

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
ENGENHARIA ELÉTRICA

GUILHERME AUGUSTO BORIN RODRIGUES

ANÁLISE DE MODELOS DE TARIFAÇÃO EM REDES INTELIGENTES

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017

GUILHERME AUGUSTO BORIN RODRIGUES

ANÁLISE DE MODELOS DE TARIFAÇÃO EM REDES INTELIGENTES

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Renan Durand

CORNÉLIO PROCÓPIO
2017



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



FOLHA DE APROVAÇÃO

Guilherme Augusto Borin Rodrigues

Análise de modelos de tarifação em redes inteligentes

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 16:00hs do dia 29/05/2017 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Fábio Renan Durand - Presidente (Orientador)

Prof(a). Dr(a). Silvio Aparecido de Souza - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Leonardo Poltronieri Sampaio - (Membro)

À minha mãe e avó,
minha gratidão sempre será eterna por tudo o que
sempre fazem por mim. Obrigado, te amo!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer ao professor Fábio Renan Durand por ter aceitado ao meu convite de orientação nesta jornada, por todos seus conselhos, apoio e instrução para o melhor desenvolvimento do trabalho proposto, que, sem sua preciosa contribuição, não seria possível tal realização.

Aos professores Leonardo Poltronieri Sampaio e Silvio Aparecido de Souza, por aceitarem ser banca de avaliação e pelas contribuições no trabalho.

À Universidade Tecnológica Federal do Paraná por todos os anos de estudo e tudo que me proporcionou tanto no desenvolvimento profissional quanto pessoal.

À minha família querida que sem seu incentivo nada seria possível, pelo amor e apoio incondicional em todos os momentos.

A todos os amigos que estiveram presentes no decorrer dos anos de estudo, nas fases difíceis e no desenvolvimento pessoal, amizade que levarei para a vida toda.

E, em especial aos meus avós Ruth e Francisco, sem eles nada seria possível, sempre incentivando e apoiando, com seu amor e toda a experiência de vida.

Let the future tell the truth, and evaluate each one according to his work and accomplishments. The present is theirs; the future, for which I have really worked, is mine.
(TESLA, Nikola).

Deixem que o futuro diga a verdade e avalie cada um de acordo com o seu trabalho e realizações. O presente pertence a eles, mas o futuro pelo qual eu sempre trabalhei pertence a mim.
(TESLA, Nikola).

RESUMO

RODRIGUES, Guilherme Augusto Borin. Análise de modelos de tarifação em redes inteligentes. 2017. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

Neste trabalho, propõe-se a análise de um modelo de tarifação de energia elétrica para redes inteligentes. São apresentadas três propostas de modelos de tarifação para redes inteligentes, baseados em tarifas dinâmicas para cada consumidor, onde o último modelo proposto é simulado para a análise. O modelo escolhido é baseado em resposta da demanda e utiliza-se do conceito de elasticidade, onde a demanda está relacionada ao preço da energia. São propostas quatro diferentes situações para avaliação do comportamento do modelo escolhido e comparação de seu comportamento com as tarifas convencional e branca. Em cada uma das situações é considerada uma curva de carga com diferentes níveis de consumo ao longo do dia. A análise é realizada com perfis de consumidores de baixa tensão. O objetivo principal do trabalho é verificar o comportamento da tarifação dinâmica e, assim, apresentar em cada análise, o percentual de cada uma das tarifas em relação a tarifa convencional, a fim de demonstrar ao cliente qual será a melhor tarifa para o seu perfil de consumo.

Palavras-chave: redes inteligentes, tarifa branca, tarifa convencional, elasticidade, tarifa *smart grid*.

ABSTRACT

RODRIGUES, Guilherme Augusto Borin. Analysis of electricity pricing models for smart grids. 2017. 58 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2017.

In this work, it is proposed the analysis of a smart electricity pricing model for smart grids. Three proposals for pricing models for smart grids based on dynamic tariffs for each consumer are presented, where the last proposed model is simulated for analysis. The model chosen is based on demand response and uses the concept of elasticity, where demand is related to the price of energy. Four different situations are proposed to evaluate the behavior of the chosen model and to compare its behavior with conventional and white tariffs. In each of the situations a load curve with different consumption levels throughout the day is considered. The analysis is performed with profiles of low voltage consumers. The main objective of this work is to verify the behavior of smart electricity pricing model and thus to present, in each analysis, the percentage of each one of the tariffs in relation to the conventional tariff, in order to demonstrate to the customer what will be the best electricity tariff for its consumption profile.

Keywords: smart grid, white tariff, conventional tariff, elasticity, pricing model.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo tradicional e arquitetura de redes inteligentes.	19
Figura 2 - Modelo conceitual de rede inteligente.	21
Figura 3 - Comparação entre a tarifa branca e tarifa convencional.	26
Figura 4 - Demanda e preço de 10 a 12 de fev. 2014.	28
Figura 5 - Curvas de preço fixo e variável em função da demanda.	29
Figura 6 - Curvas de preço variável usando informações do display dentro de casa.	30
Figura 7 - Diagrama de bloco para o algoritmo de previsão proposto.	32
Figura 8 - Diagrama de blocos para o modelo híbrido de previsão adotado no segundo estágio do modulo de previsão de preço.	32
Figura 9 - Curva típica de carga.	33
Figura 10 - Mudanças da demanda de acordo com a tarifa.	34
Figura 11 - (a) Curva da da maximização de lucro. (b) Curva da carga.	35
Figura 12 - Tarifa Branca.	39
Figura 13 - Comparação entre Tarifa Convencional e Tarifa Branca.	39
Figura 14 - Curva de demanda de 550 kWh/mês.	42
Figura 15 - Curva de Tarifa em Redes Inteligentes.	43
Figura 16 - Comparação de tarifas.	44
Figura 17 - Demanda de 100 kWh/mês.	45
Figura 18 - Curva de Tarifa em Redes Inteligentes.	46
Figura 19 - Comparação de Tarifas.	47
Figura 20 - Demanda de 1500 kWh/mês.	48
Figura 21 - Curva de Tarifa em Redes Inteligentes.	49
Figura 22 - Comparação de Tarifas.	50
Figura 23 - Demanda de 2000 kWh/mês.	51
Figura 24 - Curva de Tarifa em Redes Inteligentes.	52
Figura 25 - Comparação de Tarifas.	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Divisão do grupo de consumidores A.....	22
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de tarifas.....	44
Tabela 2 - Comparação de tarifas.....	47
Tabela 3 - Comparação de tarifas.....	49
Tabela 4 - Comparação de tarifas.....	52

LISTA DE SIGLAS

ANEEL	AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA
DOE	DEPARTMENT OF ENERGY
EPRI	ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	CONTEXTO ATUAL DE ENERGIAS.....	13
1.2	MOTIVAÇÃO.....	14
1.3	OBJETIVOS.....	15
1.3.1	Objetivo Geral.....	15
1.3.2	Objetivos Específicos.....	15
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	16
2	ARQUITETURA DE SMART GRID.....	17
3	MODELOS DE TARIFA.....	22
3.1	TARIFA CONVENCIONAL E HORO-SAZONAL.....	22
3.1.1	Tarifa Convencional.....	23
3.1.2	Tarifa Horo-Sazonal.....	24
3.2	TARIFA BRANCA.....	25
3.3	PROPOSTAS EM REDES INTELIGENTES.....	27
4	METODOLOGIA DE ANÁLISE.....	37
4.1	TARIFA CONVENCIONAL.....	37
4.2	TARIFA BRANCA.....	38
4.3	TARIFA EM REDES INTELIGENTES.....	40
5	RESULTADOS.....	41
5.1	PRIMEIRA SITUAÇÃO.....	41
5.2	SEGUNDA SITUAÇÃO.....	45
5.3	TERCEIRA SITUAÇÃO.....	48
5.4	QUARTA SITUAÇÃO.....	50
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
	REFERÊNCIAS.....	56

1 INTRODUÇÃO

O panorama atual do setor energético necessita de novas abordagens para geração de energia através de maneiras mais sustentáveis e eficientes. Com isso, busca-se a geração de energia por diversas fontes, aproveitando as fontes energéticas alternativas. Aumentando assim, a flexibilidade e eficiência do sistema elétrico como um todo, através a inserção de novas tecnologias dos setores da eletrônica e telecomunicações.

1.1 CONTEXTO ATUAL DE ENERGIAS

Com o avanço tecnológico, cada vez mais dinâmico e imediatista, evidencia-se uma procura maior por qualidade, eficiência, sustentabilidade e segurança no que se refere a geração, transmissão, consumo e armazenamento de energia.

Com tais fatores em questão as redes inteligentes, mais conhecidas como *smart grids*, lideram uma revolução no setor de tecnologia de energia elétrica, pois englobam técnicas atuais de eletrônica, telecomunicação e tecnologia da informação, buscando uma maior automação e, conseqüentemente, uma melhoria do setor elétrico (LAMIN, 2013).

Outro fator relevante é que através do desenvolvimento desta tecnologia as empresas do setor elétrico, além de suprir suas próprias necessidades e as dos clientes, agregam valor aos seus ativos melhorando a disponibilidades de seus serviços para a sociedade (PASCALICCHIO, 2011).

Ainda, algumas peculiaridades nas redes elétricas, como, por exemplo, as distâncias entre os centros consumidores e onde a energia é gerada, muitas vezes não permite o controle de todos elementos do sistema, ocasionando dificuldades na distribuição de energia ou até mesmo a falta de energia. No Brasil, este fato é agravado por problemas sazonais, uma vez que a matriz energética é majoritariamente hídrica, dependendo, assim, das chuvas para que possa haver a geração de energia.

Desta forma, evidencia-se a dificuldade econômica em se implementar uma tecnologia viável que permeie o controle de distribuição e gestão de redes de distribuição de energia elétrica como um todo. Portanto, a rede inteligente, surge como uma solução, uma vez que interliga os dispositivos como sensores, medidores, controladores, entre outros equipamentos instalados no sistema (PASCALICCHIO, 2011).

Os elementos de telecomunicações, otimiza a infraestrutura tradicional da rede elétrica, possibilitando a comunicação de medidores eletrônicos de maneira dinâmica entre prestadora de serviço e consumidor, propondo uma nova abordagem em modelos tradicionais de tarifação entre prestadoras de serviços e clientes.

A implantação das redes inteligentes está relacionada com a solução de vários desafios como o desenvolvimento de formas inteligentes de tarifação da energia elétrica, que resultem na melhor relação custo benefício de geração, transmissão e consumo de energia para as distribuidoras e consumidores.

1.2 MOTIVAÇÃO

O tema de redes inteligentes, juntamente com seus conceitos, propõe uma revolução tecnológica na distribuição de energia elétrica, compreendendo, assim, ações de gerenciamento do sistema pelo lado da demanda (DSM – *Demand Side Management*), viabilizando ações integradas de tarifa para cada panorama específico. Portanto, esse trabalho de conclusão de curso, tem como motivação a análise de alguns modelos tarifários em redes inteligentes.

Ressalta-se também, no panorama nacional, a viabilidade do modelo de tarifa branca, primeiro passo para um modelo com mais de um valor de preço cobrado pelo gasto da energia elétrica, atualmente homologada pela ANEEL, com início de vigência a partir de 2018 (ANEEL, 2016).

1.3 OBJETIVOS

Este tópico tem o propósito de apresentar o objetivo geral do trabalho, bem como os objetivos específicos que serão alcançados ao longo do estudo.

1.3.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste estudo é elaborar uma análise comparativa dos modelos de tarifas de energia elétrica em redes inteligentes, baseado no perfil do consumidor, visando o equilíbrio entre a demanda e a economia de gastos com tarifas elétricas, partindo de princípios de redes inteligentes e comparando com a tarifa convencional e tarifa branca.

1.3.2 Objetivos Específicos

Para assegurar que o objetivo geral deste trabalho seja alcançado, segue abaixo uma relação de objetivos específicos que foram cumpridos ao longo do estudo. Tais objetivos são:

- Realizar a comparação de um modelo de tarifação em rede inteligente com os modelos de tarifa convencional e tarifa branca;
- Simular e analisar o comportamento de diferentes perfis de consumo de energia elétrica verificando o comportamento para o modelo de rede inteligente, modelo convencional e modelo de tarifa branca, ou seja, o valor de tarifação em cada um dos modelos em um período de 24 horas.

1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido em 5 capítulos, incluso o capítulo introdutório.

O capítulo 2, será apresentada a arquitetura da rede inteligente, baseada em revisão bibliográfica pertinente ao assunto, abordando quais os aspectos que melhor a descrevem e todos os elementos pertencentes a sua configuração e seus respectivos benefícios.

Ao capítulo 3 cabe a apresentação dos modelos de tarifas já existentes no Brasil e como são classificados, permeando os modelos de tarifa horo-sazonais, convencional, branca e, por fim, a proposta de três modelo de tarifação em redes inteligentes.

A metodologia adotada para a análise comparativa das tarifas será apresentada no capítulo 4.

No capítulo 5, será realizada a análise comparativa de uma proposta em rede inteligente, utilizando-se o conceito de elasticidade, definido por Oliveira et al. em 2014, como modelo de tarifa convencional e o novo modelo de tarifa branca para o grupo consumidor B, onde serão analisados diferentes perfis de consumo de energia elétrica, a fim de comparar como cada um dos modelos se comportam nessas situações.

Por fim, no capítulo 6, será apresentada as considerações finais do trabalho realizado, comentando de forma geral os resultados obtidos e destacando como os novos modelos podem mudar o perfil do consumidor, a fim de obter um decréscimo no valor de sua conta de energia e sugestões de trabalhos futuros.

2 ARQUITETURA DE SMART GRID

Nos dias de hoje, projetos relacionados com sustentabilidade têm recebido cada vez mais enfoque, como as novas técnicas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. Por isso, se destacam muitas pesquisas relacionadas a redes inteligentes. Porém, existem diferentes vertentes na compreensão do conceito real de redes inteligentes e como elas devem ser implementadas.

Tendo em vista a crescente demanda por um preço acessível e viável para o fornecimento de energia elétrica, através de fontes de geração alternativas, de forma a preservar o meio ambiente. Assim, existe a necessidade de novas tecnologias e ferramentas mais inteligentes para que o sistema possa trabalhar com maior eficiência e com capacidade de aceitar tais fontes de obtenção de energia. Principalmente fontes renováveis, considerando a diminuição na emissão de gases de efeito estufa (ZAHEDI, 2014).

Uma das grandes possibilidades das redes inteligentes, é aquela em que o consumidor possa estar envolvido diretamente na escolha de como consumir a própria energia, considerando que o modelo de tarifa da rede inteligente propicie para este um preço justo pago pela eletricidade consumida, uma vez que o cliente tem a opção de escolher como melhor utilizar a energia elétrica.

Então, adotando um método inteligente de tarifação energética, pode-se direcionar o cliente a ter um consumo mais eficiente e com melhor aproveitamento, uma vez que o ele terá mais acesso as informações sobre o seu consumo.

Redes inteligentes de energia, denomina-se assim, redes que abrangem como um todo o controle de geradores inteligentes, o armazenamento de energia, os consumidores e os recursos que a elas cabem em redes de transmissão e distribuição de energia elétrica, utilizando-se das tecnologias da informação e telecomunicação.

Existem diferentes formas de interpretação de como são realmente constituídas as redes inteligentes. Redes inteligentes, segundo o Departamento de Energia dos Estados Unidos - DOE, são sistemas automatizados, com a capacidade de ter um fluxo bidirecional de energia elétrica e de informações, em que pode ocorrer o monitoramento desde a geração até os consumidores. Tal sistema oferece informações em tempo real, possibilitando o equilíbrio entre oferta e demanda de modo quase instantâneo (DOE, 2009).

Outro aspecto importante a se ressaltar é que as redes inteligentes apresentam uma abordagem que devem ser construídas de acordo com as necessidades do mercado consumidor, levando em conta os aspectos de tecnologia, meio ambiente, socioeconômico e aspectos políticos, como a regulação de normas a serem seguidas (DOE, 2009).

Portanto, redes inteligentes englobam todos os aparatos tecnológicos desde medição eletrônica, telecomunicações, automação, tecnologia da informação, georreferenciamento dentre outras ferramentas computacionais.

Ainda devem ser agregados a geração e o armazenamento distribuídos, incluindo a estrutura de fornecimento de energia elétrica a veículos elétricos (LAMIN, 2013).

Pressupõe-se, então, que com tais tecnologias englobadas, as redes inteligentes operem de forma coordenada e otimizada. Desta forma, acarreta a não implantação isolada de novos medidores e/ou sistemas onde não haja recursos para atuar nas redes e nas ações da distribuidora. Sem essa coordenação, inviabilizaria os ganhos de monitoramento, eficiência operacional e atuações corretivas em tempo efetivo (LAMIM, 2013).

Ressalta-se, ainda que redes inteligentes não se dão isoladamente, e sim atuam de maneira a integrar as novas formas de geração ou consumo de energia com a rede possibilitando os novos modelos de serviços e negócios (OECD/IEA, 2011).

Também se nota que tal definição exclui a produção, o armazenamento e o consumo de energia de modo separado, bem como as extensões ou renovações das redes tradicionais de eletricidade (ERLINGHAGEN, MARKARD, 2012).

Uma arquitetura típica de rede inteligente consiste em três camadas:

- Camada de *hardware*;
- Camada de comunicação; e,
- Camada de *software* ou aplicação.

A camada de *hardware* consiste em *hardwares* de transmissão e distribuição com sensores inteligentes que coletarão as informações sobre o status e a operação do *hardware*. Já, a camada de comunicação permite a aquisição de dados da distribuição e dos equipamentos, e enviar esses dados para os equipamentos finais. Cabendo a última camada a agregação e análise dos dados coletados.

Logo, as três camadas devem ser integradas de ponta a ponta permitindo que o sistema opere de maneira auto recuperativa. Ou seja, com *softwares* programados para corrigir falhas e problemas pré-estabelecidos.

No sistema tradicional não eram necessárias as camadas de comunicação e software, uma vez que tais equipamentos não faziam parte do suprimento do setor elétrico. Em redes de telefone móvel, um modelo similar é utilizado, uma vez que tal indústria tem bastante experiência, em telecomunicações, podendo assim, ser aplicados a tecnologia de redes inteligentes, como mostrado abaixo na Figura 1.

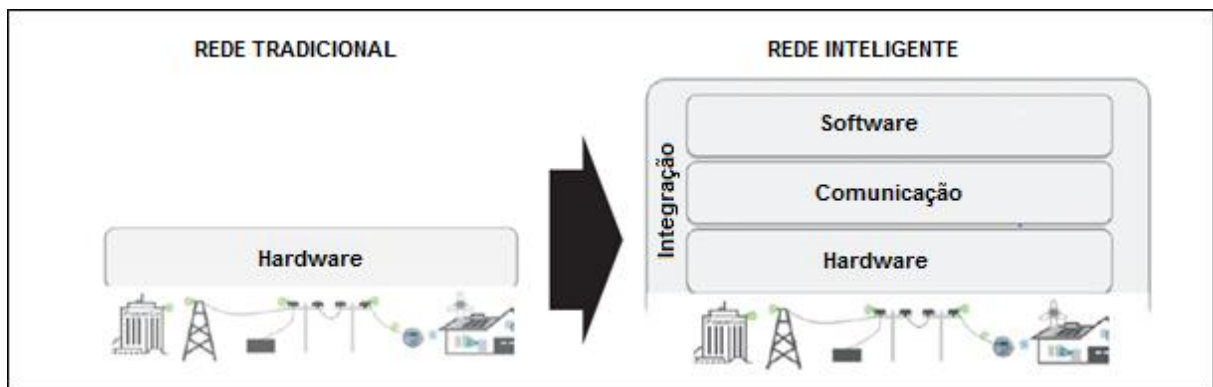


Figura 1 - Modelo tradicional e arquitetura de redes inteligentes.
Fonte: Adaptado ERLINGHAGEN; MARKARD, 2012.

Apoiando-se no modelo de arquitetura apresentado, pode-se distinguir diferentes modelos de projetos em redes inteligentes, como fornecedor de *hardware*, fornecedor de comunicação e *software* e um sistema integrador.

As vantagens de tecnológicas em redes inteligentes, vão desde as empresas do setor elétrico serem capaz de administrar com mais eficiência suas redes, melhorar o negócio do custo de fornecimento sem interrupção de energia, uma leitura em tempo real, até possibilitando ao consumidor a escolha de um modelo dinâmico de tarifação (ZAHEDI, 2014).

Algumas características, segundo Zahedi, acerca de redes inteligentes são:

- Capacidade de encontrar o aumento de demanda sem a necessidade de adicionar novas infraestruturas.
- Habilidade de aceitar energias de diferentes tipos de fontes, tradicionais ou renováveis.

- Capacidade de detectar automaticamente sobrecargas no sistema de energia e mudança de itinerário de fluxo de potência.
- Habilidade de integrar tecnologias de armazenamento de energia durante o pico de carga.
- Capacidade de entregar energia com alta qualidade, levando em consideração os novos equipamentos tecnológicos.
- Comunicação em tempo real.
- Ser capaz de se mover em direção a uma melhoria ambiental significativa, integrando geradores de energia renováveis e ambientalmente mais descentralizadas.

Pode-se utilizar das redes elétricas para a transmissão de sinais de comunicação, como por exemplo, transmissão de voz, por meio de linhas de transmissão de baixa e alta tensão, assim como para utilização de transmissão de operadoras de canais a cabo, operando em faixas de baixa frequência.

Com o avanço das tecnologias nas áreas de transmissão de dados, chegou-se ao desenvolvimento da tecnologia de *Power Line Communication* – PLC (comunicação por linhas de transmissão de energia), integrando assim outras tecnologias de telecomunicação, desenvolvendo a rede inteligente de distribuição de energia elétrica (PASCOALICCHIO, 2011).

Em contrapartida, para superar a limitação cabida aos equipamentos PLC, em 2004, o *Electric Power Research Institute* – EPRI, publicou um artigo integrando os conceitos da estrutura do setor elétrico e de telecomunicação. Propondo uma nova arquitetura, denominada *intelligrid*, cujo objetivo era integrar a geração e a distribuição de energia com os sistemas de informação, permitindo, assim, o seu controle (PALOMINO, 2013).

Em 2005, Dollen propôs que caberia as redes inteligentes de distribuição de energia elétrica serem auto recuperativas e adaptativas, podendo assim, corrigir problemas emergenciais, interagir com consumidor, permitir sua automatização, segurança, de forma confiável e integrada.

A Figura 2, demonstra como seria a interação de consumidor com mercado, caracterizando o modelo proposto por redes inteligentes de energia.

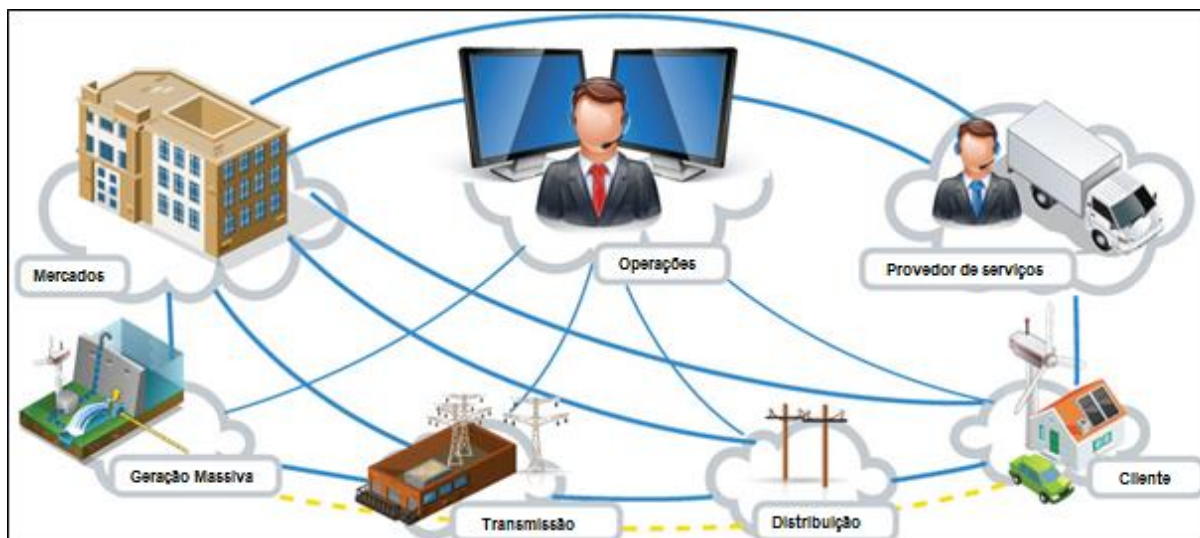


Figura 2 - Modelo conceitual de rede inteligente.
Fonte: Adaptado PALOMINO, 2012.

Como pode ser observado na Figura 2, fica evidente o modo que o mercado tenderá a se comportar com os diversos setores da cadeia produtiva de energia elétrica e com o meio de utilização dos serviços, como empresas e clientes domésticos, integrados de ponta a ponta na rede inteligente. Ou seja, cada um dos setores se comunicam um com os outros formando uma rede dinâmica de colaboração.

3 MODELOS DE TARIFA

A proposta inicial deste trabalho é a análise de modelos a serem implementados para a tarifação da energia elétrica, para as futuras instalações considerando as redes inteligentes.

Devido a tal propósito, faz-se necessário uma revisão no modelo clássico de tarifação energética em vigor, operados pelas concessionárias.

3.1 TARIFA CONVENCIONAL E HORO-SAZONAL

Antes de abordar o sistema convencional de tarifação utilizado no Brasil, destaca-se a classificação dos consumidores por nível de tensão em que são atendidos. Os consumidores atendidos em baixa tensão, normalmente, entre 127 ou 220V (PROCEL, 2011), se classificam como grupo B, onde encontra-se a maior parte de edifícios comerciais, residenciais e públicos. Tal grupo também se subdivide dependendo das suas respectivas atividades.

Cabe, então, ao grupo A os consumidores de alta tensão, acima de 2300V (PROCEL, 2011), dividindo-se em subgrupos como demonstrado no quando abaixo.

Subgrupo	Tensão de Fornecimento
A1	Maior que 230kV
A2	88 kV a 138kV
A3	69kV
A3a	30 kV a 44kV
A4	2,3 kV a 25kV
AS	Subterrâneo

Quadro 1 - Divisão do grupo de consumidores A.
Fonte: Autoria própria, 2016.

Consumidores do grupo B, são cobrados apenas pela energia que consomem, sendo assim, considerado como tarifa monômnia.

Em 2015, instituiu-se o sistema de bandeiras tarifárias, com o objetivo de ponderar o valor cobrado pela a energia elétrica em função das condições de geração da energia, devido a fatores sazonais, aplicando-se à todas as concessionárias conectadas ao Sistema Interligado Nacional – SIN. Tal sistema se subdivide em três cores. Bandeira verde, onde as condições normais de geração de energia são favoráveis, portanto, sem acréscimos de valores. Bandeira amarela, onde as condições de geração não são tão favoráveis, cabendo um acréscimo de R\$ 0,020 para cada quilowatt-hora consumido (ANEEL, 2017). Bandeira vermelha, cujas condições de geração de energias se tornam mais caras, gerando um acréscimo de R\$ 0,030 a R\$ 0,035 para cada quilowatt-hora consumido (ANEEL, 2017).

Os consumidores do grupo A, classificam pela tarifa binômia, onde cobra-se pela demanda e pela energia consumida, cabendo a estes, três tipos de tarifação: convencional, horo-sazonal verde ou horo-sazonal azul.

A tarifa horo-sazonal se caracteriza por tarifas diferenciadas de consumo de energia elétrica e de demanda de potência conforme as horas do dia, hora de ponta e fora de ponta e dos períodos do ano, seco ou úmido, em que a energia é consumida (CAPETTA, 2009; PROCEL, 2011).

3.1.1 Tarifa Convencional

O sistema tarifário convencional baseia-se no consumo de energia elétrica faturado em kWh e a demanda de energia em kW, onde observa-se qual destes fatores é maior:

- Maior potência de demanda, mensurada durante o período de faturamento.
- Se for o caso, a demanda contratada.
- 85% da maior demanda consumida nos faturamentos dos últimos 11 meses (CAPETTA, 2009).

Para o cliente se enquadrar nesse tipo de tarifa, deve-se previamente ter um contrato específico com a concessionária, onde se especifica a demanda desejada (PROCEL, 2011).

Portanto, a o valor a ser pago pela energia elétrica se compõe pela soma do consumo, demanda e o valor a mais consumido (PROCEL, 2011).

Pode-se então calcular o consumo, como sendo a multiplicação do consumo medido pela tarifa de consumo.

A demanda é calculada de modo que se multiplica a tarifa de demanda hora pela demanda contratada ou hora pela demanda média, caso essa ultrapasse de 10% a contratada (PROCEL, 2011).

E, por fim, a parcela que excede o consumo é cobrada apenas quando a demanda medida ultrapasse em mais de 10% a demanda contratada, obtendo-se o seu valor através da multiplicação da demanda excedente pela diferença entre a demanda medida e demanda contratada (PROCEL, 2011).

3.1.2 Tarifa Horo-Sazonal

Primeiramente, deve-se entender o que é horário de ponta, sendo definido pela concessionária e correspondente ao período de 3 horas diárias consecutivas, considerando as características do sistema elétrico, exceto nos finais de semana e feriados nacionais. Horário fora de ponta, corresponde ao período de horas complementares ao horário de ponta. Período úmido compreende-se 5 meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos referidos ao período de dezembro a abril do ano. E período seco, corresponde aos 7 meses consecutivos, levando em conta o fornecimento de maio a novembro (CAPETTA, 2009).

A tarifa horo-sazonal azul, em tese, aplica-se aos consumidores com maior fator de carga, possuindo dois valores de tarifa para demanda (ponta e fora de ponta) e quatro para energia (ponta e fora de ponta nos períodos úmido e seco).

Já a tarifa horo-sazonal verde possui apenas um valor de tarifa de demanda de potência que independe do posto tarifário e dos quatro valores de tarifa de energia. Essa modalidade é aplicável somente para os consumidores do Grupo A até 69 kV.

Vale ainda salientar a importância de que a energia reativa exerce sobre o sistema, bem como o fator de potência. Uma vez que a energia elétrica reativa gera perdas em energia do sistema, ou seja, sem produzir trabalho, mas necessária para formação de campos eletromagnético para funcionamento de equipamentos ligados à

rede. Ponderada pelo fator de potência, onde o mesmo indica se o consumo de energia é capacitivo ou indutivo, dentro de limites estipulados pela ANEEL. Gerando uma cobrança sobre o excedente de consumo de potência reativa, o que acarreta em um maior valor a ser cobrado pela energia consumida (ELEKTRO, 2016).

Em geral, tal cobrança se restringe aos consumidores do grupo A. A cobrança é calculada de maneira similar a energia ativa, apenas mudando-se os nomes das variáveis de consumo de energia ativa para energia reativa.

3.2 TARIFA BRANCA

Um dos primeiros passos para a transição das tarifas tradicionais adotadas pelas operadoras de energia no Brasil para tarifas em redes inteligentes é a nova modalidade de tarifa proposta pela ANEEL, a tarifa branca.

Tal tarifa parte da premissa que os consumidores poderão optar por um consumo de energia com diferentes preços do kWh, conforme o horário e o dia da semana que utilizar a energia elétrica.

A modalidade branca também é monômnia, ou seja, o preço depende unicamente do consumo de energia elétrica ativa, com três tipos de preços de consumo de energia em R\$/kWh, dependendo do posto tarifário em questão.

Onde os postos tarifários são denominados de: posto de ponta, posto intermediário e posto fora de ponta.

Tendo em vista que o posto de ponta, segundo a Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010, estabelece que o horário de ponta é composto por um período de 3 horas diárias consecutivas, em que as distribuidoras o definem levando em consideração a curva de carga do seu sistema elétrico, exceto aos sábados, domingos e feriados nacionais.

O posto intermediário é definido como uma hora antes e uma hora depois do horário de ponta, cujo objetivo é evitar o deslocamento de picos de cargas para esses horários (KAMADA, 2011).

E, por fim, o horário fora de ponta, que compreende aos demais horários do dia e dias de final de semana.

A Figura 3, evidencia a diferença entre a tarifa convencional e a tarifa branca proposta.

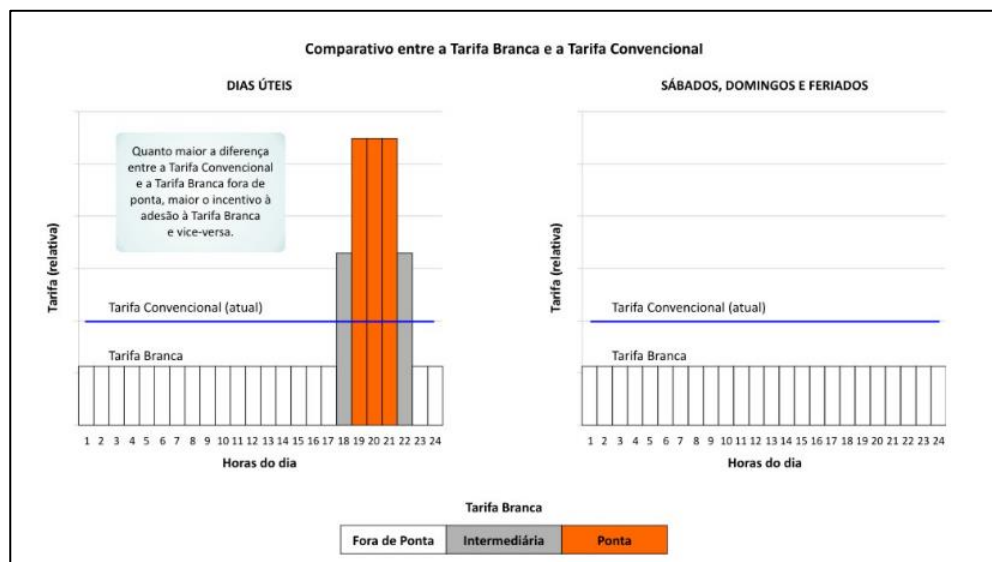


Figura 3 - Comparação entre a tarifa branca e tarifa convencional.
Fonte: Adaptado ANEEL, 2016.

Na Figura 3, demonstra-se como que se comportaria a nova forma de tarifação, onde, diferente da tarifa convencional, que o preço é constante em todos os dias e horários, a tarifa branca conta com três diferentes valores, variando conforme o horário e dia da semana de uso.

Evidenciando que os horários de ponta e intermediária tem o valor maior e o horário fora de ponta com valor menor, se comparado com a tarifa convencional.

A ANEEL estipulou que a partir de 1º de janeiro de 2018, todas as distribuidoras de energia elétrica poderão, quando solicitadas, atender os consumidores com carga mensal média superior à 500 kWh, para migração para tarifa branca. Até que em 2020, tal tarifa esteja disponível para todos os consumidores de baixa tensão, independente do consumo. Tendo em vista que tal tarifa, atende ao grupo consumidor tipo B (127, 220, 380 ou 440 Volts) de baixa tensão (ANEEL, 2016).

3.3 PROPOSTAS EM REDES INTELIGENTES

Como descrito no tópico anterior, a tarifa branca é um início as tendências de modelos de tarifas para redes inteligentes, dando assim um avanço nos modelos tradicionais.

Com isso, destina-se a este tópico uma abordagem sobre os modelos que estão sendo propostos ou desenvolvidos para aplicação em redes inteligentes. Portanto, caberá uma descrição de alguns modelos para se ter um melhor embasamento, objetivando a análise de algum desses modelos a fim de comparar o seu desempenho com modelos clássicos atualmente utilizados.

Inicialmente, se propôs uma análise em artigos relativos as novas abordagens de como se poderia fazer uma medição do consumo de energia elétrica levando em consideração a integração das redes inteligentes no sistema elétrico. Estas possibilitam um maior ajuste, no que se diz respeito ao consumo de energia, e uma adequação, a cargo do cliente, dos melhores períodos do dia, para se utilizar a energia elétrica de modo mais eficiente.

Outra questão que se ressalva é a adequação dos medidores de energia dos consumidores, uma vez que os mesmos também teriam que se adequar aos novos padrões de medição. Logo haverá a necessidade da substituição dos antigos por novos medidores eletrônicos mais conhecidos, do inglês, como *smart meters*. Esses medidores eletrônicos tem a capacidade de disponibilizar informações mais detalhadas do consumo de energia em diferentes intervalos de tempo e fazem a comunicação remota de monitoramento e tarifação. Fazendo assim, o controle e armazenamento de dados, análise do padrão de consumo, qualidade de energia, confiabilidade do sistema e segurança, sendo um dos principais componentes na integração de redes inteligentes (KAMADA 2011).

Portanto, fez-se primeiramente uma busca de artigos com propostas de modelos de tarifação. Tais modelos de propostas de faturas em redes inteligentes serão apresentados no decorrer desse tópico.

Zahedi em 2014, no artigo intitulado, *Proposing a Smart Electricity Pricing Model for Future Smart Grid*, propõe um modelo inteligente de tarifação, baseado em análise de mercado de energia, no consumo direto entre cliente e o preço da eletricidade e um segundo aspecto baseado sobre o mercado de maneira geral.

Um dos principais aspectos levantados é que em redes inteligentes o consumidor tem a possibilidade de escolha, pois estas provêm um preço acessível de eletricidade e a possibilidade de diferentes formas de como e quando utilizá-la, com a escolha de quanto querem pagar pela eletricidade, segundo o modelo proposto (ZAHEDI, 2014).

O estudo apresentado propõe dois modelos diferentes de tarifação e é baseado em dados da cidade de Victoria, na Austrália.

O primeiro propõe uma conexão direta entre o consumo do cliente e o preço comercial da energia elétrica. O segundo modelo propõe uma conexão direta com o preço total, e em ambos modelos o preço da eletricidade está relacionado com a demanda atual de energia.

Na Figura 4, tem-se o preço comercial com a demanda. Percebe-se que a curva que representa o preço tem um padrão semelhante que a curva da demanda.

Portanto, propôs se fazer uma regressão de ambas as funções a fim de se encontrar suas equações características. Em que o preço é função da demanda, obtendo a seguinte equação.

$$\text{Preço (\$)} = 2,69 + 8,13 * \text{demanda} \quad (1)$$

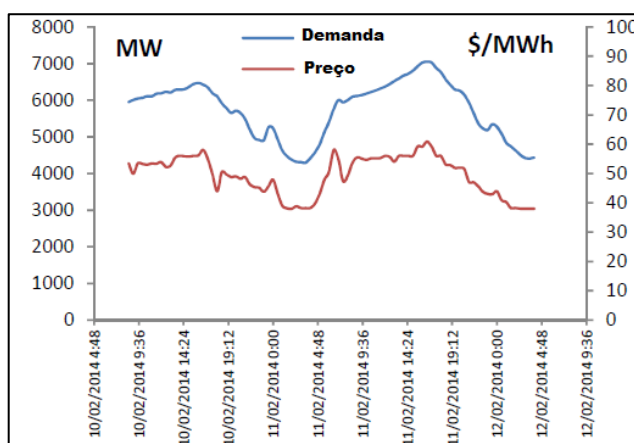


Figura 4 - Demanda e preço de 10 a 12 de fev. 2014.
Fonte: Adaptado ZAHEDI, 2014.

Sugerindo assim, para consumidores residenciais o seguinte modelo:

$$\text{Preço (\$)} = 2,5 * (2,69 + 8,13 * \text{demanda}) \quad (2)$$

Um das desvantagens desse modelo sugerido é que durante o período de verão o preço da energia elétrica será muito caro para os consumidores, sem ter um limite máximo estipulado.

Para simplificar a simulação foi adotado uma curva de demanda diária com forma senoidal, uma vez que a curva característica do período analisado tem um formato próximo a isso. Portanto, a simulação simplificada da carga é muito próxima da curva real de demanda.

De maneira geral, adotou-se o valor fixo de 0,25 centavos de dólar por kWh consumido, durante um dia. Sendo assim, na Figura 5 observar-se como cada uma das equações se comportam.

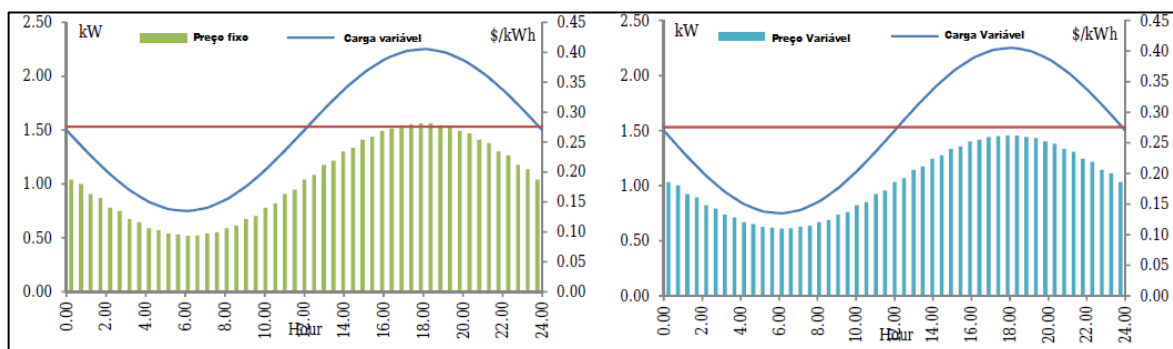


Figura 5 - Curvas de preço fixo e variável em função da demanda.
Fonte: Adaptado ZAHEDI, 2014.

Outra proposta considerada engloba a possibilidade de os consumidores poderem definir como utilizar a energia a partir dos medidores inteligentes instalados em suas residências. Uma vez que com esses medidores com um *display* instalado dentro de suas residências, tem uma informação em tempo real de como está o seu consumo de energia.

Com tal possibilidade acabaria encorajando o consumidor a reduzir seu consumo de energia com informações de fácil acesso, como por exemplo, expressa em dólar ou quilowatt-hora consumidos.

Assim, se propõe uma divisão em 11 diferentes períodos de preços, mostrado nesses *displays* pelas cores verde, laranja e vermelha. Onde cada uma sinalizaria o consumo em relação à média de consumo. Sendo que verde representa o consumo abaixo da média e laranja e vermelho acima da média.

A ideia é que o consumo seja maior nos períodos de cor verde, policiando, assim, os clientes a utilizarem a energia de uma maneira mais eficiente e que com um custo menor. Demonstrando níveis instantâneos de consumo para que os consumidores possam saber o nível de gasto de seus equipamentos elétricos.

O modelo proposto considera o mesmo valor de unidade de 0,25 centavos de dólar por kWh consumido, porém, com 11 níveis de consumo, sendo representados por uma porcentagem do valor de unidade divididos a partir de 50 por cento do valor até 160 por cento do valor unitário, obtendo uma curva de preço e demanda como demonstrado na Figura 6.

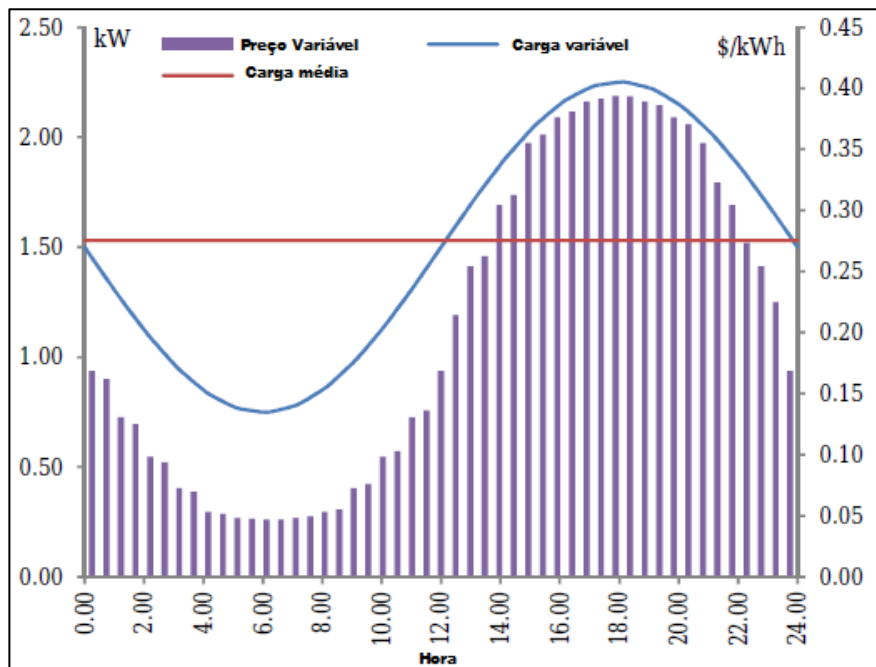


Figura 6 - Curvas de preço variável usando informações do display dentro de casa. Fonte: Adaptado ZAHEDI, 2014.

Wu e Shahidehpour em 2014, no artigo *A Hybrid model for integrated day-ahead electricity price and load forecasting in smart grid*, propõem um modelo híbrido que integraria o consumo provável de eletricidade com um dia de antecedência e a previsão de carga na rede.

Um das ideias por eles ressaltadas é o fato de tal modelo proporcionar ao consumidor a capacidade de reagir instantaneamente às mudanças de preço da energia elétrica, escolhendo assim a melhor hora para utilizá-la, uma vez que poderá

migrar de um horário mais caro para outro mais barato, o que, conseqüentemente, impactará nos preços da eletricidade.

Propondo assim, um modelo que provenha um preço inicial e previsão de carga separados, para que em um segundo estágio possam considerar a interação de preço de carga com as previsões como dados de entrada.

Para cada estágio terá uma série híbrida e uma rede neural *wavelet* adaptável (AWNN), utilizadas para previsão de cada estágio, juntamente com uma média móvel integrada multivariável auto regressiva (ARIMA), onde fará a coleta do relacionamento linear do preço e carga, retornando a série de registro.

Inicialmente foi desenvolvido um algoritmo onde seria prevista a carga e preço do dia em questão separadamente, através de dados do dia anterior e utilizando o modelo híbrido de séries e AWNN, em conjunto com o ARIMA. A parte não linear e não estacionária foram tratadas através de um algoritmo condicional auto regressivo (GARCH). Os resultados do ARIMA e GARCH são combinados e utilizados como entradas do AWNN, com sua saída como preço final previsto.

Um modelo híbrido similar é utilizado para a previsão de ambos os estágios de preço/carga. Cabendo o segundo estágio de previsão considerar a interação entre sinais de preço e carga incluindo sinais de preço/carga como fatores explicativos, uma vez que no primeiro estágio usa-se informações do dia anterior.

Em cada estágio, no lugar da série original do sinal, o período é constantemente combinado em séries de retorno, usados para atingir maior robustez estatísticas dos dados.

Ressalta-se também que fatores como condições climáticas, serviços auxiliares disponíveis, mercado de energia elétrica e disponibilidade das gerações e linhas de transmissão não foram incluídos no modelo de previsão por eles proposto, pois tais fatores são menos importantes para previsão de preço e carga de consumo em geral, podendo, também, ocasionar um *over-fitting* ou ainda prejudicar o desempenho do modelo de previsão.

O diagrama de blocos do algoritmo proposto, considerando-se o primeiro caso estudado, onde preço e carga são considerados separadamente no primeiro estágio, será demonstrado na Figura 7.

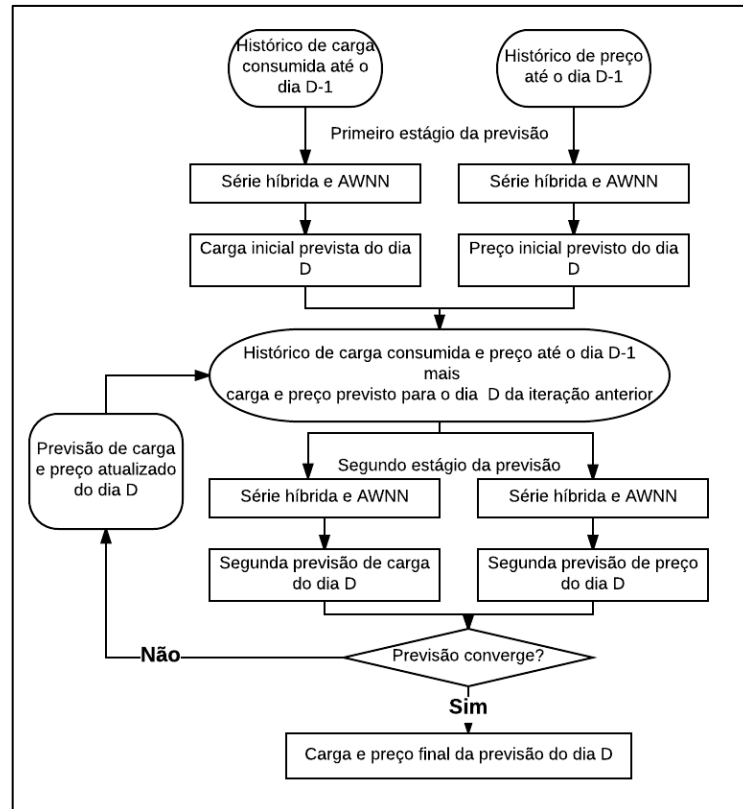


Figura 7 - Diagrama de bloco para o algoritmo de previsão proposto.
Fonte: Adaptado Wu e Shahidehpour, 2014.

Para a segunda proposta, onde o modelo híbrido de previsão de carga e preço considera o segundo estágio englobando o histórico de carga e preço do dia anterior, mais a previsão de carga do dia da análise, resultado de iterações passadas. Com isso, na Figura 8, será apresentado o diagrama de blocos do modelo apresentado.

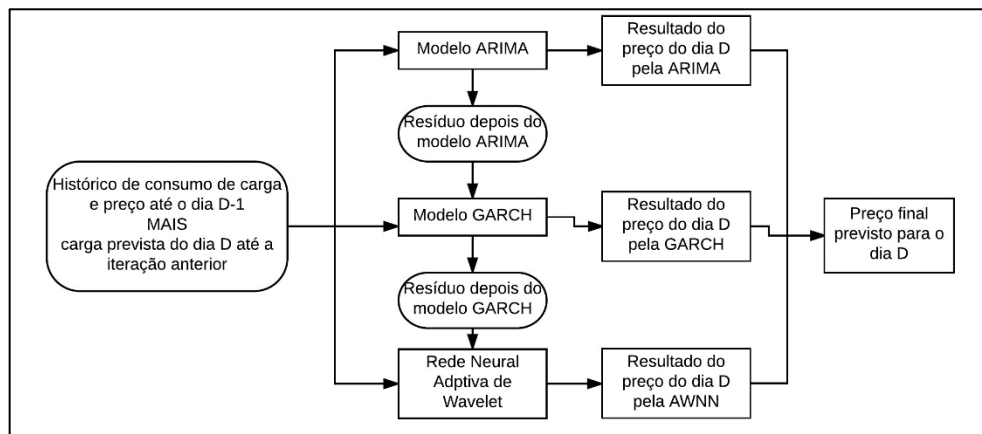


Figura 8 - Diagrama de blocos para o modelo híbrido de previsão adotado no segundo estágio do módulo de previsão de preço.
Fonte: Adaptado Wu e Shahidehpour, 2014.

Outra proposta apresentada por Oliveira et al. em 2014 no artigo, Modelo para o cálculo de tarifas dinâmicas em redes inteligentes, propõem um modelo baseado na resposta de demanda (RD), onde objetiva-se a redução dos picos de demanda do sistema. Para tal propósito consideram-se as condições de funcionamento da rede elétrica e o comportamento do consumidor dada as variações de tarifa.

Pode-se definir resposta de demanda (RD), por como os consumidores irão se comportar em relação ao uso da eletricidade com uma mudança na variação da tarifa de energia elétrica ao longo do tempo. O objetivo principal é reduzir os picos de demanda, fazendo com que haja um maior equilíbrio entre geração de energia e carga de consumo (OLIVEIRA, et al. 2014).

Através da Figura 9, observa-se que a característica da demanda é composta por três níveis (leve, médio e pesado), onde fica evidente que na maior parte do tempo o sistema é subutilizado.

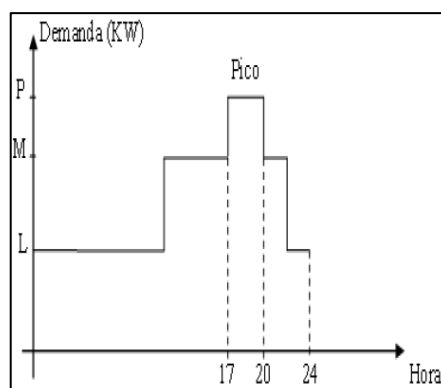


Figura 9 - Curva típica de carga.
Fonte: Oliveira et al. 2014.

Portanto, com um modelo de tarifa dinâmico o perfil do consumidor se adaptaria ao perfil de carga do sistema, uma vez que em períodos de maior carga a tarifa cobrada será maior que nos demais, moldando o cliente a consumir no melhor horário, ou seja, onde a tarifa é menor.

Para calcular a melhor tarifa que poderia ser cobrada, a fim de moldar o consumidor a tais níveis, foi proposto um programa de otimização, definindo o melhor preço da tarifa para cada horário. Definindo a elasticidade, α , como a sensibilidade da demanda em relação ao preço da energia, como na Equação 3:

$$\text{elasticidade} = \alpha = \frac{\Delta_{\text{DEMANDA}}}{\Delta_{\text{TARIFA}}} \quad (3)$$

Na Figura 10, mostra-se a característica linear da taxa de elasticidade, onde o valor da mesma é negativo. Sendo o ponto A o ponto atual de resposta do consumidor ao preço fixo de energia. Conforme o ponto segue a curva surge um novo par de coordenadas que descrevem um novo consumo de energia a dada tarifa (OLIVEIRA, et al. 2014).

Quanto mais inclinada for a curva de demanda, ou seja, elasticidade próxima de 180°, mais aproximado é o comportamento do cliente. Tendo em vista que tal comportamento é não linear, para a metodologia adotada, o modelo linear sugere uma boa aproximação (OLIVEIRA, et al. 2014).

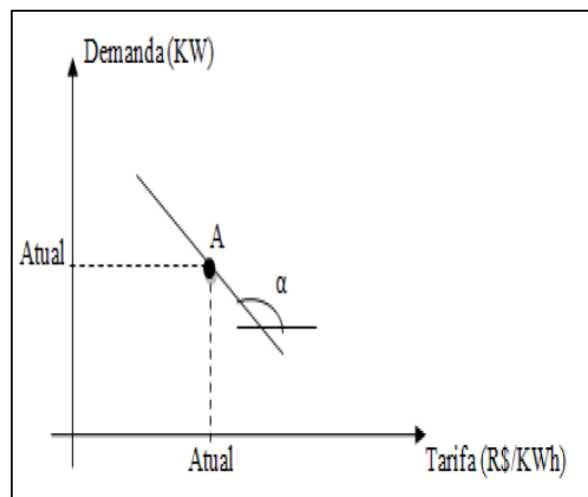


Figura 10 - Mudanças da demanda de acordo com a tarifa.
Fonte: Oliveira et al. 2014.

O comportamento da demanda dado as mudanças nas tarifas para diferentes coeficientes de elasticidade é dado pela seguinte equação:

$$Td_i^t = \tan(\alpha_i) * D_i^t + b_i \quad (4)$$

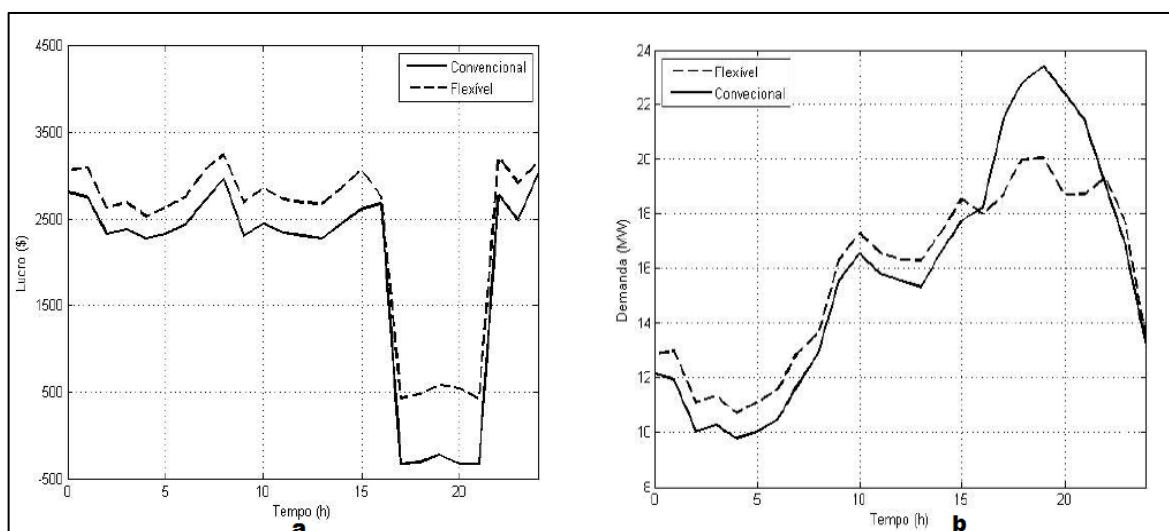
Onde, Td_i^t representa a tarifa especificada pela distribuidora para o consumidor i no instante t (0 à 24h), variável a ser determinada no problema; D_i^t representa a demanda esperada do consumidor i no instante t em resposta ao valor

da tarifa Td_i^t , variável do problema; $\tan(\alpha_i)$ representa a inclinação da reta já conhecida, e; b_i representa um valor conhecido que é determinado usando o ponto de operação atual A (OLIVEIRA, et al. 2014).

Assim, a inclinação varia de $90^\circ < \alpha_i < 120^\circ$ ou de $120^\circ < \alpha_i < 150^\circ$, sendo que, a Equação 4 apresenta variáveis que devem ser calculadas pela distribuidora de energia elétrica: a tarifa (T_d) e o valor esperado de demanda do consumidor (D) (OLIVEIRA, et al. 2014).

Chega-se, assim, ao problema de otimização com o objetivo de maximizar o lucro da distribuidora de energia elétrica e atender às restrições operacionais da rede. E tais problemas, considerou-se a tarifa que precisa ser determinada, a fim de informar ao cliente o preço da energia, geração distribuída ativa e reativa, a tarifa paga no barramento da subestação, o balanço de potências ativas e reativas na rede, a demanda para o valor de tarifa a ser determinada, os limites operacionais da rede, como tensão, capacidade de transformação, etc., e, por fim, os limites de tarifa em relação aos valores fixos adotados no atual modelo (OLIVEIRA, et al. 2014).

Para validação do modelo proposto Oliveira et al. utilizou o pacote de otimização não linear *Lingo Package*.



Fonte: Adaptado Oliveira et al. 2014.

Para validação dos dados utilizou-se um sistema de teste composto por 119 barras, com tensão da subestação fixada em 1,0 pu. Simulando dados de acordo com

3 alimentadores, onde para cada alimentador definiu-se um valor de elasticidade: alimentador 1 α_i de 160°, alimentador 2 α_i de 170° e alimentador 3 α_i de 179°.

Observou-se houve um aumento no consumo de energia em noventa e duas barras do sistema, mesmo com a diminuição do consumo no horário de pico em todo barramento do sistema.

Conclui-se que, através do modelo proposto de tarifa, houve a redução do consumo de energia em horários de pico, formando assim um novo perfil do consumidor e melhoria no perfil de tensão do sistema. Em geral, ao passo que o consumidor se adapte aos novos horários, em que as tarifas de consumo são menores, o mesmo terá redução no custo final pago pela energia elétrica e o seu consumo se manterá no mesmo padrão.

4 METODOLOGIA DE ANÁLISE

Após a apresentação dos modelos de tarifa usualmente utilizados, o modelo de tarifa branca e as novas propostas de modelos de tarifação elétrica para redes inteligentes, cabe a este capítulo apresentar a metodologia adotada para a análise de cada um dos modelos de tarifação, para que, assim, sejam analisados e comparadas no próximo capítulo.

Foi escolhido o grupo de consumidores B, ou seja, consumidores atendidos com tensão menor de 2300 volts (baixa tensão), sendo subdividido em 4 grupos que englobam, residências, comércio, zona rural, dentre outras.

Adotou-se também, para a análise perfis de consumidores no estado de São Paulo. Analisando o consumo parcial de energia elétrica, ou seja, o consumo será analisado em um período de 24 horas em dia útil de semana, desconsiderando finais de semanas e feriados.

Portanto, serão apresentadas cada uma das metodologias abordadas para cada modelo de tarifa: tarifa convencional, tarifa branca e a trafica em redes inteligentes, respectivamente.

4.1 TARIFA CONVENCIONAL

Uma vez considera para a análise a tarifa convencional, considerou-se seu uso parcial, ou seja, a utilização do método para a análise em um período de 24 horas. Para o cálculo parcial da tarifa utilizou-se a seguinte equação:

$$V_{\text{conv}} = T_e * D_m \quad (5)$$

Onde, V_{conv} é o valor parcial da fatura, em R\$, ou seja, o valor no dia analisado, em real, T_e é a tarifa de consumo de energia em R\$/kWh e D_m é a demanda de energia média no período analisado em kWh (PROCEL, 2011).

Levou-se em conta para o cálculo do valor parcial da fatura apenas o uso da TUSD (Tarifa de uso do Sistema de Distribuição) e TE (Tarifa de Energia), portanto:

$$T_e = TUSD + TE \quad (6)$$

Os valores de TUSD e TE foram obtidos segundo a Resolução nº1.858, de 27 de fevereiro de 2015, resolução homologatória tarifária das concessionárias de distribuição de energia elétrica (ANEEL, 2015).

Portanto, para distribuidoras de energia elétrica do estado de São Paulo obtém-se valor aproximado médio de T_e de R\$0,45 por kWh consumido.

4.2 TARIFA BRANCA

Analogamente a tarifa convencional, para a tarifa branca, também, adotou-se o uso parcial do seu faturamento, ou seja, o faturamento em apenas durante um dia de análise, não considerando o consumo durante todo o mês.

Na modalidade de tarifa branca adotou-se a divisão do dia em hora de ponta, compreendendo as três horas consecutivas das 19 horas até as 22 horas, intermediária, sendo as horas adjacentes ao horário de ponta, das 18 às 19 horas e das 22 às 23 horas e, por fim, a hora fora de ponta, considerando o restante das horas do dia, obtendo-se a seguinte equação para o cálculo de tarifa:

$$V_{branca} = T_{FP} * D_{FP} + T_{IN} * D_{IN} + T_P * D_P \quad (7)$$

Sendo V_{branca} o valor parcial da tarifa branca, em R\$, T_{FP} , T_{IN} e T_P são as tarifas de consumo de energia nas horas fora de ponta, intermediária e de ponta, respectivamente, em R\$/kWh, e D_{FP} , D_{IN} e D_P , em kWh, são as demandas de energia obtidas nas horas fora de ponta, intermediária e de ponta, respectivamente.

Os valores de T_{FP} , T_{IN} e T_P são definidos pela Resolução nº1.858, de 27 de fevereiro de 2015, com os valores de T_{FP} de 0,36605 R\$/kWh, T_{IN} de 0,47018 R\$/kWh e T_P de 0,72122 R\$/kWh (ANEEL, 2015). Portanto, a curva para a tarifa branca fica definida como na figura a seguir.

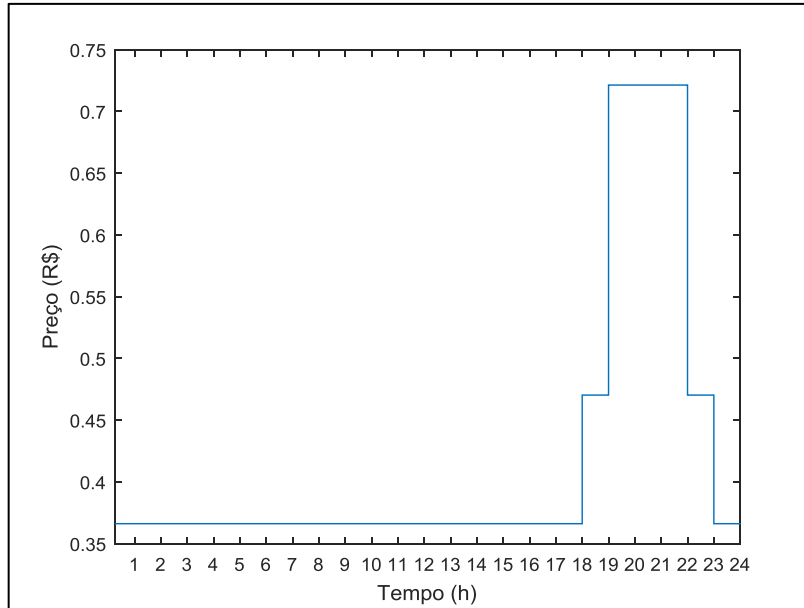


Figura 12 - Tarifa Branca.
Fonte: Autoria Própria, 2017.

Ressaltando, assim, na Figura 17, os horários de ponta definidos entre as 19 horas até as 22 horas, o intermediário das 18 horas as 19 horas e das 22 horas as 23 horas e o restante dos horários são fora de ponta. A comparação entre as tarifas convencional e branca é demonstrado na Figura 13.

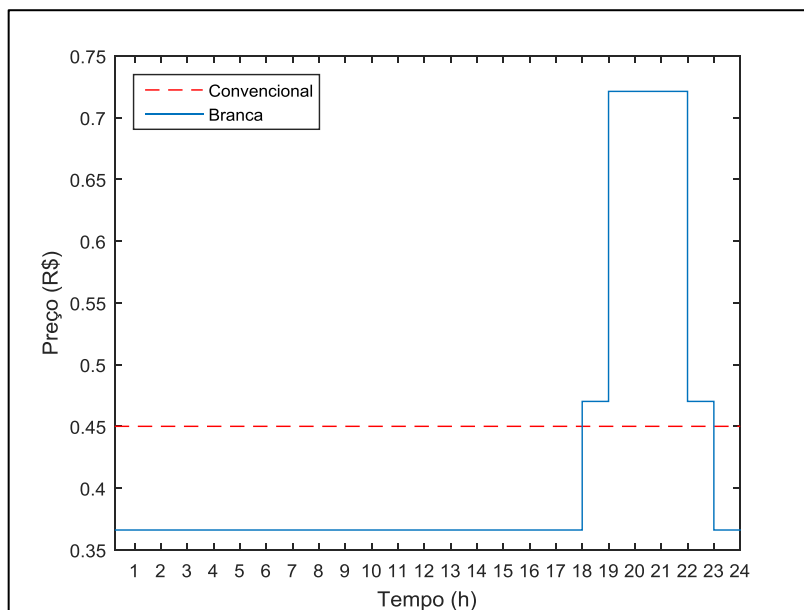


Figura 13 - Comparação entre Tarifa Convencional e Tarifa Branca.
Fonte: Autoria Própria, 2017.

Onde, a tarifa convencional é ilustrada por uma reta tracejada constante em vermelho e a tarifa branca pela curva em azul, ambas com os valores definidos segundo a Resolução nº1.858, de 27 de fevereiro de 2015.

4.3 TARIFA EM REDES INTELIGENTES

Para a análise de tarifação em redes inteligentes adotou-se o método apresentado por Oliveira et al. em 2014. Considerando as equações previamente definidas no capítulo anterior.

Então para as análises do próximo capítulo será considerada o valor de elasticidade definida pela Equação 3, temos que:

$$\alpha = 179^\circ$$

Portanto, o valor da elasticidade foi definido em 179° como sugerido por Oliveira et al., 2014, uma vez que tal valor demonstra mais a realidade de como é o comportamento do consumo do consumidor.

Com isso, adotou-se a Equação 4 para o cálculo da tarifa em redes inteligentes, considerando a análise durante um período de 24 horas, temos que:

$$Td_i^t = \tan(179^\circ) * D_i^t + b_i$$

Com os termos da equação já definidos no capítulo anterior.

5 RESULTADOS

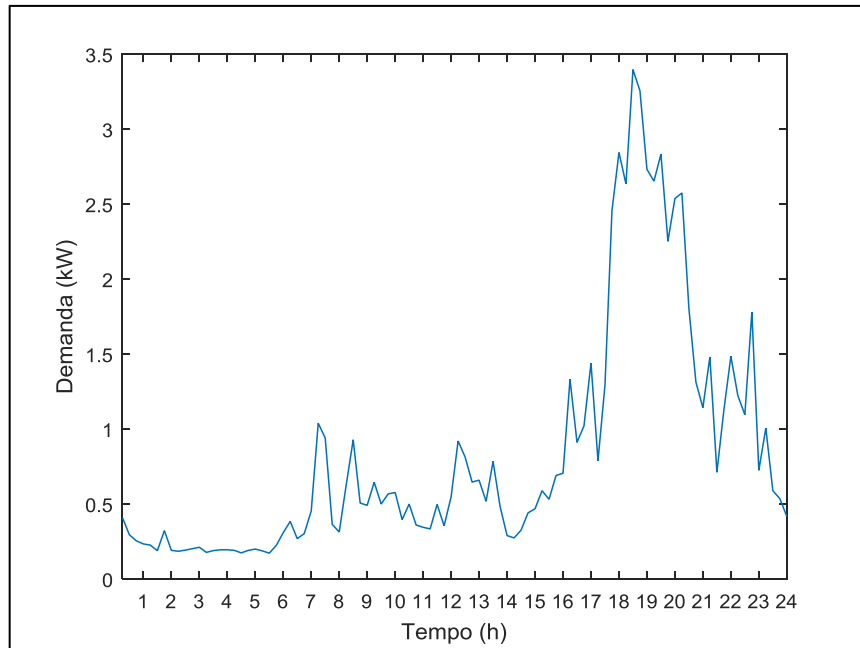
Neste capítulo será abordada as simulações a fim de analisar como o modelo escolhido para redes inteligentes se comporta em comparação com os modelos de tarifa convencional e de tarifa branca.

De acordo com os modelos de cálculos das tarifas apresentados, agora serão detalhadas quatro diferentes situações de demanda de energia elétrica, analisadas em um período de 24 horas, com perfis de consumos fornecidas por uma distribuidora de energia elétrica do estado de São Paulo, tendo a finalidade de comparar como será o comportamento dos modelos durante o dia de consumo e para cada situação qual será a tarifa mais vantajosa.

Ressalta-se que em cada situação a seguir será estudado um caso de consumo e gerado a curva de tarifação em redes inteligentes, comparando com as outras tarifas, previamente definidas. Depois será mostrado uma tabela comparativa, demonstrando a porcentagem de aumento ou diminuição do valor a ser pago em comparação com a tarifa convencional, atualmente utilizada.

5.1 PRIMEIRA SITUAÇÃO

Para começo de análise, considerou-se o cenário em que a tarifa branca será aplicada a partir de janeiro de 2018. Portanto, adotou-se o seguinte padrão residencial de consumo de energia elétrica, seguindo a curva característica fornecida pela distribuidora de energia, apresentada na Figura 14, onde pode-se observar o comportamento residencial, em um período de 24 horas para um consumidor com demanda mensal de 550 kWh com maior demanda de energia elétrica nas adjacências do horário de ponta.



**Figura 14 - Curva de demanda de 550 kWh/mês.
Fonte: Autoria Própria, 2017.**

Aplicando a Equação 5, para o cálculo da tarifa convencional, temos os seguintes passos:

$$V_{\text{conv}} = 0,45 * \sum D_m$$

Onde a $\sum D_m$ foi obtida através do algoritmo implementado para análise, considerando o consumo da curva da Figura 14.

Obtém-se, assim, o seguinte valor diário para a tarifa convencional:

$$V_{\text{conv}} = \text{R\$ } 35,86$$

Para obter-se o valor da tarifa branca, utilizou-se a Equação 7:

$$V_{\text{branca}} = 0,36605 * \sum D_{FP} + 0,47018 * \sum D_{IN} + 0,72122 * \sum D_P$$

Assim como, na tarifa convencional, os valores de $\sum D_{FP}$, $\sum D_{IN}$ e $\sum D_P$ foram obtidos através do algoritmo implementado para a análise, levando o consumo de energia nos períodos de ponta, intermediário e fora de ponta, da curva da Figura 14.

Obtém-se, assim, o seguinte valor diário para a tarifa branca:

$$V_{\text{branca}} = \text{R\$ } 38,90$$

Para o cálculo da tarifa em redes inteligentes, primeiramente foi preciso obter a curva de tarifação, onde aplicando a Equação 4, se obtém a curva característica de tarifa em redes inteligentes, através de um algoritmo desenvolvido levando em considerações valores definidos por Oliveira et al. 2014, onde o padrão depende da curva característica da demanda, sendo que para cada consumidor será gerada uma curva própria, com o valor de elasticidade definido anteriormente, temos a seguinte curva de tarifa apresentada na Figura 15.

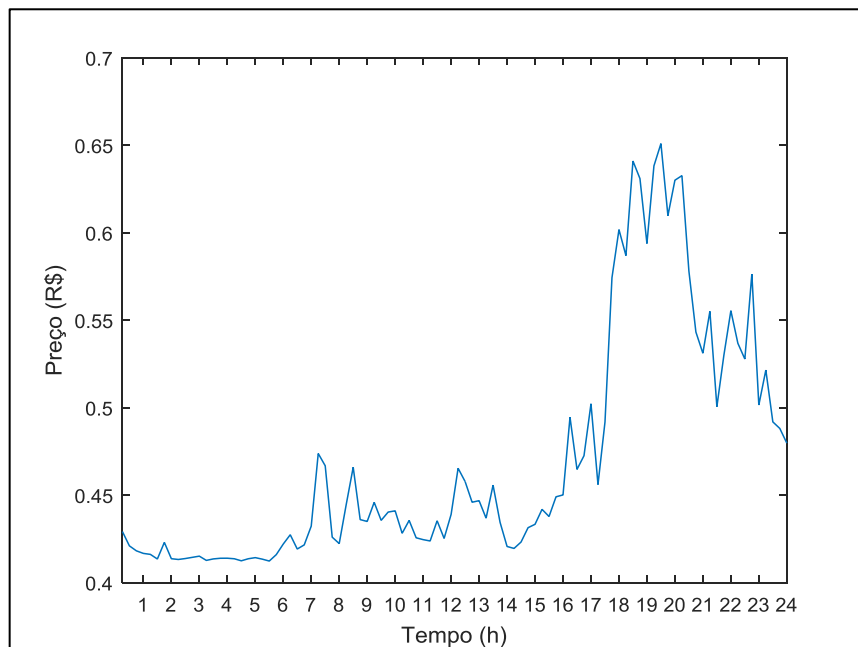


Figura 15 - Curva de Tarifa em Redes Inteligentes.
Fonte: Autoria Própria, 2017.

Uma vez obtida a curva de tarifa, têm-se o comportamento da tarifa durante o dia. Portanto, para obter o valor da tarifa em redes inteligentes no final do dia, tem-se que multiplicar o consumo em cada instante pelo valor definido na curva da Figura 15. Aplicando a somatória de valores multiplicado pelo consumo se obtém, para o dia em análise, o seguinte valor de tarifação:

$$V_{\text{smartgrid}} = \$42,55$$

Portanto, pode-se comparar os valores através da tabela abaixo:

Tabela 1 - Comparação de tarifas.

Tarifa	Valor (\$)	Relação a convencional (%)
Convencional	35,86	-
Branca	38,90	+ 8,46
Redes Inteligentes	42,55	+18,64

Observa-se que para tal perfil de consumo as novas opções não seriam viáveis para o consumidor, uma vez que o valor pago seria mais de 8 % maior na modalidade branca e 18% na tarifa para redes inteligentes.

Através da Figura 16, pode-se comparar as três tarifas analisadas. Podendo ver o comportamento de cada uma delas ao longo do dia.

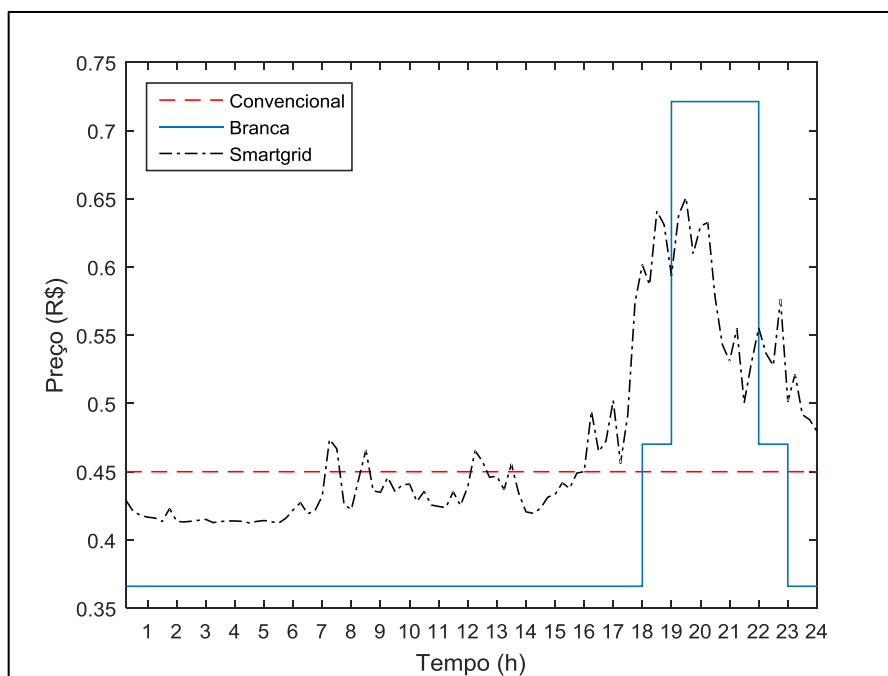


Figura 16 - Comparação de tarifas.

Fonte: Autoria Própria, 2017.

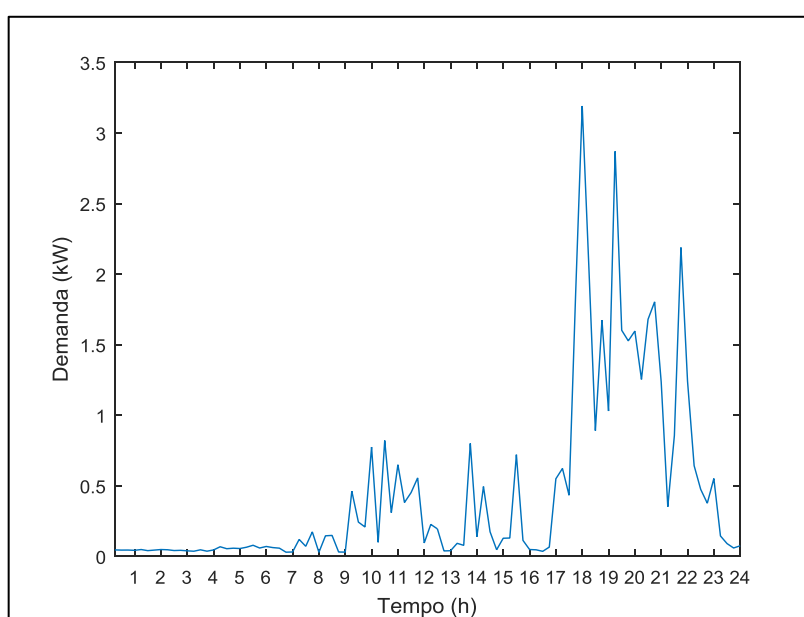
Uma vez analisada a curva característica de consumo, o fato de o maior consumo estar concentrado nos horários em que a energia é mais cara, ou seja, onde o sistema tem um valor maior nos seus valores multiplicativos, torna a fatura mais cara em relação a tarifa convencional.

Também pode-se ressaltar que as novas propostas em redes inteligentes têm também como objetivo mudar o perfil de tensão do sistema elétrico, mudando assim os picos de energia ou sobrecarga do sistema elétrico em horas de ponta. Visando um sistema de energia mais eficiente, com uma melhor distribuição de carga ao longo do dia.

Portanto, para esta situação as novas tarifas propostas, tanto a branca quanto a em redes inteligentes, serão mais caras para o consumidor, fazendo com que o mesmo não opte para uma mudança no modelo de tarifação.

5.2 SEGUNDA SITUAÇÃO

Para a segunda situação adotou-se o seguinte padrão residencial de consumo de energia elétrica, como na Figura 17, abaixo:



**Figura 17 - Demanda de 100 kWh/mês.
Fonte: Autoria Própria, 2017.**

Com a curva apresentada na Figura 17, pode-se observar o comportamento residencial, em um período de 24 horas para um consumidor com demanda mensal de 100 kWh, onde os maiores consumos de energia estão nas adjacências do horário de ponta.

Aplicando-se a Equação 4, se obtém a curva característica de tarifa em redes inteligentes, onde o padrão depende da curva característica da demanda, sendo que para cada consumidor será gerada uma curva própria, com o valor de elasticidade definido anteriormente, obtém-se a seguinte curva de tarifa:

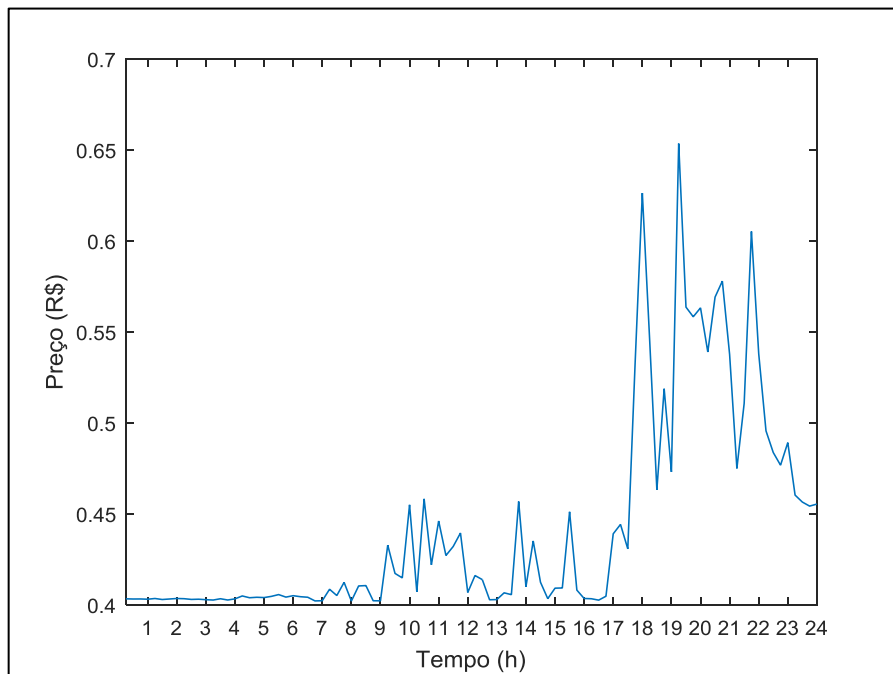


Figura 18 - Curva de Tarifa em Redes Inteligentes.
Fonte: Autoria Própria, 2017.

Aplicando a somatória de valores multiplicado pela demanda diária se obtém o valor da tarifa para redes inteligentes. Aplicando as Equações 5 e 7 se obtém o valor das tarifas convencional e branca, respectivamente. Demonstrando, assim, seus valores na Tabela 2.

Tabela 2 - Comparação de tarifas.

Tarifa	Valor (R\$)	Relação a convencional (%)
Convencional	19,57	-
Branca	23,29	+ 19,00
Redes Inteligentes	22,87	+16,89

Observa-se que para tal perfil de consumo as novas opções o valor a conta seria maior, uma vez que o valor pago será de 19 % maior na modalidade branca e 16% na modalidade redes inteligentes.

Através da Figura 19 pode-se ter uma comparação entre as três tarifas analisadas. Podendo ver o comportamento de cada uma delas ao longo do dia.

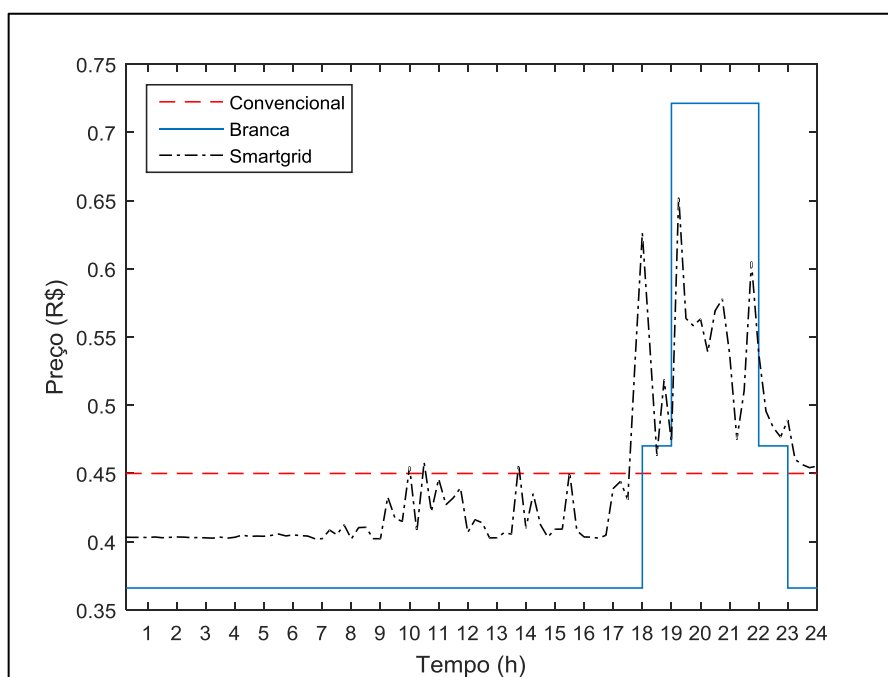


Figura 19 - Comparação de Tarifas.

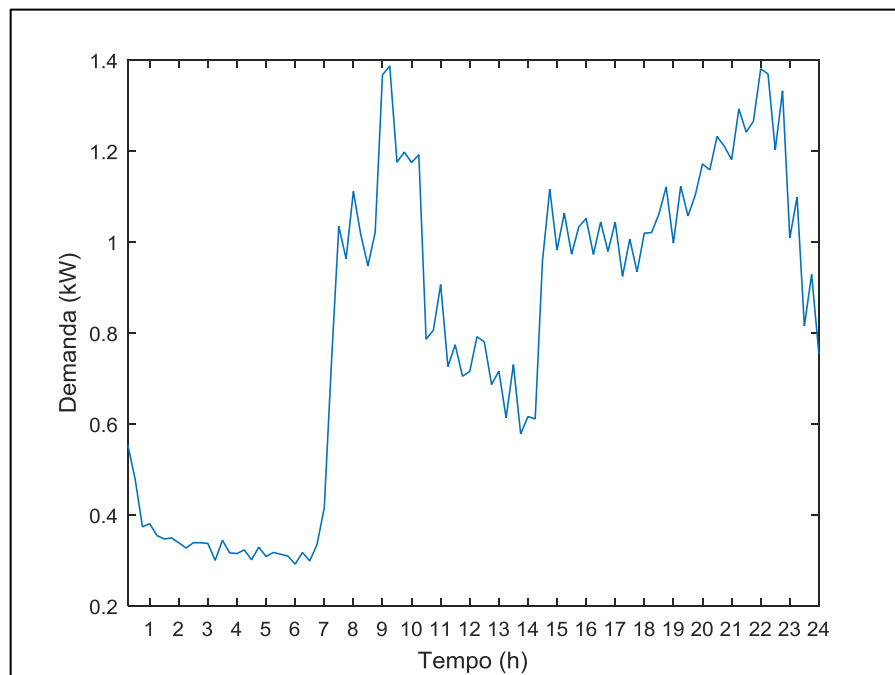
Fonte: Autoria Própria, 2017.

Uma vez analisados os padrões de consumo e comparado com o perfil de cada uma das tarifas analisadas, tem-se que a concentração do maior uso de energia está no período que nos modelos de tarifas branca e em redes inteligentes são mais

caros. Ocasionalmente o maior valor na tarifação. Evidenciando que para tal consumidor a tarifa convencional é a mais indicada.

5.3 TERCEIRA SITUAÇÃO

Para a terceira situação adotou-se o perfil de consumo de energia elétrica, como o representado na Figura 20.



**Figura 20 - Demanda de 1500 kWh/mês.
Fonte: Autoria Própria, 2017.**

Com a curva apresentada na Figura 20, pode-se observar o comportamento comercial, como, por exemplo, em um restaurante de hotel ou algo do mesmo gênero, em um período de 24 horas para um consumidor com demanda mensal de 1500 kWh. Onde os maiores consumos de energia estão concentrados ao longo do dia.

Analogamente as situações anteriores, aplicou-se a Equação 4 obtendo a curva característica de tarifa em redes inteligentes, com o valor de elasticidade definido anteriormente, obtém-se a seguinte curva de tarifa:

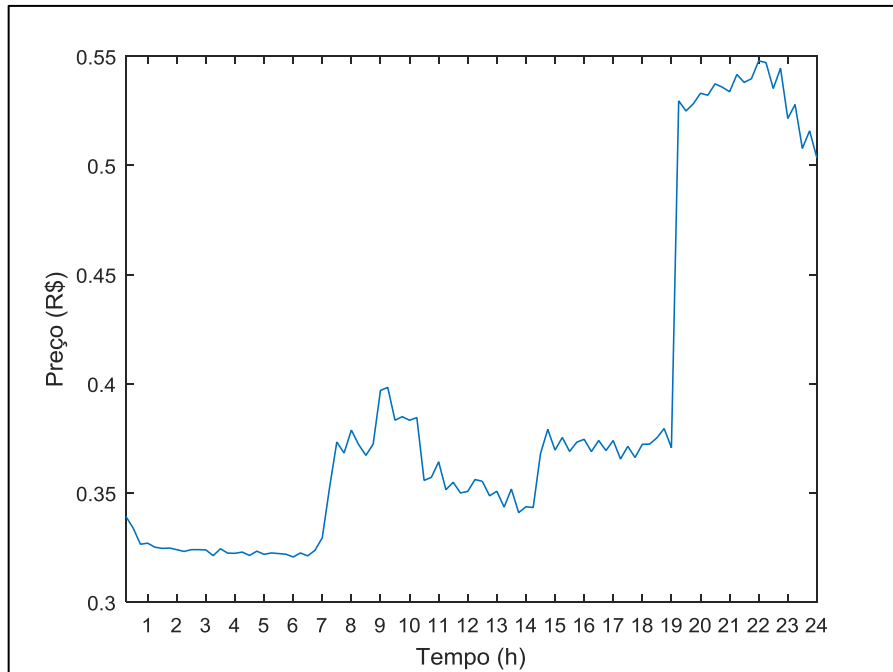


Figura 21 - Curva de Tarifa em Redes Inteligentes.
Fonte: Autoria Própria, 2017.

Aplicando a somatória de valores multiplicado pela demanda diária se obtém o valor da tarifa para redes inteligentes e aplicando as Equações 5 e 7 se obtém o valor das tarifas convencional e branca, respectivamente. Demonstrando, assim, seus valores na Tabela 3.

Tabela 3 - Comparação de tarifas.

Tarifa	Valor (R\$)	Relação a convencional (%)
Convencional	34,76	-
Branca	34,52	- 0,70
Redes Inteligentes	32,04	-7,84

Para tal configuração de consumo pode-se observar que houve uma mudança no comportamento das outras tarifas em relação a tarifa convencional, uma vez que o valor pago seria de 0,7 % menor na modalidade branca e um pouco mais de 7 % menor em redes inteligentes.

Através da Figura 22, pode-se comparar as três tarifas analisadas. Podendo ver o comportamento de cada uma delas ao longo do dia.

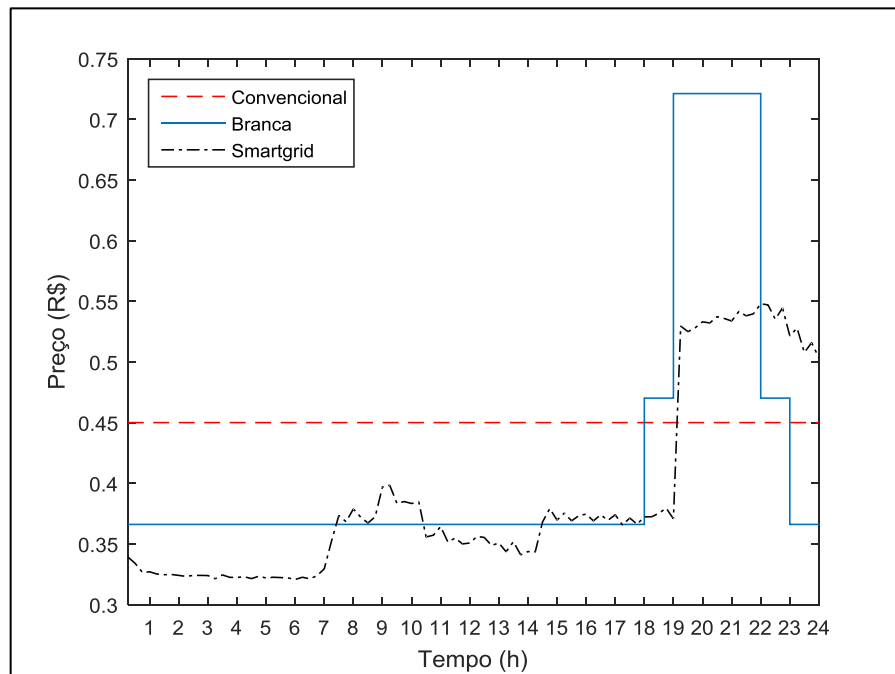


Figura 22 - Comparação de Tarifas.
Fonte: Autoria Própria, 2017.

Pode-se perceber que para este caso analisado o comportamento das tarifas branca e em redes inteligentes obtiveram uma diminuição na tarifação no período analisado, uma vez que o perfil de demanda do consumidor foi mais distribuído ao longo do dia, acarretando na diminuição do valor. Portanto, para tal perfil evidencia-se o melhor comportamento para a tarifa em redes inteligentes e, também, para a tarifa branca, possibilitando para o consumidor uma nova opção de tarifação, visando a economia por elas proporcionadas.

5.4 QUARTA SITUAÇÃO

Nesta quarta situação adotou-se o seguinte perfil de consumo de energia elétrica, como na figura a seguir:

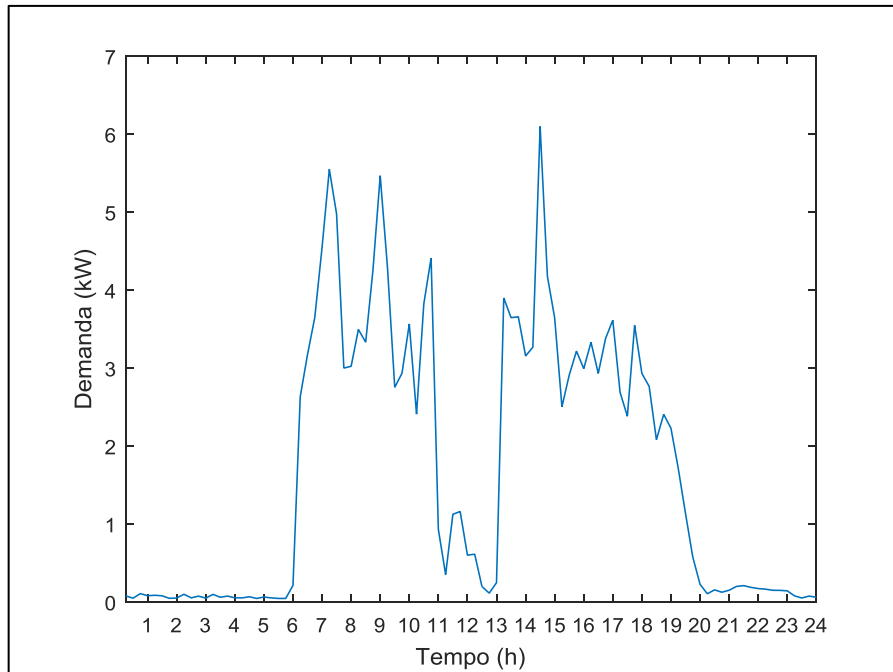


Figura 23 - Demanda de 2000 kWh/mês.
Fonte: Autoria Própria, 2017.

Com a curva apresentada na Figura 23, pode-se observar o comportamento comercial como o da análise anterior, em um período de 24 horas para um consumidor com demanda mensal de 2000 kWh. Porém, desta vez, o maior consumo está concentrado nas horas fora dos horários de ponta, de uma certa forma mais distribuídos durante o dia.

Analogamente as situações anteriores, se aplicou a Equação 4 para obter a curva característica da tarifa em redes inteligentes, com o valor de elasticidade definido anteriormente, demonstrando o seguinte comportamento do modelo:

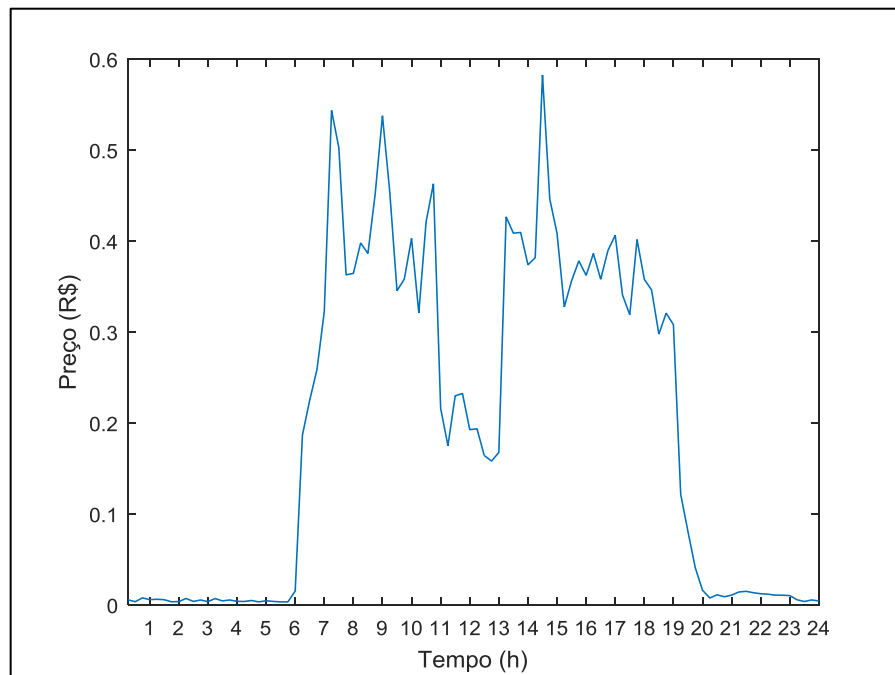


Figura 24 - Curva de Tarifa em Redes Inteligentes.
Fonte: Autoria Própria, 2017.

Aplicando a somatória de valores multiplicado pela demanda diária se obtém o valor da tarifa para redes inteligentes. Aplicando as Equações 5 e 7 se obtém o valor das tarifas convencional e branca, respectivamente. Demonstrando, assim, seus valores na Tabela 4.

Tabela 4 - Comparação de tarifas.

Tarifa	Valor (\$)	Relação a convencional (%)
Convencional	72,33	-
Branca	62,02	- 14,25
Redes Inteligentes	60,61	-16,20

Para tal distribuição de consumo ao longo do dia, tem-se em ambas as tarifas uma redução no valor em consideração com a tarifa convencional. Tem-se uma redução de mais de 14% utilizando a tarifa branca e uma redução de mais de 16% na tarifa em redes inteligentes.

Na Figura 25, pode-se comparar o comportamento da tarifa em redes inteligentes com a tarifa convencional e branca.

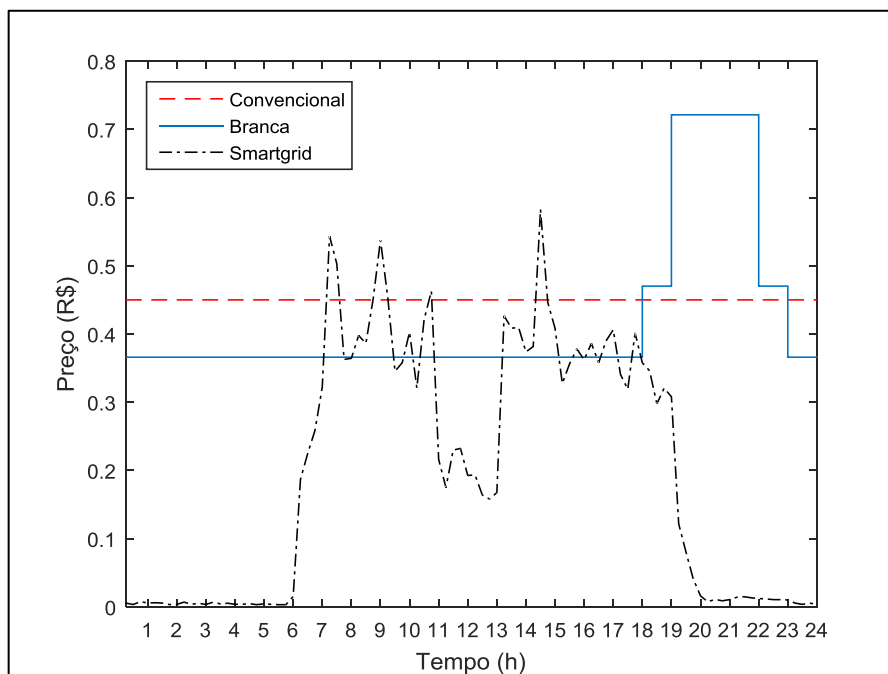


Figura 25 - Comparação de Tarifas.
Fonte: Autoria Própria, 2017.

Nota-se um comportamento melhor para o modelo proposto em redes inteligentes quando comparado com os outros dois. Isso ocorre devido ao perfil do consumidor, uma vez que concentra o uso de energia elétrica ao longo do dia, em períodos onde a tarifa é mais barata em relação aos outros. A tarifa branca também demonstra um melhor comportamento em relação a tarifa convencional, podendo, assim, o consumidor ter mais opções de escolha no modo que será tarifada sua conta de energia elétrica.

Vale ressaltar que para a mudança de tarifa teria que ser realizado um estudo mais detalhado, com um bando de dados maior do consumo de energia nos últimos meses, para que, assim, possa se definir se tal migração no final das contas será compensatória para o consumidor.

Uma vez analisado nesse período o consumidor teria benefícios, pois o valor tarifado seria menor que o praticado atualmente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho buscou-se uma análise de novos meios de tarifação energética para o futuro das configurações da rede de distribuição de energia elétrica, com a agregação de novas fontes de energia e as novas tecnologias que serão possíveis com a implantação de redes inteligentes e medidores inteligentes.

As redes inteligentes agregam tecnologia as redes elétricas e, com isso poderão ser melhor gerenciadas e manuseadas de maneira mais inteligente nos custos de uso da rede elétrica, com tecnologias que permitiram que o consumidor possa escolher a melhor maneira para utilizar a energia elétrica com os medidores em tempo real e os novos modelos de tarifação propostos. Assim, as redes inteligentes, podem reduzir custos de geração e transmissão de energia elétrica e agregar formas limpas de obtenção de energia para os consumidores.

Uma vez aberto a essas novas abordagens pode-se criar novas maneiras de utilização mais eficiente de energia elétrica.

Este trabalho ressaltou os estudos relacionados a melhoria na forma que a tarifação elétrica é realizada, visando não só a melhoria na tarifação para o consumidor, mas para o sistema como um todo, pois mudando a visão de consumo de energia dos clientes as companhias elétricas também terão ganhos próprios.

Nas análises dos modelos apresentados foi possível observar que o modelo em rede inteligente se portou melhor nas últimas situações, onde a maior demanda de energia estava distribuída nos períodos em que o sistema não está carregado, obtendo assim, uma economia de mais de 7 % em um caso e mais de 16 % no outro caso, nos gastos com a energia elétrica.

Assim, como ressaltados nos artigos abordados, as simulações realizadas mostraram situações específicas e, em um sistema real, teria que ser analisado o comportamento do consumidor um bom período, a fim de implementar um melhor programa de resposta de demanda.

Uma das vantagens que o consumidor terá com redes inteligentes é a possibilidade de acompanhar, de antemão, o valor que será cobrado de energia, e como dito anteriormente, poder escolher o quanto usar a hora que melhor deve usar levando em conta o quanto irá pagar.

Outra ressalva que acrescentou ao trabalho foi a comparação com a tarifa branca, uma vez que esta permite a introdução de uma nova opção de modo de tarifação, com tendência a estes novos métodos para redes inteligentes.

Também houve uma melhor tarifa quando o consumidor teve seu consumo fora dos horários adjacentes ao de ponta, como já esperado. Mas uma vez cabendo ao cliente a escolha de como poderá gastar a energia elétrica.

No geral, o trabalho pode apresentar estas futuras abordagens e incentivar mais análises pra novos métodos, onde, pode-se deixar para análises futuras a implementação de um algoritmo adaptativo para tarifação e análises de comportamento do perfil de tensão na rede elétrica.

REFERÊNCIAS

ANEEL. **Bandeiras Tarifárias**. 2017. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/bandeiras-tarifarias>>. Acesso em: 22 maio 2017.

ANEEL. **Estabelece, de forma atualizada e consolidada, as condições gerais de fornecimento de energia elétrica**. 2000. Disponível em: <http://sistemas.rei.unicamp.br/pdf/condicoes-gerais-de-fornecimento-de-energia-eletrica-resolucao-aneel-n-456-de-29-11-00-Attach_s437081.pdf>. Acesso em: 18 out. 2016.

ANEEL. **Estrutura tarifária para serviço de distribuição de energia elétrica – Sinal econômico para baixa tensão**. Nota Técnica nº 362/2010-SER-SRD/ANEEL. Brasília, 2010. Disponível em: <<http://migre.me/vhdGW>>. Acesso em: 18 out 2016.

ANEEL. **Tarifa branca**. 2016. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/tarifa-branca>>. Acesso em: 22 out. 2016.

ANEEL. **Resolução Homologatória nº 1.858**. 2015. Disponível em: <www.celpe.com.br/download/1aa29f91-66e9-4c53-90a2-2489f1f531c5>. Acesso em: 10 maio 2017.

CAPETTA, D.. **Sistema de medição para faturamento e o mercado de energia elétrica**: uma visão crítica do referencial regulatório. 2009. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.

DOE – U.S. Department of Energy. **The smart grid**: an introduction. Prepared for the Department of Energy by Litos Strategic Communication under contact No. DE-AC26-04NT41817, Subtask 560.01.04. Washington, Estados Unidos.

DOLLEN, V. D.. **IntelliGrid**: Enabling the power delivery system of the future. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON POWER-LINE COMMUNICATIONS, 9, 2005. ISPLC Proceedings. 2005.

ELEKTRO. **Energia ativa e reativa.** 2016. Disponível em: <<http://www.elektro.com.br/seu-negocio/energia-ativa-e-reativa>>. Acesso em: 20 out. 2016.

ERLINGHAGEN, S.; MARKARD, J.. **Smart grids and the transformation of the electricity sector: ICT firms as potential catalysts for sectorial change.** 2012. In: ELSEVIER, ENERGY POLICY, 2012. V. 51, p. 895-906.

KAMADA, M. M.; BOEIRA, M. V.. **Análise de modalidades tarifárias e suas aplicações para smart grids.** 2011. Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2011.

LAMIN, H.. **Análise de impacto regulatório da implantação de redes inteligentes no Brasil.** 2013. Tese de Doutorado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.TD-076/13, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 300p.

LEITE, D. R. V.. **Medidores Eletrônicos: Análise de viabilidade econômica no contexto das redes inteligentes.** 2013. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, Publicação PPGENE.DM-518. Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade de Brasília, DF, 81p.

OECD. **The OECD definition on the ICT sector.** Measuring the information economy, 2002. Disponível em: < <http://www.oecd.org/dataoecd/34/37/2771153.pdf> >. Acesso em: 15 out. 2015.

OECD/IEA. **Smart grid technology roadmap energy.** 2006. In: EUROPEAN MANAGEMENT JOURNAL, 2006. V. 24, p. 128-141.

OLIVEIRA, E. J. DE; MENTA, R. V.; ANDRADE, F. J. A.; OLIVEIRA, L. W. DE. Modelo para o cálculo de tarifas dinâmicas em redes inteligentes. **Anais do XX congresso brasileiro de automática**, Belo Horizonte, V.1, p. 3759-3765, set 2014.

PALOMINO, R. M.. **Distribución con redes eléctricas inteligentes**. 2012. CONSTRUCTOR ELÉCTRICO: NEGOCIOS Y DESARROLLO DE LA INDUSTRIA. Disponível em: <<http://constructorelectrico.com/distribucion-con-redes-electricas-inteligentes/>>. Acesso em: 18 out. 2016.

PASCALICCHIO, A. C.. **Perspectiva econômica e modelo de negócio da tecnologia de telecomunicação nas redes de distribuição de energia elétrica no Brasil**. 2010. Tese de Doutorado em Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PROCEL. **Manual de tarifação de energia elétrica**. 2011. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/1985241/Manual%20de%20Tarif%20En%20EI%20-%20Procel_EPP%20-%20Agosto-2011.pdf>. Acesso em: 20 out. 2016.

WU, L.; SHAHIDEHPOUR, M.. **A hybrid model for integrated day-ahead electricity price and load forecasting in smart grid**. 2014. In: IET GENERATION, TRANSMISSION AND DISTRIBUTION: ISSN 1751-8687, 2014. P. 1-14.

ZAHEDI, A.. **Proposing a smart electricity pricing model for future smart grid**. 2014. In: AUSTRALASIAN UNIVERSITIES POWER ENGINEERING CONFERENCE, AUPEC 2014. V.1, p. 1 -4