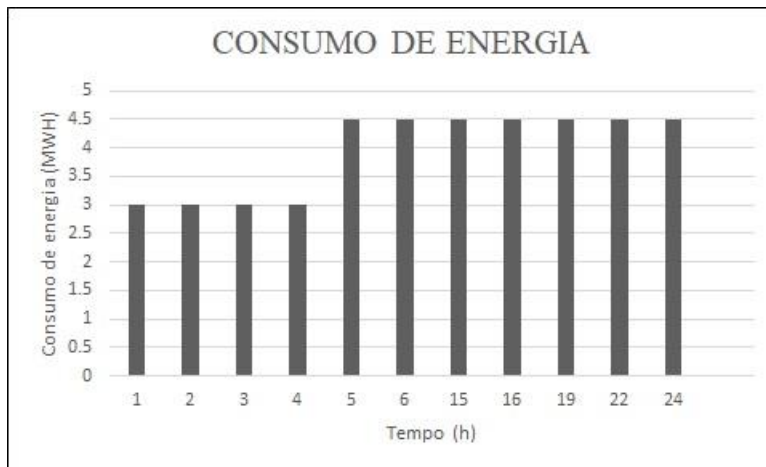


Figure 4.24- Consumo do modelo de resposta à energia teste 2.5

A figura 4.24 apresenta o consumo do consumidor para cada hora. Nota-se que, na figura acima, o consumidor inicia com um consumo mais baixo e depois aumenta o valor consumido. Como mencionado anteriormente, como o modelo de resposta à energia só leva em consideração a variação da energia, não considerando outros fatores, o gráfico da figura 4.24 apresenta este aumento no consumo pois quando o consumo de 4.5 MWh é atingido ele se torna fixo, pois atende as restrições do modelo. Apesar de o modelo de resposta à energia proporcionar um bom entendimento de como funciona as redes smart grids, este modelo precisa ser aperfeiçoado de forma que o valores de consumo de energia possam variar de forma mais dinâmica, como ocorre no modelo de resposta à demanda. Entretanto, o modelo de resposta a energia é útil para dar um entendimento prévio sobre como funcionam as redes smart grids, pois sua formulação é mais simples que a do modelo base de resposta à demanda.

4.2.6 Teste e Resultados 6

Até o momento não foi analisado o que acontece quando há alterações no perfil do preço a ser pago pela energia. Os testes 2.6 e 2.7 visam analisar estas duas últimas alterações.

A figura abaixo apresenta o perfil de preço utilizado no teste 2.6

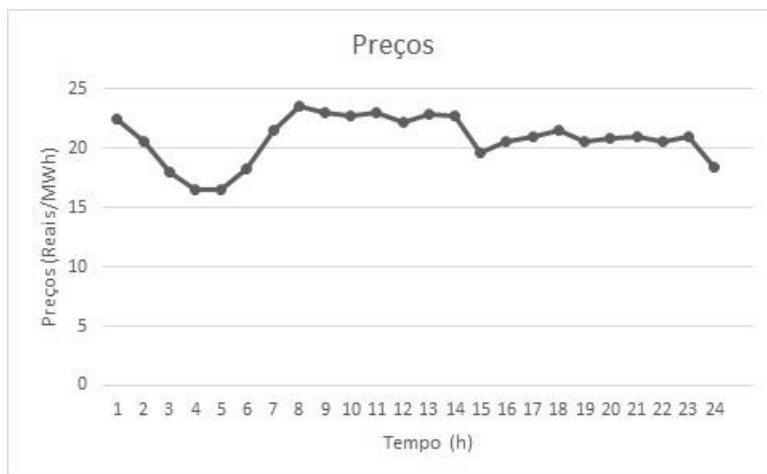


Figure 4.25 - Preço do modelo de resposta à energia teste 2.6

Neste teste foi utilizado o perfil de preço apresentado na figura acima que se encontra na coluna preços 2 na tabela A no apêndice A. Nota-se que este perfil de preço considera valores de preços bem menores que o perfil de preço utilizado nos testes passados para o modelo de resposta à energia.

Abaixo está a tabela com os dados do consumidor utilizado neste teste.

Tabela 4.11- dados do consumidor teste 2.6

Máxima energia por hora	3 MW
Mínima energia por hora	0 MW
Consumo mínimo de energia por dia	15 MWh
Limite da rampa de subida	3 MW/h
Limite da rampa de descida	3 MW/h
Utilidade do consumidor	41.5 Reais/MWh

O teste 2.6 é semelhante ao teste 2.1, diferindo no perfil de preço utilizado. A figura abaixo traz o custo minimizado com base neste novo perfil de preço. Custo total z é de 9565.61 Reais.

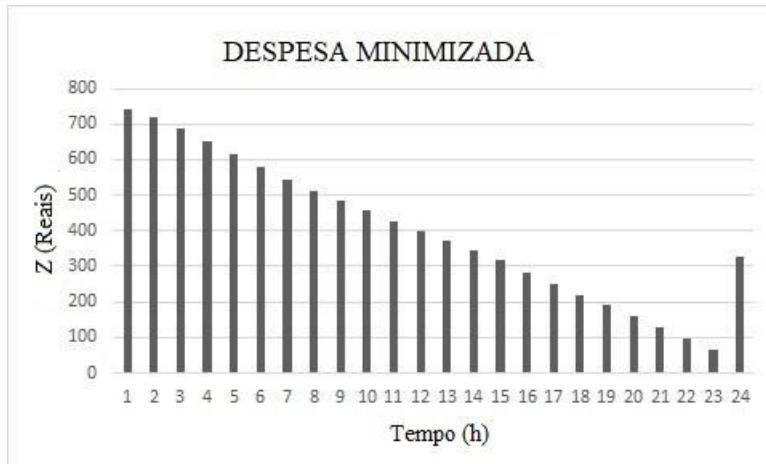


Figure 4.26 - custo minimizado do modelo de resposta à energia teste 2.6

A figura 4.15 mostra que o custo tende a acompanhar os valores dos preços da energia para cada hora, isso evidencia que custos mais altos se encontram nos pontos onde o consumidor fez um maior uso de energia devido ao baixo preço da energia para aquela hora do dia. O gráfico que ilustra o consumo para cada hora é ilustrado a seguir. Consumo total 55.5 (MWh).

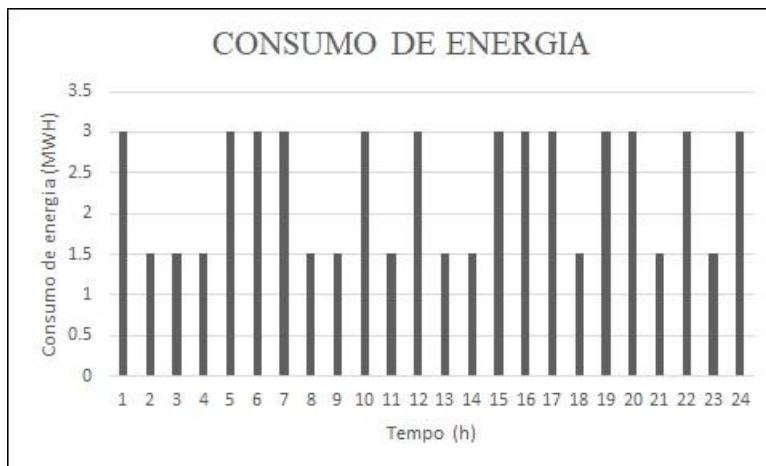


Figure 4.27 consumo do modelo de resposta à energia teste 2.6

A figura 4.26 mostra que em momentos onde a o preço da energia λ é menor, o consumidor faz um maior uso, logo o custo vai ser maior. Já em momentos nos quais o valor da energia λ é mais alto o consumidor faz um menor uso. A função objetivo do modelo de resposta à energia vai otimizando o custo do consumidor no decorrer das horas, pois os preços da energia são abaixo da utilidade do consumidor. Como já mencionado os resultados podem

ser aprimorados se no modelo de resposta à energia for considerado outras restrições para avaliar o consumo de energia como é feito no modelo de resposta à demanda.

4.2.7 Teste e Resultados 7

O teste 2.7 é semelhante aos testes 2.1 e 2.6. Nele teste foi utilizado outro perfil de preço que está apresentado a seguir e pode ser visto também na coluna preços 3 tabela A apêndice A.

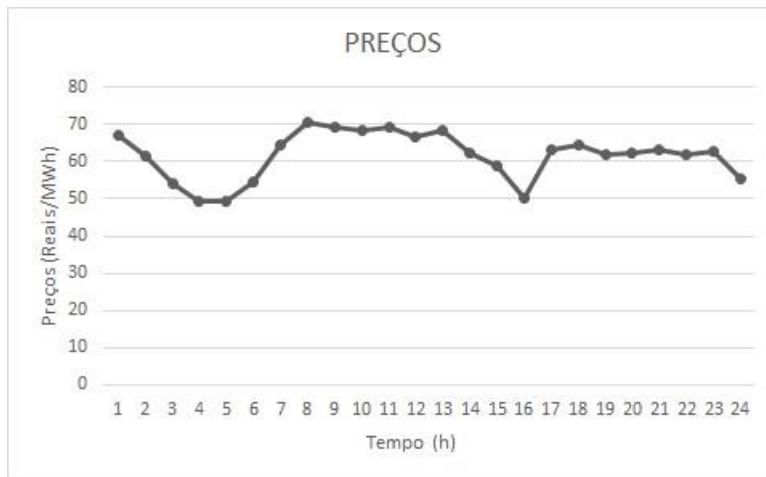


Figure 4.28 - Preço do modelo de resposta à energia teste 2.7

E a tabela de dados do usuário é apresentada a abaixo.

Tabela 4.12- dados do consumidor teste 2.7

Máxima energia por hora	3 MW
Mínima energia por hora	0 MW
Consumo mínimo de energia por dia	15 MWh
Limite da rampa de subida	3 MW/h
Limite da rampa de descida	3 MW/h
Utilidade do consumidor	41.5 Reais/MWh

Este teste foi o teste que apresentou a maior complicação. O modelo, apesar das suas limitações por ser um modelo teste mais simples, dá um bom entendimento para o modelo de resposta à demanda. Este teste foi feito utilizando o mesmo código que foi usado para os testes no modelo de resposta à energia, entretanto quando se colocou valores de preços para energia bem acima dos valores da utilidade do consumidor, o modelo se mostrou com uma grande limitação quando se trata de valores altos para o preço da energia. A figura a seguir ilustra o custo minimizado do consumidor. Custo total z é de 443.2725 Reais.

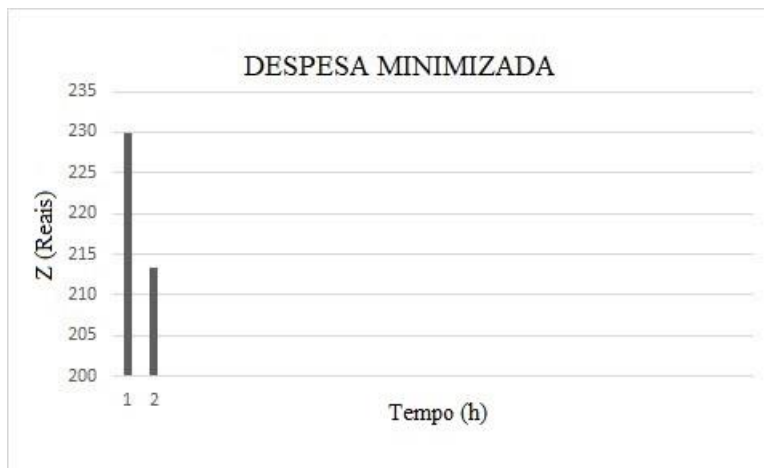


Figure 4.29 - custo minimizado do modelo de resposta à energia teste 2.7

Como pode ser notado há somente consumo para as duas primeiras horas do dia e mesmo havendo preços mais baixos neste novo perfil de preço, o modelo não reagiu como o modelo de resposta à demanda, no qual, mesmo com valores altos para energia, o consumidor continua a fazer o uso da energia, mas procurando valores mais baixos para aumentar o seu consumo durante as horas do dia. Este fato ilustra que, por ser um modelo inicial, há necessidade de aperfeiçoamento, adicionando novas restrições ou métodos diferentes de otimização para o modelo de resposta à energia. A seguir está apresentado o consumo para o perfil de preço apresentado na figura 4.28. Consumo total 4.5 (MWh)

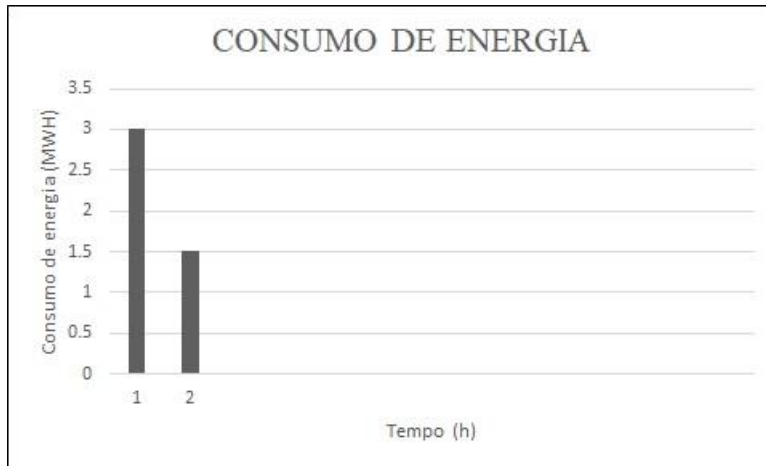


Figure 4.30 - Consumo modelo de resposta à energia teste 2.7

A figura 4.30 mostra que quando utilizados valores altos de energia o modelo de resposta à energia não consegue enxergar os valores mais baixos para as horas seguintes do dia, como ocorreu para os testes 2.6 e 2.1. O modelo, apesar de não apresentar uma boa resposta quando variamos o consumo mínimo de energia por dia, como foi explicado no teste 2.1,2.2 e 2.3, e por não responder de forma correta quando usamos valores para o preço da energia acima da utilidade do consumidor, se mostra eficaz quando analisamos os valores das rampas que limitam a energia e_{t+h} e e_{t+h+1} que são dadas pelas restrições (2c) e (2d) na seção 2.5 capítulo 2. Uma possível alternativa para contornar esta limitação e aperfeiçoar o modelo, de forma a se comportar semelhante ao modelo de resposta à demanda seria acrescentar uma outra restrição para controlar o energia consumida e_t e e_{t+h} , como é feito no modelo de resposta a demanda nos quais as rampas controlam a demanda e a energia é calculada utilizando aproximação trapezoidal (KHANACADEMY) com base nos valores de demandas d_{t+h} e d_{t+h+1} dadas pelas restrições (1c) que está no capítulo 2 seção 2.4. Foi observado durante a simulação que quando o preço da energia em determinado momento é abaixo da utilidade do consumidor, o modelo aloca energia neste instante, demonstrando como foi falado anteriormente que a utilidade do consumidor também é um fator que influencia nos resultados.

Os testes realizados nos modelos de resposta à demanda e resposta à energia, evidenciam que o modelo de resposta à demanda é um que apresenta as melhores repostas quando se varia a energia mínima consumida no dia e_{day} , limites das rampas e perfil de preço. O modelo de resposta à demanda, apresentou valores satisfatórios durante o estudo de cada caso aqui apresentando. Em contra partida, o modelo de resposta à energia, como foi

mencionado, não apresenta uma boa resposta quando se varia a energia mínima consumida no dia e_{day} e o perfil de preço da energia para cada hora do dia, entretanto, o modelo apresenta uma boa resposta quando se varia os limites das rampas.

O modelo de resposta à demanda apresenta um modelo matemático mais complexo o que o levou o mesmo a possuir as melhores respostas em cada teste realizado neste projeto. Embora o modelo de resposta à energia, não apresente respostas com a mesma eficácia que o modelo de resposta à demanda, esse modelo pode ser aprimorado de forma a apresentar respostas similares, iguais ou melhores que o modelo de resposta à demanda.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

Este projeto buscou apresentar dois modelos dinâmicos determinísticos para precificação em tempo real da energia elétrica. O modelo de resposta à demanda e resposta à energia com o uso de smart-grid é um tema novo e que possui muitas alternativas de pesquisas em diversas áreas. As pesquisas que vêm sendo feitas (CAMPOS, 2004), entretanto, visam avaliar o impacto da smart-grid na rede elétrica utilizando diferentes parâmetros e fatores.

Há muitas pesquisas na área do controle de resposta à demanda e à energia que utilizam diferentes modelos e técnicas para solucionar um dado problema. Neste trabalho utiliza-se a programação linear, que simplifica a solução. No entanto, esta simplificação aumenta o número de variáveis a serem analisadas, causando um esforço computacional bem maior, como foi notado durante os testes realizados nos dois modelos.

Neste trabalho foi apresentado um modelo determinístico dinâmico para o problema de resposta à demanda com smart-grid que é a base deste trabalho. Apesar do modelo abordado avaliar que o controle é dado pelo preço pago pela energia, ele pode ser generalizado para casos onde há tarifas compostas por valores fixos ou variáveis durante o dia, de forma a levar em consideração como a agência reguladora opera, pois com base em (ANEEL, 2007) é dever da agência estabelecer as tarifas de modo a promover a modicidade tarifária na defesa do interesse público e juntamente promover o equilíbrio econômico financeiro dos agentes que prestam os serviços de energia. Desta forma, o modelo de resposta à demanda mostrou que o consumidor sempre tende a fazer um maior consumo de energia em momentos onde os preços são mais baixos, como foi evidenciado no capítulo 4 para os testes com o modelo de resposta à demanda.

Foi então proposto o modelo de resposta à energia, como forma auxiliar de resolução do modelo base de resposta à demanda. Este modelo, por ser um modelo inicial, necessita de ajustes nos seus parâmetros de forma que possa ficar o mais perto possível do modelo de resposta à demanda. Notou-se com os testes realizados que o modelo de resposta à energia apresenta uma boa resposta quando variam-se as rampas que limitam a energia para as horas seguintes, entretanto, quando varia-se o consumo mínimo diário de energia ou quando

aumenta-se muito os preços da energia, o modelo não se comporta muito bem. Logo há necessidade de aprimoramento do método, colocando novas restrições ou novos parâmetros, como foi sugerido no capítulo 4.

Os objetivos principais do projeto foram alcançados, pois o modelo de resposta à demanda com smart grid em tempo real se mostrou eficiente. Embora tenha sido utilizado um modelo determinístico, no qual os preços a serem pagos pela energia eram conhecidos, este modelo possui a capacidade de continuar em pesquisas futuras, levando em conta que os preços para a energia sejam variáveis e desconhecidos, como foi analisado neste projeto. Um segundo objetivo atingido foi o de apresentar uma proposta alternativa para o modelo base. Essa proposta foi feita com o modelo de resposta à energia, que proporcionou as bases necessárias para que o modelo de resposta à demanda fosse implementado de forma satisfatória, pois, por apresentar uma modelagem menos robusta, diferente do modelo de resposta à demanda, o modelo de resposta à energia auxiliou no trabalho com parâmetros e variáveis durante a fase de programação, assim fornecendo o entendimento necessário para implementação do modelo base.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como apresentado na conclusão, o modelo de resposta à demanda com smart-grids em tempo real tem a possibilidade de aprofundamento utilizando otimização robusta (D BERTSIMAS, 2003).

O modelo de resposta à demanda apresentado na seção 2.4 do capítulo 2, não está formulado para quando os preços $\{\lambda_{t+h}\}, h = 1, \dots, 24 - t$ são de valores desconhecidos. Para considerar que os preços são desconhecidos, é necessário certos intervalos de confiança α para o nível dos preços, $\lambda_{t+h}^{\min} \leq \lambda_{t+h} \leq \lambda_{t+h}^{\max}$, $h = 1, \dots, 24 - t$, e reformula o problema de resposta à demanda apresentado na seção 2.4 para ser um modelo robusto como apresentado abaixo.

$$\begin{aligned} & \text{Min} \\ & \lambda_t^a e_t - u_t(e_t) + \sum_{h=1}^{24-t} [\{\lambda_{t+h}^{\min}\} e_{t+h} - u_{t+h}(e_{t+h})] + \beta \Gamma + \sum_{h=1}^{24-t} \xi_{t+h} \end{aligned} \quad (2a)$$

s.a:

Restrições (1b) – (1f) (2b)

$$\beta + \xi_{t+h} \geq (\lambda_{t+h}^{\max} - \lambda_{t+h}^{\min}) y_{t+h} \quad h = 1, \dots, 24 - t \quad (2c)$$

$$\xi_{t+h} \geq 0 \quad h = 1, \dots, 24 - t \quad (2d)$$

$$y_{t+h} \geq 0 \quad h = 1, \dots, 24 - t \quad (2e)$$

$$\beta \geq 0 \quad (2f)$$

$$e_{t+h} \leq y_{t+h} \quad h = 1, \dots, 24 - t \quad (2g)$$

As variáveis decisão do modelo de resposta à demanda com smart grid em tempo real utilizando otimização robusta apresentado acima são:

$$\{e_{t+h}, h = 0, \dots, 24 - t\} \cup \{d_{t+h}, h = 1, \dots, 25 - t\} \cup \{\beta\} \cup \{\xi_{t+h}, h = 0, \dots, 24 - t\} \cup \{y_{t+h}, h = 0, \dots, 24 - t\}.$$

O modelo acima é obtido usando propriedades de dualidade e equivalência lineares exatas. As variáveis β e ξ_{t+h} são variáveis duais do modelo determinístico da seção 2.4 do capítulo 2, usadas para levar em conta os limites de preços conhecidos, enquanto uma variável auxiliar y_{t+h} é usada para obter expressões lineares equivalentes. Uma explicação de como resolver esse problema robusto é dado em (D BERTSIMAS, 2003).

Γ É um parâmetro que controla o nível de robustez na função objetivo. Este parâmetro leva valores reais no intervalo, isto é, entre zero e o valor desconhecido do preço. Desta forma, se a influência dos desvios de preços na função objetivo é ignorada, enquanto $\Gamma = 24 - t$, todos os desvios nos preços são considerados, levando a uma solução mais conservadora.

Logo, o modelo de resposta à demanda utilizando otimização robusta apresenta mais restrições e lida com cenários onde o preço da energia é variável, proporcionando uma análise mais ampla para trabalhos futuros. Recomenda-se a continuação deste projeto para desenvolvimento e aperfeiçoamento do método utilizado, devido à praticidade de uso de smart grids e melhorias trazidos por elas ao setor elétrico e financeiro, além de servi como um modelo de comparação para o modelo de resposta à demanda determinístico apresentado neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBADI, M. A. E.-S. E. Demand response in electricity markets: An overview. **IEEE- Power Engineering Society General meeting**, p. 1-5, 2007.

ANEEL. **Perguntas e respostas sobre tarifas da distribuidoras de energia elétrica**. Agência nacional de Energia Elétrica. [S.l.]. 2007.

ANTONIO J. CONEJO, J. C. R. E. M. A. P. Forecasting electricity prices for a day-ahead pool-based electric energy market. **International Journal of Forecasting**, v. 21, p. 435–462, July–September 2005.

BELLMAN, R. the theory of dynamic programming, United States of America, v. 60, n. 6, p. 503-515, 1952.

BERTSEKAS, D. P. **Dynamic Programming and Optimal Control**. 3. ed. Massachusetts: Athena Scientific ,Belmont, v. 1, 2005.

BORENSTEIN, S. The Long-run Efficiency of Real-Time ELectricity Pricing. **The energy Journal**, v. 26, n. 3, p. 93-116, 2005.

CAMPOS, A. **Gerenciamento pelo lado da demanda: Um estudo de caso**. **Dissertação**. USP. São Paulo. 2004.

CET. Companhia de Engenharia de Tráfego. **Companhia de Engenharia de Tráfego**. Disponível em: <<http://www.cetsp.com.br/consultas/rodizio-municipal/como-funciona.aspx>>. Acesso em: junho 2017.

CHAMBERLING, C. W. G. A. J. H. **Demand-Side Management: Concepts and Methods**. Lilburn, GA: Fairmont Press. 1987.

CONEJO, A. J. . M. M. L. B. Real-Time Demand Response Model. **IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID**, v. 1, n. 3, December 2010.

D BERTSIMAS, M. S. M. S. Robust discrete optimization and network flows. **Math. Program**, 998, 2003. 49-71.

D. PENÃ, G. C. T. R. S. T. **A course in time series analysis**. New York: Wiley, 2001.

DIMITRIS BERTSIMAS, M. S. The Price of Robustness. **OPERATIONS RESEARCH**, v. 52, n. 1, p. 35-53, January-February 2004.

GELLINGS, C. E. The concept of demand-side management for electric utilities.. **Proceedings of the IEEE**, n. 10, p. 14468-1870, 1985.

GELLINGS, C. W. The concept of demand-side management for electric utilities. **IEEE**, p. 1468 - 1470, october 1985.

GROUP, T. B. Quantifying Demand Response Benefits in PJM. **Energeics**. Disponivel em: <<http://sites.energetics.com/MADRI/pdfs/battlegroupreport.pdf>>. Acesso em: july 2017.

HOLLAND, S. P. The Short-Run Effects of Time-Varying Prices in Competitive Electricity Markets. **The Energy Journal**, v. 27, n. 4, p. 127-155, 2006.

JOHN R BIRGE, F. L. **Introduction to Stochastic Programming**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 1997.

JULIA L HIGLE, S. S. Stochastic decomposition: An algorithm for two-stage linear programs with recourse. **Mathematics of operations research**, v. 16, n. 3, 1991/8.

KHANACADEMY. KHANACADEMY. **KHANACADEMY**. Disponivel em: <<https://www.khanacademy.org/math/ap-calculus-ab/riemann-sums-ab/trapezoidal-rule-ab/a/understanding-the-trapezoid-rule>>. Acesso em: JUNE 2017.

KIRK, D. E. **Optimal Control Theory: An Introduction**. 1. ed. [S.l.]: [s.n.], v. 1, 1970.

KLUWER, P. K. A. G. Y. Robust Discrete Optimization and its Applications. **IEE Transactions**, v. 32, p. 280-281, 1997.

LAFFERTY, R. . H. D. . B. J. . M. G. . M. D. . A. B. D. **Demand responsiveness in electricity markets**. Federal Energy Regulatory Commission, Office of Markets, Tariffs, and Rates. [S.l.], p. 15. 2001.

MEERAUS, M. R. B. & A. gams. Disponivel em: <<https://www.gams.com/>>. Acesso em: June 2017.

MORAIS, H. G. V. **Gestão de Recursos energéticos nas Smart Grids**. Dissertação (Mestrado), Instituto Superior de Engenharia do Porto. Portugal. 2010.

ONS. Institucional. **O Setor elétrico**. Disponível em: <www.ons.org.br>. Acesso em: 2017.

PETTERSEN, A. B. P. A. E. Optimizing demand-side bids in day-ahead electricity markets. **IEEE Trans. Power Syst**, v. 18, p. 716-723, 2003.

RJ BUTLER, J. A. J. S. A robust optimization model for strategic production and distribution planning for a new product. **University of Central Florida, Orlando**, 2003.

SHORT, R. S. A. W. Evaluating the impacts of real-time pricing on the usage of wind generation. **IEEE Trans. Power Syst**, v. 24, p. 516–524, 2009.

SILVA, H. B. D. **Resposta à Demanda via Precificação em Tempo Real para Controle da Demanda de Energia**. UFMG. Belo horizonte, p. 23-27. 2013.

SIQUEIRA, T. et al. Stochastic Dynamic Programming for Long Term Hydrothermal Scheduling Considering Different Streamflow Models. **9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems**, Stockolm, Sweden, 2006.

SMARTGRIDS. European Technology Platform for the Electricity networks of the Future. Disponível em: <www.smartgrids.eu>.

SOUZA, Z. . A. R. D. **A importância da reação da demanda na formação dos preços de curto prazo em mercados de energia elétrica**. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. [S.l.]. 2010.

USDE. **Benefits of demand response in electricity markets and recommendations for achieving them**. U.S. Department of Energy. [S.l.]. 2006.

VITTAL, V. The impact of renewable resources on the performance and reliability of the electricity grid. **Bridge**, v. 1, n. 40, p. 5-12, 2010.

WOLLENBERG, S. M. A. A. B. F. Toward a smart grid: Power delivery for the 21st century. **IEEE Power Energy Mag**, v. 3, n. 5, p. 34-41, 2005.

APÊNDICES

APÊNDICE A. TABELA DE PREÇOS

Apresenta-se na Tabela os dados dos preços λ para cada hora do dia utilizados nos modelos de resposta à demanda com smart grid e resposta à energia com smart grid.

Tabela A - Preços da Energia (Reais/ MWh)

t	λ (Reais/MWh)		
	Preços 1	Preços 2	Preços 3
1	44.80	22.40	67.2
2	41.03	20.515	61.545
3	36.10	18.05	54.15
4	33.00	16.5	49.5
5	33.00	16.5	49.5
6	36.46	18.23	54.69
7	43.01	21.505	64.515
8	47.05	23.525	70.575
9	46.06	23.03	69.09
10	45.51	22.755	68.265
11	46.06	23.03	69.09
12	44.50	22.25	66.75
13	45.61	22.805	68.415
14	45.42	22.71	62.3
15	39.28	19.64	58.92
16	41.16	20.58	50.20
17	42.02	21.005	63.015

18	43.00	21.50	64.50
19	41.16	20.58	61.74
20	41.63	20.815	62.445
21	42.00	21.00	63.00
22	41.16	20.58	61.74
23	41.87	20.935	62.805
24	36.81	18.408	55.215

Estes valores são os parâmetros de entrada referente ao preço da energia λ que são mostrados ao consumidor antes o início de cada hora.

APÊNDICE B. Código do modelo de resposta à demanda com smart grid em tempo real

```

option
limrow = 55
limcol=15;
*Option LP = Cplex;
set
t tempo /1*24/
h setores /1*24/
din(t)
;
alias(t,t1);
scalar eday " minimo consumo de energia diario" /15/;
parameter rup(t) " rampa de subida";
rup(t) = 1;
parameter rdown(t) " rampa de descida";

```

rdown(t) = 1;

scalar k " u(t) consumer utility" /41.5/;

scalar dmax " limite superior energia"/3/;

scalar dmin " limite inferior energia"/0/;

\$ontext

*Funcionando, juntando somando tudo no final 15

*preco1

parameter lambda(t) preco da energia na hora t+h

/

1 44.80

2 41.03

3 36.10

4 33.00

5 33.00

6 36.46

7 43.01

8 47.05

9 46.06

10 45.51

11 46.06

12 44.50

13 45.61

14 45.42

15 39.28

16 41.16

17 42.02

18 43.00

19 41.16

20 41.63

21 42.00

22 41.16

23 41.87

24 36.81

/

;

\$offtext

\$ontext

* ele só muda preços abaixo de 41.16,funcionando

*preco 2

parameter lambda(t) preco da energia na hora t+h

/

1 67.2

2 61.545

3 54.15

4 49.5

5 49.5

6 54.69

7 64.515

8 70.575

9 69.09

10 68.265

11 69.09

12 66.75

13 68.415

14 62.3

15 58.92

16 50.2

17 63.015

18 64.5

19 61.74

20 62.445

21 63.00

22 61.74

23 62.805

24 55.215

/

;

\$offtext

**ele considera tudo, poisos preços estão abaixo de 41.16

*preco3 funcionando, pegando tudo no final

parameter lambd(t) preco da energia na hora t+h

/

1 22.4

2 20.515

3 18.05

4 16.5

5 16.5

6 18.23

7 21.505

8 23.525

9 23.03

10 22.755

11 23.03

12 22.25

13 22.805

14 22.71

15 19.64

16 20.58

17 21.005

18 21.5

19 20.58

20 20.815

21 21.0

22 20.58

23 20.935

24 18.408


```

/
;
*
variable zmin;
scalar ee;
variables
z    função a ser minimizada
d(t) demanda requirida
e(t) energia requirida
P(t) variavel auxiliar de controle;
positive variables p,d;
d.fx('1')=1.5;
p.fx('1')=0;
equation
objetivo(t) função a ser minimizada;
objetivo(t)$DIN(t) .. z =e= lambda(t)*e(t)- k*e(t) + sum((h)$ (ord(h) le (card(h)-
ord(t))),lambda(t+ord(h))*e(t+ord(h)) - k*e(t+ord(h)));
* primeira restrição
equation
limConsEnergy(t) restricao para o consumo de energia;
limConsEnergy(t)$DIN(t) .. p(t-1) + e(t) + sum((h)$ (ord(h) le card(h)-
ord(t)),e(t+ord(h))) =g= eday;
*segunda restricao
equation
Energyusage(t,h) aproximacao trapezoidal;
Energyusage(t,h)$ (DIN(t) and (ord(h) le card(h)-ord(t))).. e(t+ord(h))=e= (d(t+(ord(h)-
1)) + d(t + ord(h)))*0.5 ;
*terceirarestrição
equation
RampUp(t,h) restricao rampa de subida
RampDown(t,h) restricao rampa de descida;
RampUp(t,h)$ (DIN(t) and (ord(h) le card(h)-ord(t))).. d(t+(ord(h)-1)) - d(t + ord(h))
=| rup(t) ;

```

RampDown(t,h) $\$(DIN(t) \text{ and } (\text{ord}(h) \text{ le } \text{card}(h)-\text{ord}(t))).. d(t + \text{ord}(h)) + d(t+(\text{ord}(h)-1)) =l= rdown(t);$

*quarta restricao

equation

maxdemanda(t,h) maxima demanda para o dia emax(t)

mindemanda(t,h) minima demanda para o dia emin(t);

maxdemanda(t,h) $\$(DIN(t) \text{ and } (\text{ord}(h) \text{ le } \text{card}(h)-\text{ord}(t))).. d(t + \text{ord}(h)) =l= dmax;$

mindemanda(t,h) $\$(DIN(t) \text{ and } (\text{ord}(h) \text{ le } \text{card}(h)-\text{ord}(t))).. d(t + \text{ord}(h)) =g= dmin;$

model lacos_pedi /all/;

file lacos_pedi_smart /lacos_pedi.dat/,energy /energy.dat/, passado /passado.dat/ ;

put lacos_pedi_smart ;

din(t)=no;

loop(t1,

din(t1)=yes;

Solve lacos_pedi using lp minimizing z;

zmin.l(t1)=abs(z.l);

put"t=",t1.tl:8,"zmin=",zmin.l(t1):8:4/;

din(t1)=no;

);

put passado;

put 'passado esperado'// ;

loop(t1,

din(t1)=yes; ;

p.l(t1-1) = p.l(t1-1)+ e.l(t1-1);

put"t=", t1.tl,"p=",p.l(t1):8:4 /;

din(t1)=no;

);

put energy;

put 'energy esperado'// ;

loop(t1,

din(t1)=yes;

ee=e.l(t1);

```

put"t=", t1.t1,"ee=",ee:8:4 /;
din(t1)=no;
);
Execute_Unload "lacos_pedi.gdx" e.l,lambd,zmin.l;
execute 'gdxxrw.exe lacos_pedi.gdx var=e.l rng=energia!'
execute 'gdxxrw.exe lacos_pedi.gdx par=lambd rng=precos!'
execute 'gdxxrw.exe lacos_pedi.gdx var=zmin rng=zmin!'

```

APÊNDICE B. 1 Código do modelo de resposta à energia com smart grid em tempo real

```

option
limrow = 55
limcol=15;
set
t tempo /1*24/
h setores /1*24/
din(t)
;
alias(t,t1);
scalar eday " minimo consumo de energia diario" /15/;
parameter rup(t) " rampa de subida";
rup(t) = 3;
parameter rdown(t) " rampa de descida";
rdown(t) = 3;
scalar k " u(t) consumer utility" /41.5/;
scalar emax " limite superior energia"/1.5/;
scalar emin " limite inferior energia"/0/;
$ontext
*preco1
parameter lambd(t) preco da energia na hora t+h
/

```

1 44.80
2 41.03
3 36.10
4 33.00
5 33.00
6 36.46
7 43.01
8 47.05
9 46.06
10 45.51
11 46.06
12 44.50
13 45.61
14 45.42
15 39.28
16 41.16
17 42.02
18 43.00
19 41.16
20 41.63
21 42.00
22 41.16
23 41.87
24 36.81

/

;

\$offtext

*preco 2

parameter lambd(t) preco da energia na hora t+h

/

1 67.2

2 61.545

3 54.15
4 49.5
5 49.5
6 54.69
7 64.515
8 70.575
9 69.09
10 68.265
11 69.09
12 66.75
13 68.415
14 62.3
15 58.92
16 50.2
17 63.015
18 64.5
19 61.74
20 62.445
21 63.00
22 61.74
23 62.805
24 55.215

/

;

\$ontext

*preco3

parameter lambd(t) preco da energia na hora t+h

/

1 22.4
2 20.515
3 18.05
4 16.5

5 16.5
6 18.23
7 21.505
8 23.525
9 23.03
10 22.755
11 23.03
12 22.25
13 22.805
14 22.71
15 19.64
16 20.58
17 21.005
18 21.5
19 20.58
20 20.815
21 21.0
22 20.58
23 20.935
24 18.408

/

;

\$offText

variable zmin;

scalar ee;

variables

z função a ser minimizada

e(t) energia consumida

p(t) variável auxiliar;

positive variables e,p;

e.fx('1')=3;

p.fx('1')=0;

```

****

equation
objetivo(t) função a ser minimizada;
objetivo(t)$DIN(t) .. z =e= lambda(t)*e(t)- k*e(t) + sum((h)$ (ord(h) le (card(h)-
ord(t))),lambda(t+ord(h))*e(t+ord(h)) - k*e(t+ord(h)));
*****

* primeira restrição
equation
limConsEnergy(t) restricao para o consumo de energia;
limConsEnergy(t)$DIN(t) .. p(t-1)+ e(t) + sum((h)$ (ord(h) le card(h)-
ord(t)),e(t+ord(h))) =g= eday;
****

*secunda restrição
equation
RampUp(t,h) restricao rampa de subida
RampDown(t,h) restricao rampa de descida;
RampUp(t,h)$ (DIN(t) and (ord(h) le card(h)-ord(t))).. e(t+(ord(h)-1)) - e(t+ord(h)) =l=
rup(t) ;
RampDown(t,h)$ (DIN(t) and (ord(h) le card(h)-ord(t))).. e(t+ord(h)) + e(t+(ord(h)-1))
=l= rdown(t);
*****

*terceira restricao
equation
maxdemanda(t,h) maxima demanda para o dia emax(t)
mindemanda(t,h) minima demanda para o dia emin(t);
maxdemanda(t,h)$ (DIN(t) and (ord(h) le card(h)-ord(t))).. e(t+ord(h)) =l= emax;
mindemanda(t,h)$ (DIN(t) and (ord(h) le card(h)-ord(t))).. e(t+ord(h)) =g= emin;
*****

model lacos_pedi_energy /all/;
****

file lacos_pedi3 /lacos_pedi_energy.dat/,energy /energy.dat/, passado /passado.dat/ ;
put lacos_pedi3;
din(t)=no;

```

```

loop(t1,
din(t1)=yes;
Solve lacos_pedi_energy using lp minimizing z;
zmin.l(t1)=abs(z.l);
put"t=",t1.tl:8,"zmin=",zmin.l(t1):8:4/;
din(t1)=no;
);
put pasado;
put 'passado esperado'// ;
loop(t1,
din(t1)=yes; ;
p.l(t1-1) = p.l(t1-1)+ e.l(t1-1);
put"t=", t1.tl,"p=",p.l(t1):8:4 /;
din(t1)=no;
);
put energy;
put 'energy esperado'// ;
loop(t1,
din(t1)=yes;
ee=e.l(t1);
put"t=", t1.tl,"ee=",ee:8:4 /;
din(t1)=no;
);
Execute_Unload "lacos_pedi_energy.gdx" e.l,lambda,zmin.l;
execute 'gdxrw.exe lacos_pedi_energy.gdx var=e.l rng=energia!'
execute 'gdxrw.exe lacos_pedi_energy.gdx par=lambda rng=precos!'
execute 'gdxrw.exe lacos_pedi_energy.gdx var=zmin rng=zmin!'

```