

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA**

**ACHILA APARECIDA MAZINI**

**OS DESAFIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DE MERCADOS DE  
ENERGIA ELÉTRICA EM SMART GRIDS:  
ESTADO DA ARTE**

Juiz de Fora, MG - Brasil

Julho de 2017

**ACHILA APARECIDA MAZINI**

**OS DESAFIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DE MERCADOS DE  
ENERGIA ELÉTRICA EM SMART GRIDS:  
ESTADO DA ARTE**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Juiz De Fora, como parte das exigências para a obtenção do título de engenheiro eletricitista.

Orientador: Bruno Henriques Dias

Juiz de Fora, MG - Brasil

Julho de 2017

Mazini, Achila Aparecida.

Os desafios da implementação de mercados de energia elétrica em Smart Grids: Estado da Arte/Achila Aparecida Mazini - 2017.

61f. : il.

Orientador: Bruno Henriques Dias

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -  
Universidade

Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia, 2017.

1. Mercado de Energia. 2. *Smart Grid*. 3. *Transactive Energy*.

**ACHILA APARECIDA MAZINI**

**OS DESAFIOS DA IMPLEMENTAÇÃO DE MERCADOS DE  
ENERGIA ELÉTRICA EM SMART GRIDS:  
ESTADO DA ARTE**

Relatório final, apresentado a Universidade Federal de Juiz De Fora, como parte das exigências para a obtenção do título de engenheiro eletricitista.

Orientador: Bruno Henriques Dias

Aprovada em 03 de julho de 2017

---

Prof. Bruno Henriques Dias, D.Sc. (Orientador)  
Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

---

Prof. Leonardo Willer de Oliveira, D.Sc.  
Universidade Federal de Juiz de Fora – UFJF

---

Prof. Thiago Trezza Borges, D.Sc.  
Universidade Federal Fluminense – UFF / Petrobras

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, Cida e Paulo, e meu irmão, Achilles, pelo exemplo de determinação, apoio incondicional e por estarem sempre ao meu lado me incentivando a lutar pelos meus objetivos.

Ao orientador Bruno pela oportunidade, paciência e, sobretudo, por todo conhecimento e auxílio prestado durante a elaboração dos trabalhos e projetos dos últimos anos.

Aos amigos pela paciência e compreensão durante minhas ausências. Em especial ao Paulo, Raissa, Thaisy e Larissa. Obrigada por sempre comemorarem cada aprovação como se fosse a de vocês.

A todos os colegas e companheiros de curso e professores que de alguma forma ajudaram para que esse objetivo fosse alcançado.

*“Only those who risk going too far can  
possibly find out how far they can  
go.”(Thomas Stearns Eliot)*

## RESUMO

Resumo da Monografia apresentada à UFJF como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

### **Os desafios da implementação de mercados de energia elétrica em Smart Grids: Estado da Arte**

Achila Aparecida Mazini

Orientador: Bruno Henriques Dias.

O setor energético vem sofrendo uma transformação intensa, ligada diretamente a questão ambiental e a fomentação de novas práticas e modelos para adequar os gastos de energia ao aumento severo das regulamentações e das leis ambientais aplicadas por muitos países na última década.

Em decorrência do crescente investimento em fontes renováveis, espera-se um significativo aumento no número de recursos distribuídos de geração de energia, que tendem a ocasionar uma mudança no paradigma da rede elétrica trazendo diversos desafios no que diz respeito ao ponto de vista técnico, de mercado e regulatório, principalmente das redes de distribuição.

Como solução, surge o conceito de *transactive energy*, onde as decisões de mercado são realizadas com base em um valor, de forma análoga a transações econômicas. Desta forma, modelo baseado no conceito de *transactive energy*, visa formar um sistema de mecanismos econômicos e de controle que permita o equilíbrio dinâmico entre a oferta e demanda em toda a infra-estrutura elétrica, usando o preço da energia como principal parâmetro operacional, a fim de apoiar o desenvolvimento de redes de distribuição ativas em direção a um cenário maduro da rede inteligente. Dessa forma, novos conceitos e modelos para prover o gerenciamento do sistema de distribuição precisam ser implementados.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar o estado da arte acerca da inserção de recursos de energia distribuídos presentes no sistema de energia elétrica e o introduzir os conceitos relacionados a *Smart Grids* e *transactive energy* no mercado de energia atual e evidenciar as características e alterações ocasionadas pelos mesmos.

# ABSTRACT

Abstract of Thesis presented to UFJF as a partial fulfillment of the requirements for the title of Electrical Engineer.

## **The Challenges of Electric Power Market implementation in Smart Grids: State of the Art**

Achila Aparecida Mazini

Supervisor: Bruno Henriques Dias.

The energy sector has undergone an intense transformation, mainly due the environmental issues and the promotion of new practices and models to adjust the energy demand to fulfill the severe increase of regulations and environmental laws applied by many countries in the last decade.

As a result of the increasing investment in renewable sources, a significant increase in the number of distributed energy generation resources is expected, which tends to lead to a change in the electricity grid paradigm, posing a number of technical, market and regulatory challenges, in particular in distribution systems.

In an effort to find a solution, the concept of transactive energy arises, where market decisions are made based on a value, analogous to economic transactions. Therefore, a model based on the concept of Transactive Energy, aims to form a system of economic and control mechanisms that aims to allow the dynamic balance between supply and demand in the entire electrical infrastructure, using the price of energy as the main operational parameter, in order to support the development of active distribution networks towards a smart grid scenario, new concepts and models to provide distribution system management need to be implemented.

This work aims to present the state of the art about the penetration of the distributed energy resources present in the electric power system and to introduce the concepts and to highlight the characteristics and changes related to smart grids and transactive energy in the current energy market.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Modelo de aprovisionamento competitivo .....	17
Figura 2: Modelo atacadista competitivo .....	18
Figura 3: Modelo Varejista competitivo .....	21
Figura 4: Leilão unilateral .....	23
Figura 5: Leilão Bilateral.....	24
Figura 6: Rede Elétrica Tradicional .....	30
Figura 7: Rede Elétrica Inteligente .....	30
Figura 8: Estrutura de Telecomunicações de Redes inteligentes.....	35
Figura 9: Principais agentes e decisões.....	42
Figura 10: Modelo de Transactive agent.....	42
Figura 11: Modelo de Transactive Control para integração de DERs .....	47
Figura 12: Visão geral do sistema de distribuição .....	49
Figura 13: Diagrama da operação do sistema de distribuição utilizando TE .....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DER	Recursos de Energia Distribuídos
DISO	Operador Independente do Sistema de Distribuição
DSO	Operador do Sistema de Distribuição
EES	Armazenamento de Energia
EV	Veículos Elétricos
GD	Geração Distribuída
GLD	Gerenciamento Pelo Lado da Demanda
HAN	Home Area Network
LAN	Local Area Network
PV	Painéis Fotovoltaicos
RES	Recursos de Energia Renovável
SG	Smart Grid
TA	Transactive Agent
TC	Transactive Control
TE	Transactive Energy
WAN	Wide Area Network

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS</b>	<b>X</b>
<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>13</b>
1.1 <b>CONTEXTUALIZAÇÃO</b>	<b>13</b>
1.2 <b>OBJETIVO</b>	<b>15</b>
1.3 <b>ESTRUTURA DO TRABALHO</b>	<b>15</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>16</b>
<b>2 INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
<b>2.1 MODELOS DE MERCADO DE ENERGIA</b>	<b>16</b>
2.1.1 <b>MODELO DE APROVISIONAMENTO COMPETITIVO</b>	<b>17</b>
2.1.2 <b>MODELO ATACADISTA COMPETITIVO</b>	<b>18</b>
2.1.2.1 <b>MODELO <i>POOL</i> DE ENERGIA</b>	<b>19</b>
2.1.2.2 <b>MODELO DE CONTRATAÇÃO BILATERAL</b>	<b>20</b>
2.1.3 <b>MERCADO VAREJISTA COMPETITIVO</b>	<b>21</b>
<b>2.2 LEILÕES DE ENERGIA</b>	<b>21</b>
<b>2.3 MODELOS DE LEILÕES DE ENERGIA</b>	<b>22</b>
2.3.1 <b>NATUREZA</b>	<b>23</b>
2.3.1.1 <b>LEILÃO UNILATERAL</b>	<b>23</b>
2.3.1.2 <b>LEILÃO BILATERAL</b>	<b>24</b>
2.3.2 <b>FORMA</b>	<b>24</b>
2.3.2.1 <b>ABERTO</b>	<b>25</b>
2.3.2.2 <b>FECHADO</b>	<b>26</b>
2.3.3 <b>PREÇO DE FECHAMENTO</b>	<b>26</b>
2.3.3.1 <b>LEILÃO DE PREÇO UNIFORME</b>	<b>26</b>

2.3.3.2	LEILÃO DE PREÇO DISCRIMINATÓRIO	27
<b>CAPÍTULO 3</b>		<b>28</b>
<b>3</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>28</b>
<b>3.1</b>	<b>CONTEXTUALIZAÇÃO</b>	<b>28</b>
<b>3.2</b>	<b>SMART GRIDS</b>	<b>29</b>
3.2.1	GERENCIAMENTO DA DEMANDA E MEDIÇÃO INTELIGENTE	31
3.2.2	GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ARMAZENAMENTO	32
3.2.3	INFRAESTRUTURA DE TELECOMUNICAÇÕES	34
3.2.4	TECNOLOGIA E SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO	35
<b>CAPÍTULO 4</b>		<b>37</b>
<b>4</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>37</b>
<b>4.1</b>	<b>CONTEXTUALIZAÇÃO</b>	<b>37</b>
<b>4.2</b>	<b>TRANSACTIVE ENERGY</b>	<b>38</b>
<b>4.3</b>	<b>ESTRUTURA DE MERCADO E TRANSACTIVE ENERGY</b>	<b>40</b>
4.3.1	TRANSACTIVE AGENT	41
<b>4.4.</b>	<b>TRANSACTIVE ENERGY E SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO</b>	<b>43</b>
4.4.1.	MODELOS PROPOSTOS	46
4.4.2.	SERVIÇOS ANCILARES	51
<b>CAPÍTULO 5</b>		<b>53</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	<b>53</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>55</b>

# Capítulo 1

## 1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

De acordo com a Academia Nacional de Engenharia dos EUA, a eletrificação massiva das cidades foi a conquista suprema da engenharia no século XX, pelo indubitável impacto na melhoria da qualidade de vida proporcionada na sociedade. (BANDEIRA, 2012)

Porém, foi apenas a partir das últimas décadas do século XX, que se ampliou em todo o planeta o conceito de consciência ambiental. Os modelos de crescimento econômico e de apropriação dos recursos ambientais entraram numa profunda crise, alavancando mudança de paradigmas na relação homem-ambiente, que por sua vez, acarretaram na profunda mobilização de governos e empresas para a definição de normas e procedimentos que protejam o ambiente natural, bem como recuperem ou produzam ambientes sustentáveis. (VIEIRA & BARROS, 2009)

Em contrapartida, em se tratando das estruturas das redes de distribuição de energia elétrica, nos últimos 100 anos não ocorreram mudanças significativas. As experiências têm mostrado que os modelos adotados no sistema elétrico no século XX não se adaptam as principais exigências do século XXI, que incluem não apenas o aumento da demanda de energia, mas também um aumento na qualidade de fornecimento e a mudança de comportamento do homem com o ambiente (LOPES *et al*, 2012).

Influenciado por esse paradigma, o setor energético vem sofrendo uma transformação intensa, ligada diretamente a questão ambiental e a fomentação de novas práticas e modelos para adequar os gastos de energia ao aumento severo das regulamentações e das leis ambientais atuais. A introdução de recursos de energia distribuídos surge para contribuir com o sistema elétrico, sendo solução para a necessidade de aumento de carga, reduzindo-se os picos de demanda, além de favorecer a solução de alguns entraves ambientais, criando serviços a partir de fontes renováveis e próximos aos pontos de consumo, impulsionando a eficiência energética. (NEVES & BAGAROLLI, 2014)

Essas alterações do setor elétrico, somada à incerteza no custo do combustível, o envelhecimento das redes existentes, a ausência de capacidade de fornecimento para responder à crescente demanda de carga e a carência de

restauração automática do fornecimento de energia, aceleram a necessidade de modernizar a rede de distribuição através da introdução de novas tecnologias, evidenciando a cada dia a necessidade da aplicação do conceito de smart grids. (VALSAMA *apud* ATTEYA *et al*, 2017)

Neste cenário, as *smart grids* criam um ambiente que introduz uma convergência entre a infraestrutura de geração, transmissão, distribuição de energia, tecnologia da informação e a infraestrutura de comunicações digitais, que possibilita a troca de informações e ações de controle entre os diversos segmentos da rede elétrica (MACEDO & GALO, 2014).

LAMIN (2013) acredita que essa revolução no setor elétrico, com impacto direto no segmento de distribuição, visa permitir uma série de possibilidades que englobam a participação ativa dos consumidores inerentes a maior disponibilidade de informações, prestação de novos serviços e gestão de ativos, possibilitando um aumento de eficiência energética e melhora na qualidade de fornecimento de energia elétrica, ligados diretamente ao combate de perdas técnicas que proporciona benefícios a empresas consumidoras e aos consumidores.

Tanto no Brasil, como nos EUA e países da Europa, empresas do setor industrial, órgãos governamentais de regulação, empresas de energia, universidades e institutos de pesquisa concordam que o sistema de distribuição de energia elétrica atual é incapaz de atender as essas novas demandas e características (CARRIJO & LOTERO, 2012).

Essas necessidades de adaptação do modelo de sistema de energia elétrica, apresenta a oportunidade ideal para introduzir o conceito de *Transactive Energy (TE)* em toda a Infra-estrutura e especificamente no nível de distribuição da rede elétrica. Evidenciando a necessidade de um novo modelo baseado em informações que abrange os provedores de serviços, clientes e mercados, fazendo uso de múltiplas tecnologias de comunicação existentes (KHODAYAR *et al*, 2016). E que visa permitir a participação de forma inclusiva de diferentes dispositivos e entidades, visando uma participação ativa do lado da demanda, baseado em incentivos econômicos (RAHIMI *et al*, 2012).

## 1.2 OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo apresentar uma análise bibliográfica acerca da inserção do crescimento de recursos de energia distribuídos presentes no sistema de energia elétrica e o introduzir os conceitos relacionados a *smart grids* e *transactive energy* no mercado de energia atual e evidenciar as características e alterações ocasionadas pelos mesmos.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado da seguinte forma:

No capítulo 2 é mostrado um estudo sintetizado sobre os conceitos dos modelos de mercado de energia e serão abordadas as principais características e classificações dos leilões de energia.

No capítulo 3 é realizado um estudo sobre a inserção de fontes renováveis no setor elétrico e as principais tecnologias e características presentes no conceito de *smart grids*.

O capítulo 4 aborda conceitos e análises referentes ao contexto de mercado de energia aplicado a distribuição inerente ao conceito de *transactive energy*.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões referentes ao estudo e as perspectivas futuras de trabalho.

## Capítulo 2

### 2 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será apresentado um estudo sintetizado sobre as características das principais teorias dos principais modelos de mercado de energia e serão abordadas as principais características e classificações dos leilões de energia.

#### 2.1 MODELOS DE MERCADO DE ENERGIA

A partir dos anos 80 foram iniciados os movimentos de liberalização dos mercados de eletricidade em alguns países, cabendo ao Chile o papel de pioneiro nessa reforma. A liberalização dos mercados e a consequente introdução de novos participantes (geradores e consumidores) trouxeram tanto benefícios quanto desafios (BELLINI, 2015).

Segundo KIRSCHEN (2004), os mercados de energia são formados pelos seguintes agentes que assumem os papéis de compradores ou de vendedores de energia elétrica: (i) Empresas Geradoras - Responsáveis pela geração de energia elétrica (ii) Empresas Transmissoras - Operam as linhas de transmissão. (iii) Empresas Distribuidoras - Operam as redes de distribuição (iv) Varejistas - Compram energia e revendem para consumidores livres que não podem participar do mercado. (v) Grandes consumidores - Compram energia diretamente do mercado. E ainda pela existência de agentes que colaboram com a regulação do mercado, ou são consumidores especiais, sendo eles: (vi) Operador do mercado - responsável pela contabilização do mercado. (vii) Regulador - Determina ou aprova as regras do sistema. (viii) Operador independente do sistema - Mantem a segurança do sistema de energia. (ix) Pequenos consumidores - Compram energia elétrica dos varejistas.

A caracterização da interação destes agentes define o modelo de mercado. De acordo com HUNT & SHUTTLEWORK (1996) podem ser do tipo: (i) Monopólio - Uma única empresa detém o controle sobre toda cadeia de geração, transmissão e distribuição de eletricidade local. (ii) Monopsônio - Existe competição na geração através da possibilidade de geradores independentes produzirem e venderem sua

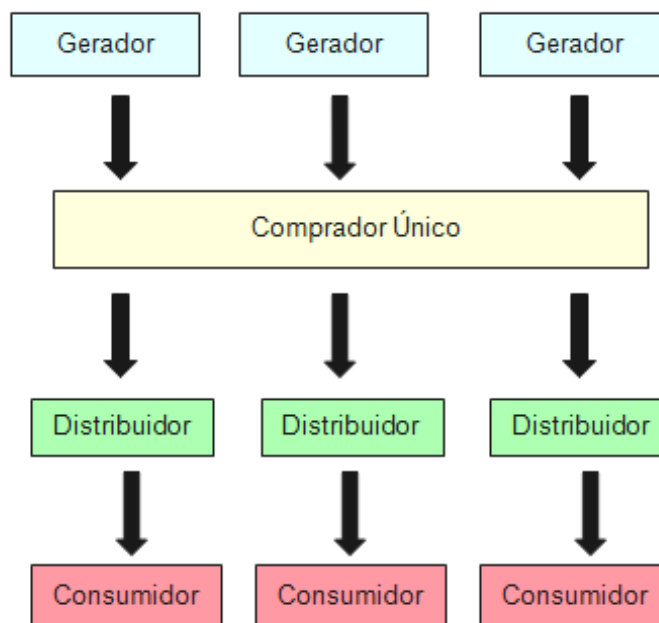


energia para o mercado. (iii) Competição por Atacado - Distribuidoras e consumidores de grande porte compram energia diretamente das unidades geradoras, ou em um mercado atacadista de energia. (iv) Competição no Varejo - pequenos consumidores podem comprar energia em um mercado varejista.

Segundo MAYO (2013), entre os modelos de mercado competitivo existentes, se destacam: (i) Modelo de aprovisionamento competitivo, ou modelo de comprador único. (ii) Modelo atacadista competitivo. (iii) Modelo varejista competitivo. Porém, é importante ressaltar, que a escolha do modelo a ser adotado por um país, deve considerar as características e necessidades do mesmo. Por não existir um único modelo perfeito e completo de mercado de energia e haja vista as diferenças estruturais e políticas existentes nos países

### 2.1.1 MODELO DE APROVISIONAMENTO COMPETITIVO

MAYO (2013) define esse modelo como um método de introduzir a competição na entrada de nova capacidade de geração no mercado. Tratando-se principalmente de uma instituição governamental, com responsabilidade exclusiva pela compra de energia elétrica dos geradores, revendendo-as para as empresas de distribuição. Como pode ser observado na Figura 1.



**Figura 1:** Modelo de aprovisionamento competitivo

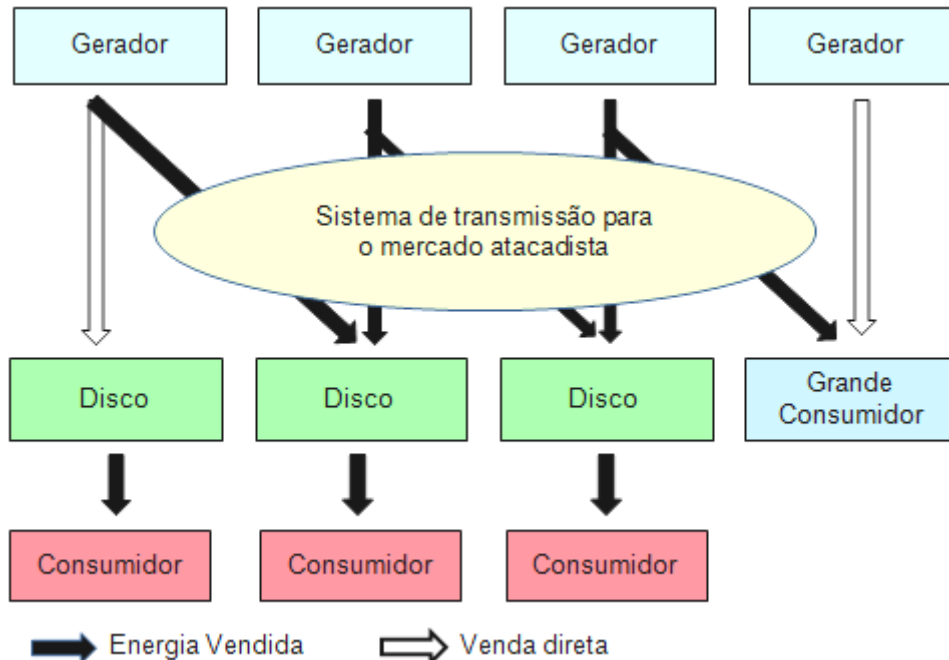
Fonte: MAYO, 2013 (adaptado)

### 2.1.2 MODELO ATACADISTA COMPETITIVO

Um mercado de eletricidade atacadista competitivo em bom funcionamento, visa o fornecimento com foco na confiabilidade e garantia de formação de preços de energia de forma transparente e competitiva (JOSKOW, 2006).

KIRSCHEN (2004) esclarece que no modelo atacadista, as empresas distribuidoras (Discos) compram energia elétrica demandada por seus clientes diretamente de empresas geradoras. Da mesma forma, que viabiliza aos maiores consumidores a realizar a compra de energia elétrica diretamente no mercado atacadista. Esse modelo cria uma concorrência consideravelmente maior para as empresas geradoras, devido ao fato do preço de atacado ser determinado pela interação entre oferta e demanda.

O modelo de mercado atacadista pode ser apresentado em duas maneiras: (i) Modelo Pool de energia ou (ii) Mercado de contratação Bilateral. Sendo as interações comuns entre os agentes presentes no mercado atacadista representados na Figura 2.



**Figura 2:** Modelo atacadista competitivo

Fonte: KIRSCHEN, 2004 (adaptado)

### 2.1.2.1 MODELO *POOL* DE ENERGIA

O modelo de mercado tipo *Pool* é caracterizado por agregar a produção de eletricidade da geração, onde se pretende equilibrar a produção e a demanda de forma a manter a eficiência (SARAIVA, 2002).

O pool de energia é em suma operado de forma centralizada por uma organização independente, conhecido como operador independente do mercado, responsável pela liquidação, programação, despacho da geração e gestão da transmissão.

Os mercados pool de energia podem ser classificados como *Gross pool*, também chamado de pool total de energia, ou do tipo *Net pool*, conhecido como pool líquido de energia.

#### Mercado tipo Gross Pool

No mercado Gross Pool, a produção inteira de cada central ou unidade geradora é determinada pelo operador do mercado. Isto é, o produtor não tem qualquer influência direta no programa de produção (PETROV, 2010).

Nesse modelo, todos os geradores, exceto os menores, são obrigados a vender toda a sua geração ao preço do mercado (GREEN, 2005). Entretanto, não cabe aos geradores a decisão de operar suas usinas e sim ao operador do sistema, também responsável por determinar a demanda prevista.

O leilão nesse mercado é de participação unilateral, cabendo aos geradores a oferta de preço, que são agregados de forma crescente de preço. MAYO (2013) ressalta que o preço de mercado pode variar de modo significativo ao longo do dia, influenciado pela flutuação da demanda. E acrescenta que uma forma de gerir essa volatilidade de preço é fazer uso de contratos por diferença e imposição de um preço teto (*price cap*) no mercado.

#### Mercado tipo Net pool

No mercado *Net pool*, os geradores têm a liberdade de realizar negociações bilaterais com os comerciantes varejistas (GREEN, 2005). Portanto, o modelo *Net Pool* representa um modelo híbrido entre *Gross Pool* e um mercado de contratos bilaterais.

Os contratos bilaterais são uma forma alternativa de relacionamento entre os produtores e os consumidores, que têm como objetivo diminuir o risco inerente ao funcionamento dos mercados de curto prazo e conferir às entidades consumidoras uma capacidade real de eleger o fornecedor com o qual se pretendem relacionar (GONÇALVEZ, 2013).

GREEN (2005) acredita que em um mercado transparente, a escolha entre *Gross* e *Net Pool* é irrelevante para os resultados de mercado, embora o modelo *Net Pool* possa permitir uma maior flexibilidade na concepção dos contratos. Entretanto, se o comércio bilateral não for transparente, o modelo *Gross Pool* dará aos participantes do mercado mais informações, possibilitando negociações e decisões de entrada e saída mais eficientes.

### **2.1.2.2 MODELO DE CONTRATAÇÃO BILATERAL**

Enquanto que no modelo *pool* só é possível vender energia ao mercado, no modelo de contratação bilateral pode-se tanto comprar como vender energia para qualquer outra parte envolvida. MAYO (2013) acredita que esse modelo surgiu a partir da definição de que a livre comercialização é a melhor maneira de alcançar a competição na venda de energia no atacado.

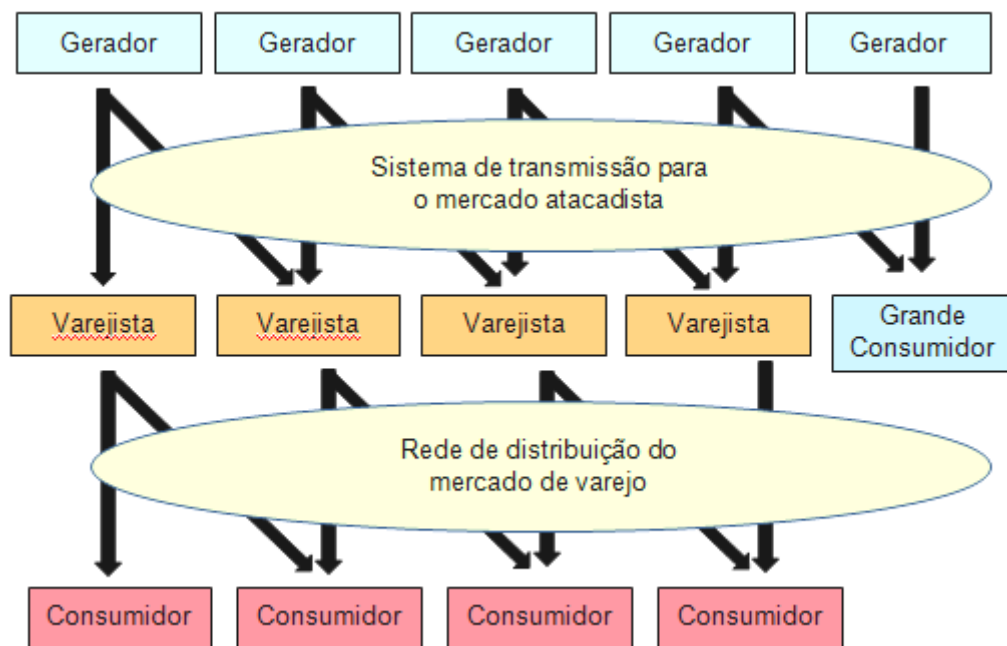
Num mercado de contratos bilaterais, todos os participantes no mercado são livres para realizar qualquer tipo de obrigações contratuais para a entrega de energia. Como consequência, o mercado de contratos bilaterais permite o intercâmbio bidirecional entre dois participantes no mercado e principalmente permite que todos os participantes no mercado atuem como comercializadores (PETROV, 2010).

Um mercado completo de energia elétrica inclui diferentes tipos de mercados com variados horizontes temporais, sendo os mais relevantes, segundo KIRSCHEN (2004): (i) Mercados Futuros; (ii) Mercados de curto prazo (Mercado Spot); (iii) Mercados de curto prazo (*Day-Ahead*); (iv) Mercado de capacidade de reserva; (v) Mercado de serviços ancilares, entre outros.

### 2.1.3 MERCADO VAREJISTA COMPETITIVO

Neste modelo, as únicas funções de monopólio restantes são a provisão e operação das redes de transmissão e distribuição. (KIRSCHEN, 2004)

Em um modelo de mercado varejista, os consumidores têm a possibilidade de escolher seu fornecedor de energia. O fornecedor de energia, ou um varejista, é a empresa responsável por fornecer energia elétrica aos consumidores finais, podendo gerar a energia que fornece, caso seja proprietária de uma geradora, ou comprar a energia demandada no mercado atacadista (GREEN, 2005). Segundo, MAYO (2013), cabe aos consumidores residenciais e industriais de pequeno e médio porte, realizar a compra diretamente de varejistas. A interação entre os agentes no mercado varejista é representada pela Figura 3.



**Figura 3:** Modelo Varejista competitivo

Fonte: KIRSCHEN, 2004 (adaptado)

## 2.2 LEILÕES DE ENERGIA

Segundo WOLFSTETTER (1999), leilão pode ser definido como um mecanismo de negociação composto por uma série de regras responsáveis por especificar a determinação do vendedor e do preço a ser pago ao mesmo. Por sua

vez, o leilão consiste de um processo de seleção que permite a competição entre os participantes, a fim de se conseguir comprar ou vender algum bem ou serviço (BELLINI, 2015).

KLEMPERER (2004) afirma que os primeiros registros de leilão se referem à prática dos babilônios de leiloar suas esposas, além das concessões de minas, espólios de guerra e até um império inteiro, realizados em 193 d.C pelos gregos antigos. Porém, foi apenas nas últimas décadas que a utilização do mecanismo de leilão tem crescido de forma significativa, principalmente ao que se refere aos novos mercados de telefonia celulares, eletricidade, além de licenças para exploração de petróleo e privatização de empresas estatais.

MAYO (2012) define que os mercados competitivos de energia, geralmente são organizados em torno de um ou mais leilões, podendo os mesmos assumir diferentes classificações, considerando diferentes critérios de aplicação e características. A primeira a se considerar é com relação ao critério de número de participantes; em se tratando de mercados em que os leilões ocorrem com a participação de um único lado, onde os lances são submetidos unicamente pela oferta (geração), a demanda é definida de forma estimada. Em contrapartida, em mercados em que ambos os lados participam das negociações, a demanda é definida pelos participantes. Dessa maneira, o modelo de leilão a ser utilizado em um mercado depende de diferentes fatores, não existindo então o melhor modelo absoluto, e sim um melhor modelo para atender as características do mercado.

Os principais objetivos dos leilões de eletricidade, segundo MAURER & BARROSO (2011) são: (i) Atração de novos empreendimentos de geração para suprir a demanda crescente; (ii) Manter e/ou modificar a capacidade de geração existente; (iii) Compra de eletricidade dos Comercializadores de Último Recurso; (iv) Atrair novos parceiros para adquirir partes da capacidade de produção de uma planta de eletricidade existente.

## **2.3 MODELOS DE LEILÕES DE ENERGIA**

Segundo SILVA (2003), os leilões são organizados de modo que seja realizada a comercialização de contratos de curto, médio e longo prazo, com objetivo de suprir a demanda de energia necessária pelos consumidores, onde a

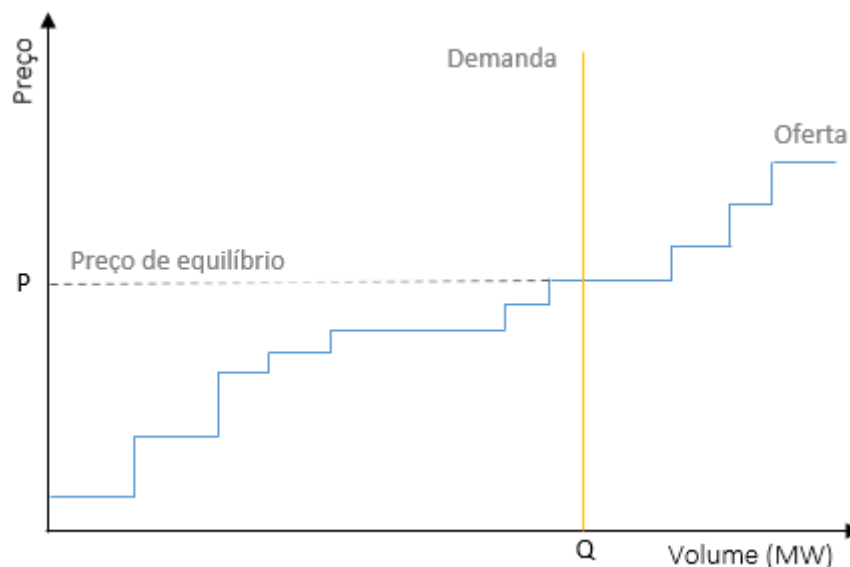
caracterização dos leilões pode ser feita a partir:(i) Da sua natureza; (ii) Pela forma como os lances são oferecidos e (iii) Pela determinação do preço de fechamento.

### 2.3.1 NATUREZA

A natureza de um leilão é definida a partir do modelo de participação adotada pelos compradores e vendedores no mesmo, podendo defini-los como modelos de leilão com participação unilateral ou participação bilateral.

#### 2.3.1.1 LEILÃO UNILATERAL

MAYO (2012) define o modelo de leilão unilateral, como aquele onde a competição acontece apenas com a participação de um dos lados (geradores). Portanto, as ofertas dos geradores, contendo quantidade e preço, são processadas de forma ascendente a partir do preço. Enquanto que a curva referente a demanda é definida pelo operador na forma de uma reta vertical, que representa o volume da carga a ser contratada, conforme mostrado na Figura 4.



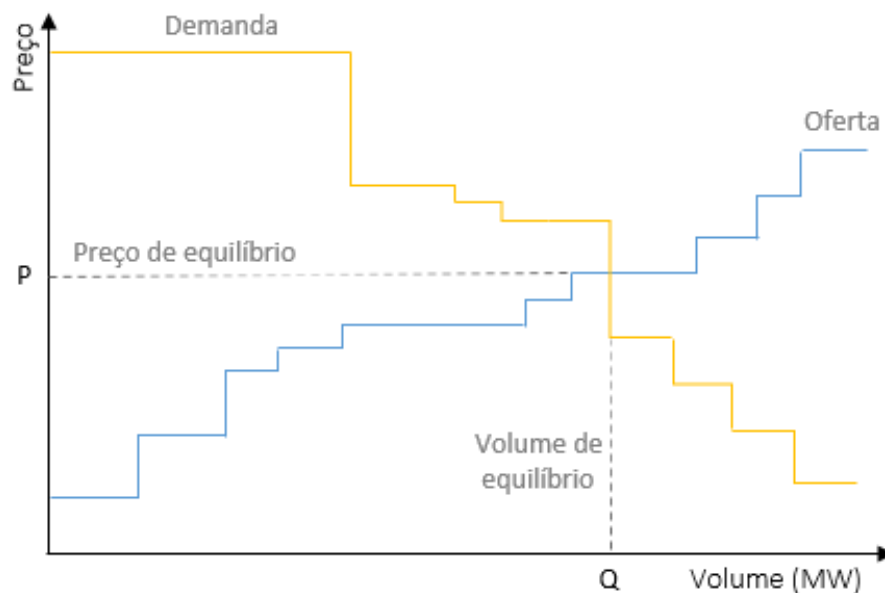
**Figura 4:** Leilão unilateral

Fonte: MAYO, 2013 (adaptado)

Dessa forma, o preço de equilíbrio, ou preço de fechamento do leilão, é caracterizado como o ponto de interseção das curvas da oferta e a demanda (SOZZI, 2014).

### 2.3.1.2 LEILÃO BILATERAL

Leilões bilaterais são aqueles envolvendo ambos os compradores e vendedores, os quais participam simultaneamente no processo de leilão (FAQIRY et al, 2016). Nesse modelo, os lances são ofertados por ambos participantes. Enquanto os preços ofertados pelos vendedores são processados da mesma forma que acontece em leilões unilaterais. Já por parte dos compradores suas ofertas são submetidas a partir de lances de quantidade e o preço, por sua vez, esses dados são processados de maneira decrescente de preço, como pode ser visto na Figura 5.



**Figura 5:** Leilão Bilateral

Fonte: Mayo, 2013 (adaptado)

BELLINI (2015) acredita que esse modelo de leilão, favorece a competição e promove a obtenção do melhor preço de equilíbrio para cada um dos lados.

### 2.3.2 FORMA

A forma de um leilão caracteriza como são realizados os lances, podendo ser definido como modelo de leilão aberto ou fechado.



### **2.3.2.1 ABERTO**

#### Leilão inglês (ascendente)

Leilão oral, inglês ou de preço ascendente é o tipo mais comum de leilão aberto (FELDMAN *et al*,1993). Este leilão é certamente o mais popularizado devido seu uso na venda de objetos de arte, antiguidades, cavalos de corrida, vinhos raros, além de propriedades residenciais e comerciais (MENEZES, 1998).

O leilão começa com um preço baixo e os lances são realizados sequencialmente, onde os agentes tomam conhecimento do lance dos seus adversários e cada lance é maior que o imediatamente anterior, ganhando o participante que fez o último lance. O que permite que o valor de oportunidade de cada participante seja confrontado com os demais (CORREIA, 2016).

Apesar de sua aparente simplicidade, é bastante complexo, pois há um fluxo contínuo de informações durante o leilão, os lances revelam paulatinamente o preço de mercado, permitindo que os indivíduos revejam seus valores para o objeto ao longo do leilão. Esse processo reduz o impacto da maldição do vencedor e faz com que os participantes ofertem seus lances de forma mais agressiva (MENEZES, 1998).

#### Leilão Holandês (descendente)

Este outro tipo de leilão deve o seu nome à técnica empregada na venda de flores na Holanda (MENEZES, 1998). Todavia, os leilões de preço descendente já foram utilizados para crédito de refinanciamento na Romênia e para moedas estrangeiras na Bolívia, Gana, Jamaica e Zâmbia (FELDMAN *et al*, 1993).

No leilão descendente, o leiloeiro inicia o leilão com um valor extremamente alto e reduz o mesmo continuamente. O primeiro agente a aceitar o lance corrente obtém o objeto (KLEMPERER, 1999).

Quando várias unidades são leiloadas, normalmente há mais arrematadores à medida que o preço abaixa; o processo continua até que a demanda total seja igual à quantidade fixa oferecida (FELDMAN *et al*,1993).

Dessa forma, o leilão Holandês requer uma avaliação do mercado e do valor do bem leiloado. Negligenciar esta avaliação aumenta a chance do agente não realizar um bom negócio (SHEBLÉ, 1999).

### **2.3.2.2 FECHADO**

No leilão fechado os lances são apresentados simultaneamente ao leiloeiro em envelopes fechados. Ganhando o participante que fizer o melhor lance. Este leilão exige que cada participante faça o lance considerando exclusivamente seu valor de oportunidade, pois ele somente toma conhecimento dos demais lances quando o leilão está encerrado (CORREIA, 2016).

Esse tipo é utilizado em grande escala na compra de bens e aquisição de serviços pelo governo, sendo as licitações a forma mais conhecida, onde ganha o lance de menor valor.

MENEZES (1998) acredita que os participantes enfrentam um dilema na hora de elaborar seus lances: um lance muito elevado aumenta a probabilidade de ganhar, mas reduz o lucro no caso de vitória. Um lance muito baixo induz a um ganho alto no caso de vitória, mas reduz a probabilidade de ganhar o objeto.

Contudo, ETHIER e colaboradores (1999), acreditam que o leilão fechado incita com que ofertantes submetam lances de preço igual ao seu custo e lances de quantidade equivalentes à sua capacidade. Afirmam ainda que, comumente, essa prática é responsável pelo aumento do preço da eletricidade e redução da eficiência do leilão.

### **2.3.3 PREÇO DE FECHAMENTO**

O preço de fechamento é determinado pelo encontro das curvas de oferta e demanda deste mercado e impõe regras para determinação do valor pelo qual o bem leiloadado é negociado. Dessa forma, em se tratando de leilões de energia, muito comumente o preço de fechamento pode ser definido como sendo uniforme ou discriminatório (MASILI, 2004) (LANZOTTI et al, 2002).

#### **2.3.3.1 LEILÃO DE PREÇO UNIFORME**

Em um leilão de preço uniforme, todos os agentes vencedores pagam exatamente o mesmo preço, independentemente do valor de seus lances (HUDSON, 2000).

Dessa forma, os agentes vencedores recebem o valor marginal do sistema. Portanto, todos os geradores com lances de preço menor ao marginal recebem um

ganho extra. Da mesma forma em que os consumidores que ofereceram lances maiores, pagam um preço menor ao que estavam dispostos a pagar (MAYO, 2012).

CORREIA e colaboradores (2016) caracterizam os leilões uniformes como de primeiro ou segundo preço. No leilão de primeiro preço, o ganhador é aquele que fizer o melhor lance, com o preço de liquidação corresponde ao lance ganhador. Por sua vez, no leilão de segundo preço (Vickrey) vence o participante que fizer o melhor lance, mas o preço de liquidação corresponde ao melhor lance perdedor.

### **2.3.3.2 LEILÃO DE PREÇO DISCRIMINATÓRIO**

No leilão discriminatório, também conhecido como *pay-as-bid* (pague conforme ofertado), cada agente vencedor paga o valor de seu lance pelo produto requerido. Este leilão tende a desencorajar a utilização de poder de mercado através de uma maior visibilidade de preços (MASILI, 2004).

Segundo MAYO (2012), nesse modelo, a seleção dos gerados ocorre da mesma forma que o leilão de preço uniforme, porém com a diferença de que cada gerador recebe preços diferentes baseados nas suas respectivas ofertas.

Adicionalmente, a eficiência do leilão dependerá da existência de mecanismos e regras específicas que aumentem sua atratividade e reduza as possibilidades de colusão, competição predatória e outras formas de poder de mercado (WOLFSTETTER, 1999).

## Capítulo 3

### 3 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, será apresentado um estudo sintetizado sobre a inserção de fontes renováveis no setor elétrico e as principais tecnologias e características presentes no conceito de *smart grids*.

#### 3.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

VICHI e colaboradores (2009) afirmam que o panorama mundial está mudando rapidamente, por motivos ligados a três das grandes preocupações da humanidade nesse início de século: meio ambiente, energia e economia global. Embora à primeira vista possam parecer distintas, estas três áreas estão, na realidade, completamente interligadas.

Em se tratando da indústria de energia diante desse paradigma, nos últimos anos o crescimento da utilização de energia renovável em escala residencial e conectados ao sistema de distribuição coloca em pauta, tanto a variabilidade de um recurso renovável, como a necessidade de que os serviços de distribuição coordenem cargas variáveis e recursos distribuídos para manter o sistema equilibrado e confiável (IEA, 2011).

Como aumento de recursos de energia distribuídos (DER), os serviços públicos de distribuição e o sistema de energia elétrica em geral, são confrontados com um problema cada vez mais desafiador de como continuar a operar e manter um sistema confiável (FORFIA, 2016).

Diante da necessidade por qualidade, segurança, flexibilidade e sustentabilidade, o conceito de redes inteligentes surge como revolução tecnológica no setor de energia elétrica. Fazendo uso de técnicas de eletrônica, telecomunicações e de tecnologia da informação de modo a promover a automação e a melhoria dos serviços de energia elétrica.

O grande desafio dessas mudanças e da introdução do novo conceito é garantir que a indústria de eletricidade além de ser competitiva, seja também capaz

de atender a objetivos sociais, de proteção ambiental e assegurar investimentos que promovam maior sustentabilidade no setor elétrico no futuro (JANUZZI, 2000).

### 3.2 SMART GRIDS

FALCÃO (2010) & MANDELMAN (2011) acreditam que a expressão *Smart Grid* deve ser entendida mais como um conceito do que uma tecnologia ou equipamento específico. Onde a lógica principal do conceito se encontra na palavra inteligência, ao fazer usos de diversas áreas da engenharia e de equipamentos distintos.

RIBEIRO (2012) acredita que *smart grid* tende a inaugurar a inteligência digital a um dos últimos resquícios da nossa tecnologia analógica: o setor elétrico. Essa transformação está calcada em três pilares, sendo eles (a) o sensoriamento, com a função de captar as informações de rede; (b) as telecomunicações, com a função de transmitir as informações de rede, podendo se dar com tecnologias que usam a própria rede elétrica para a transmissão de dados (*Power Line Communications*) ou com tecnologias de transmissão de dados desvincilhadas da rede de energia elétrica e, finalmente, (c) o processamento, com a função de interpretar as informações em trânsito e tomar decisões de forma independente.

Embora existam várias definições para o conceito de redes inteligentes, todas convergem para o uso de elementos digitais e de comunicações nas redes que transportam a energia. Esses elementos possibilitam o envio de uma gama de dados e informação para os centros de controle, onde eles são tratados, auxiliando na operação e controle do sistema como um todo (MME, 2010).

A Figura 6 ilustra a rede elétrica tradicional com fluxo de energia unidirecional, enquanto que por sua vez, a Figura 7 ilustra a rede elétrica inteligente com os fluxos de energia e comunicação em duas vias e com inclusão de novos conceitos.



**Figura 6:** Rede Elétrica Tradicional

Fonte: LOPES et al, 2016



**Figura 7:** Rede Elétrica Inteligente

Fonte: LOPES et al, 2016

Segundo FALCÃO (2010), LAMIM (2013), CHIA & CORREA (2011) algumas das principais características atribuídas à *Smart Grid* (SG) são: (i) Auto-recuperação: capacidade de automaticamente detectar, analisar, responder e restaurar falhas na rede; (ii) Maior participação dos Consumidores: Incluir os equipamentos e comportamento dos consumidores nos processos de planejamento e operação da rede; (iii) Tolerância a Ataques Externos: capacidade de mitigar e resistir a ataques físicos e cyber-ataques; (iv) Qualidade de Energia: prover energia com a qualidade exigida pela sociedade digital; (v) Acomodar uma grande variedade de fontes cargas: capacidade de integrar de forma transparente (*plug and play*) uma variedade de fontes de energia de várias dimensões e tecnologia; (vi) Reduzir o

impacto ambiental do sistema produtor de eletricidade, reduzindo perdas e utilizando fontes de baixo impacto ambiental; (vii) Resposta da demanda mediante a atuação remota em dispositivos dos consumidores; (viii) Viabilizar e beneficiar-se de mercados competitivos de energia, favorecendo o mercado varejista e a micro-geração.

Em relatório sobre redes elétricas inteligentes, elaborado pelo MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (2010), foi destacado que algumas transformações devem ser levadas a cabo, de modo a viabilizar a implantação desse conceito, tais como a modernização da infra-estrutura, instalação de camadas digitais, como softwares e capacidade de processamento de dados, que são a essência da rede inteligente, e mudanças na comercialização, necessárias para ampliar o número de consumidores.

CHIA & CORREIA (2011) ressaltam que uma característica fundamental a ser observada com a implementação deste novo conceito no sistema de potência atual, é a existência do fluxo bidirecional de energia e dados. Com isto, a concessionária de energia pode obter dados atualizados e mais precisos em relação ao consumo dos seus clientes, permitindo monitorar o fluxo de potência em tempo real, otimizando a capacidade da rede, podendo inclusive intervir no caso de sobrecargas, por exemplo, de modo a evitar interrupções, antes que esta venha a acontecer. Através da comunicação bidirecional, é possível também, verificar de forma automática a localização das perturbações na rede.

O grande desafio para as *smart grids* é, sem dúvida, como coordenar um número cada vez maior de dispositivos inteligentes, cada um com seus próprios objetivos e valores, em um ambiente resiliente, seguro e eficiente que equilibre os *trade-offs* entre os muitos participantes e possua a flexibilidade para evoluir com a mudança do mix de recursos ao longo do tempo (KOK, 2016).

### **3.2.1 GERENCIAMENTO DA DEMANDA E MEDIÇÃO INTELIGENTE**

MCDANIEL & MCLAUGHLIN (2009) acreditam que uma das maiores preocupações do setor regulado de energia elétrica é a busca por padrões de consumo que sejam capazes de administrar, de forma consciente e no curto prazo, os picos de consumo, ao mesmo tempo em que, sem reduzir o bem-estar propiciado

pelo uso de energia, reduzam a demanda futura de longo prazo. Cabendo á tarifa o papel principal de balancear esses objetivos.

CLARK W. GELLINGS (1993), criador do termo *Demand Side Management* (DSM), define que as atividades de gerenciamento pelo lado da demanda (GLD) são aquelas que envolvem ações no lado da demanda, ou seja, no lado dos consumidores, de modo que estes e a concessionária trabalham em parceria, buscando de uma maneira ampla, remodelar a curva de carga, ou seja, busca influenciar e, se necessário modificar, o comportamento do consumidor, a fim de beneficiar tanto o consumidor como a concessionária.

Com isso em mente, o medidor inteligente, um dos componentes principais de todo o sistema, é o responsável pela maioria das tarefas, sendo capaz de processar dados e enviar comandos para vários outros equipamentos, permitindo a integração de toda a cadeia de fornecimento. (MME, 2010).

FALCÃO (2010) ressalta ainda que um sistema de coleta automática de dados de medidores de energia e por consequência a transferência para um sistema centralizado de processamento de dados, permitiria analisar a demanda e influir na resposta da demanda através da disponibilização de sinais de preços e atuação em dispositivos nas instalações dos consumidores.

O gerenciamento pelo lado da demanda só é concebível em um cenário em que os consumidores encontrem, por exemplo, incentivos econômicos a consumir mais energia em horários de consumo agregado (menor tarifa) e menos energia em horários de pico (maior tarifa). Essa tarifação dinâmica apenas se torna possível na medida em que o smart grid permite que os usuários do serviço tenham à mão novas informações instantâneas de seus consumos e na medida em que se tenha à disposição instrumentos para aferir, de forma instantânea e remota seu o consumo de energia (RIBEIRO, 2012).

### **3.2.2 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ARMAZENAMENTO**

O recente aumento da inserção de geração distribuída nos sistemas elétricos, como a crescente utilização de painéis fotovoltaicos em residências e estabelecimentos comerciais, leva a indústria de energia a uma nova forma de geração de energia elétrica. As redes inteligentes adquirem a capacidade de receber



energia proveniente desses painéis, criando uma nova forma de comercialização da energia. O consumidor tomaria papel mais ativo e também assumiria papel de vendedor, na medida em que o excedente de sua geração seria repassado à rede, trazendo então o conceito de geração distribuída. (MME, 2010).

A GD é definida como o uso integrado ou isolado de recursos modulares de pequeno porte por concessionárias, consumidores e terceiros em aplicações que beneficiam o sistema elétrico e ou consumidores específicos. O termo tem sintonia com outras expressões normalmente usadas como: autogeração, geração *in situ*, cogeração e geração exclusiva (EPRI, 1997 *apud* OLADE, 2011).

KESHAV & ROSENBERG (2011) acreditam que a Geração Distribuída (GD), além de ser uma área chave para a sustentabilidade e geração de energia limpa, causa um grande impacto em todo o sistema de transmissão e distribuição de energia, uma vez que altera toda a concepção do sistema atual se tornando um tema de alta criticidade.

A GD oferece inúmeras vantagens ao setor elétrico, sendo principalmente, segundo HOFF e colaboradores (2011), economicamente atraente na medida em que reduz os custos, adia investimentos em subestações de transformação e em capacidade adicional para transmissão, além de reduzir perdas nas linhas de transmissão e distribuição, perdas reativas de potência e estabilidade na tensão elétrica.

A Associação da indústria de cogeração de energia (COGEN, 2013) acredita que a geração distribuída tem a capacidade de prover um atendimento mais rápido ao crescimento da demanda (ou à demanda reprimida) por ter um tempo de implantação inferior ao de acréscimos à geração centralizada e reforços das respectivas redes de transmissão e distribuição. Porém, é preciso considerar que apesar da tendência de uso da GD ser crescente, dependendo da cidade ou mercado em que a mesma se encontra, seu uso poderá ser insuficiente para atender todo o crescimento da demanda de energia e, portanto, não irá dispensar acréscimos da geração centralizada, mas sim diminuir sua taxa de crescimento.

Devido a perspectivas relacionadas à geração distribuída, cada vez mais se investe em pesquisas e novas tecnologias voltadas para armazenamento de energia. SILVA (2008) acredita que o armazenamento de energia elétrica torna-se

um elemento chave que permite aumentar a integração das energias renováveis, sendo cada vez mais necessário. Quando a fonte de energia é intermitente e localizada numa zona isolada, a utilização do armazenamento torna-se crucial.

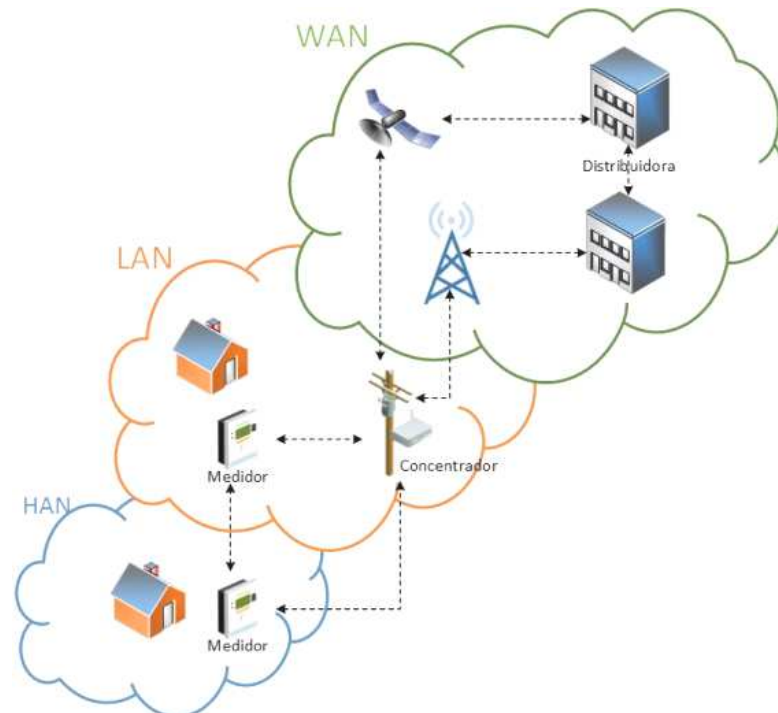
A adoção de sistemas de armazenamento implica em um crescimento no equilíbrio entre a oferta e a demanda, em se tratando de fontes de geração de energia intermitente, possibilitando armazenamento de energia em período de maior geração e descarga de energia em períodos que a demanda seja superior a geração.

Dessa forma, além dos sistemas de armazenamento serem uma solução técnica de gestão da rede local, possibilitando melhor utilização da energia produzida pelas fontes de energia renováveis, tem papel importante na contribuição para a autonomia destes sistemas e o funcionamento do sistema elétrico como um todo. (SILVA, 2008)

### **3.2.3 INFRAESTRUTURA DE TELECOMUNICAÇÕES**

A implantação de sistemas de telecomunicações possibilita um ambiente realmente inteligente. A partir dessa implantação, há a viabilização da automatização da distribuição e o medidor configura-se em um portal entre a distribuidora e o consumidor (LAMIN, 2013).

Segundo NETO *et al* (2013) a infraestrutura de telecomunicações necessária para implantação das redes inteligentes, representada na Figura 8, pode ser dividida da seguinte forma:



**Figura 8:** Estrutura de Telecomunicações de Redes inteligentes

FONTE: NETO et al, 2013

- *Home Area Network (HAN):* Rede de comunicação localizada entre o medidor digital e os dispositivos internos à unidade consumidora;
- *Neighborhood Area Network (NAN) ou Local Area Network (LAN):* Rede de comunicação entre o medidor e os equipamentos de centralização dos dados, chamados concentradores, com abrangência de um quarteirão ou um bairro;
- *Wide Area Network (WAN):* Rede de comunicação formada entre os concentradores e o centro de operação da distribuidora, que abrange grandes distâncias.

### 3.2.4 TECNOLOGIA E SEGURANÇA DA INFORMAÇÃO

De acordo com *NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (2012)* a tecnologia da informação concentra o tema segurança na proteção dos sistemas e informações, para que não ocorra acesso não autorizado, uso indevido, divulgação, interrupção, modificação ou destruição; a fim de garantir a confidencialidade, integridade e disponibilidade das informações e dos sistemas.

Em se tratando do sistema de redes inteligentes, o tema segurança requer uma expansão desse enfoque para abordar o sistema de energia como um todo, considerando os sistemas de informação e comunicação. (CHEN, 2012)

Informações de consumo específicas, armazenadas em bancos de dados das distribuidoras de energia elétrica, expõem hábitos e comportamentos dos consumidores. Algumas técnicas analíticas poderiam identificar a localização exata de cada aparelho em uma residência e ainda traçar a rotina dos residentes a partir de informações tais como quando o indivíduo toma banho, assiste televisão, lava suas roupas, carrega seu celular, trabalha em seu computador, tira férias, etc. (RIBEIRO, 2012)

BIANCHINI & NETO (2013) acreditam que a implantação dos medidores inteligentes podem criar novas vulnerabilidades se não forem considerados os controles de segurança apropriados. Sem os devidos cuidados na elaboração da arquitetura de comunicação, bem como na escolha das tecnologias de comunicação de dados, principalmente tecnologias de comunicação sem fio, o sistema pode não estar seguro o suficiente e ficar sujeito aos ataques cibernéticos.

LAMIN (2013) ressalta que além do controle dos novos equipamentos de medição, de telecomunicações e de automação, sistemas de informática amplos e atuais são necessários para a gestão e armazenamento de todos os dados no contexto das redes inteligentes. Assim, gastos com hardwares e softwares devem ser previstos e considerados.

## Capítulo 4

### 4 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será realizada uma análise referente ao contexto de mercado de energia aplicado a distribuição, ou *transactive energy*.

#### 4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A constante procura por serviços e tecnologias mais eficientes, e com reduzidos impactos ambientais, seja no processo de geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica, associada aos necessários investimentos para o aumento da capacidade instalada no setor elétrico, tem alavancado a geração distribuída como alternativa às tradicionais soluções, seja para instalação local ou para integração regional (DIAS, 2005).

Atualmente, o conceito de *smart grid* apresenta oportunidades e desafios para a melhoria contínua da eletrificação e AMBROSIO (2016) acredita que, enquanto a presença de GD pode melhorar a resiliência, eliminando pontos únicos de falha no sistema de eletrificação de um edifício ou uma microgrid, eles também introduzem complexidade de coordenação e interoperabilidade que, tratada mal, pode levar a uma confiabilidade reduzida como resultado de baixa qualidade ou eficiência reduzida sob a forma de maior custo de implementação e/ou operação.

Desta forma, surge a oportunidade de introduzir conceitos de *Transactive Energy (TE)* em toda a Infra-estrutura e especificamente no nível de distribuição da rede elétrica, evidenciando a necessidade de um novo modelo baseado em informações que abrange os provedores de serviços, clientes e mercados, fazendo uso de múltiplas tecnologias de comunicação existentes (KHODAYAR *et al*, 2016). Este conceito permite a participação de forma inclusiva de diferentes dispositivos e entidades, visando uma participação ativa do lado da demanda, baseado em incentivos econômicos (RAHIMI *et al*, 2012)

## 4.2 TRANSACTIVE ENERGY

KIESLING (2009), HAMMERSTROM (2009) & CHAO (2010) definem Transactive como uma transação, ou troca entre as partes, por um produto a um dado preço. E concluem que o termo *transactive energy* considera que as decisões de mercado são feitas com base em um valor, de forma análoga a transações econômicas.

Com isso em mente, GRID WISE ARCHITETURE COUNCIL (2013), KHODAYAR, MANSHADI & VAFAMER (2016), definem o modelo de *Transactive energy* (TE) como um sistema formado por mecanismos econômicos e de controle que visa permitir o equilíbrio dinâmico entre a oferta e demanda em toda a infraestrutura elétrica, usando o preço da energia como principal parâmetro operacional.

KRISTOVA *et al* (2016) ressaltam que a definição de *Transactive energy* já caracteriza o formato de modelos de mercados atacadista. A aplicação de "mecanismos econômicos e de controle" para gerenciar o sistema de distribuição simplesmente estende o escopo para abranger DERs. KRISTOVA *et al* (2016) acrescentam que a definição de TE não requer o uso exclusivo de mecanismos econômicos, ou baseados no mercado, para garantir o funcionamento adequado do sistema, porém de fato implica necessariamente em estruturas integradas de controle econômico.

*Transactive Energy* garante o equilíbrio em tempo real da oferta e demanda, com base em um ambiente onde a geração distribuída e a carga vem aumentando muito rapidamente. O modelo tem como principais características:

- Integração de fontes renováveis

TE possibilita a coordenação da operação dos recursos energéticos distribuídos com objetivo de mitigar a intermitência energética e achatamento da carga do sistema com a utilização de fontes de geração renováveis (KOK, 2016).

- Proporcionar maior confiabilidade à rede elétrica

TE viabiliza monitorar as interações entre os diversos pontos de carga e geração, se concentrando no uso de técnicas de controle descentralizadas que aumentam a confiabilidade da rede, complementando os atuais sistemas

centralizados. (KNIGHT *et al*, 2014), viabilizando a integração de forma ótima de fontes renováveis e recursos de energia distribuídos (FORFIA, 2016).

- Melhor Gerenciamento de Pico de Carga e demanda

No modelo proposto, os consumidores têm acesso a informações sobre o sistema em que estão inseridos, obtendo dados sobre os horários de uso de pico, os preços e outras informações de energia em tempo real. Possibilitando aos clientes ou sistemas automatizados otimizar o uso de energia.

- Tomada de decisão mais rápida

O controle em tempo real oferece o benefício da rápida tomada de decisão localizada de modo a minimizar o tempo de inatividade e ajudar a preservar a confiabilidade da rede. (KNIGHT *et al*, 2014). Como no caso de ocorrência de uma falha, uma *microgrid* pode operar de modo a sustentar cargas críticas e serviços essenciais.

- Introduzir o prosumidor ao mercado

Consumidores com o papel adicional de fornecimento de eletricidade ao sistema, e/ou armazenamento para uso privado ou de negócios em pequenas e médias empresas (LAUTENSCHLEGER, 2013), recebem o nome de prosumidor, neologismo do inglês *prosumer*, e segundo ANEEL (2012), passam a desempenhar papel de duplo agente no mercado (consumidor e produtor), podendo injetar energia na rede conforme necessário.

- Participação de Veículos Elétricos no Mercado Auxiliar

O controle TE de energia tende a auxiliar a participação de veículos elétricos (EV) no mercado auxiliar, com intuito de fornecer suporte de qualidade para a rede. KHODAYAR *et al* (2016) acreditam que, coordenados, os EVs tem potencial de fornecer serviços ao sistema, tais como a regulação de frequência, reservas e compensação de energia reativa para a rede.

### 4.3 ESTRUTURA DE MERCADO E TRANSACTIVE ENERGY

CAZALET *et al* (2016) acreditam que os mercados de TE provavelmente alterarão o comportamento de muitos consumidores de eletricidade e assim mudarão o modelo de negócio das organizações no mercado elétrico. Para a maioria, as receitas deixarão de ser baseadas em custo de serviço, mas sim na capacidade de criar e capturar valor. As necessidades, prioridades e tomada de decisões dos consumidores irão determinar a sua vontade e capacidade de participar do mercado de energia como prosumidores.

O sistema TE expande o paradigma estabelecido em meados da década de 1990 para o mercado atacadista e domínio do comércio varejista competitivo, com os consumidores/Prosumidores usando dispositivos e plataformas inteligentes. Nesta construção emergente, as commodities não precisam ser limitadas a energia, mas pode também incluir derivados de energia, como serviços ancilares e direitos de transporte similares aos mercado atacadista. (RAHIMI, 2016)

A crescente diversidade de recursos no sistema elétrico tem implicações diretas nos elementos econômicos e de mercado existentes. GRID WISE ARCHITETURE COUNCIL (2016) define as principais mudanças responsáveis pela proposta do novo modelo, levando em conta que essas mudanças tendem a causar impactos no sistema conforme conhecemos:

- Desenvolvimento de novas estruturas de mercado para fazer face à variabilidade dos recursos renováveis de grande escala;
- Surgimento de mercados operando em escalas de tempo cada vez mais curtas,
- Formulação de políticas que vão além dos padrões de portfólio renovável para promover o desenvolvimento de edifícios de alto desempenho;
- O surgimento do Operador Independente do Sistema de Distribuição (DISO), cuja responsabilidade é equilibrar as variações da oferta e da procura entre as restrições técnica avaliadas pelo operador da rede de distribuição (DNO) e da demanda requisitada pelos agentes do mercado atacadista e varejista;
- Necessidade de novos modelos de negócios, regulação, custo e serviço;



- Necessidade de ação no período de minutos nas principais interfaces sistema-sistema entre a transmissão e a distribuição ou distribuição e os clientes varejista. Assim, as mudanças têm impacto tanto na economia dos sistemas de energia elétrica como no controle de ambos os sistemas de energia e os usos finais da eletricidade.

### 4.3.1 TRANSACTIVE AGENT

Em se tratando de TE, é preciso considerar o sistema como uma coleção de agentes de software inteligente, cabendo a alguns a responsabilidade pela gestão de recursos, como baterias ou uma carga flexível, e outros sendo responsáveis por agregar e coordenar os ativos, como o caso de um edifício ou uma microgrid em um campus, por exemplo (AMBRÓSIO, 2016).

HOLMBERG e colaboradores (2016) determinam que o *transactive agent* (TA) atua para representar algum dispositivo ou sistema local (tal como um edifício, uma peça de equipamento, uma microgrid, um operador de mercado ou um agregador de recursos) com interações com outros TAs. Os agentes precisam ser registrados, para então se envolverem em negociações.

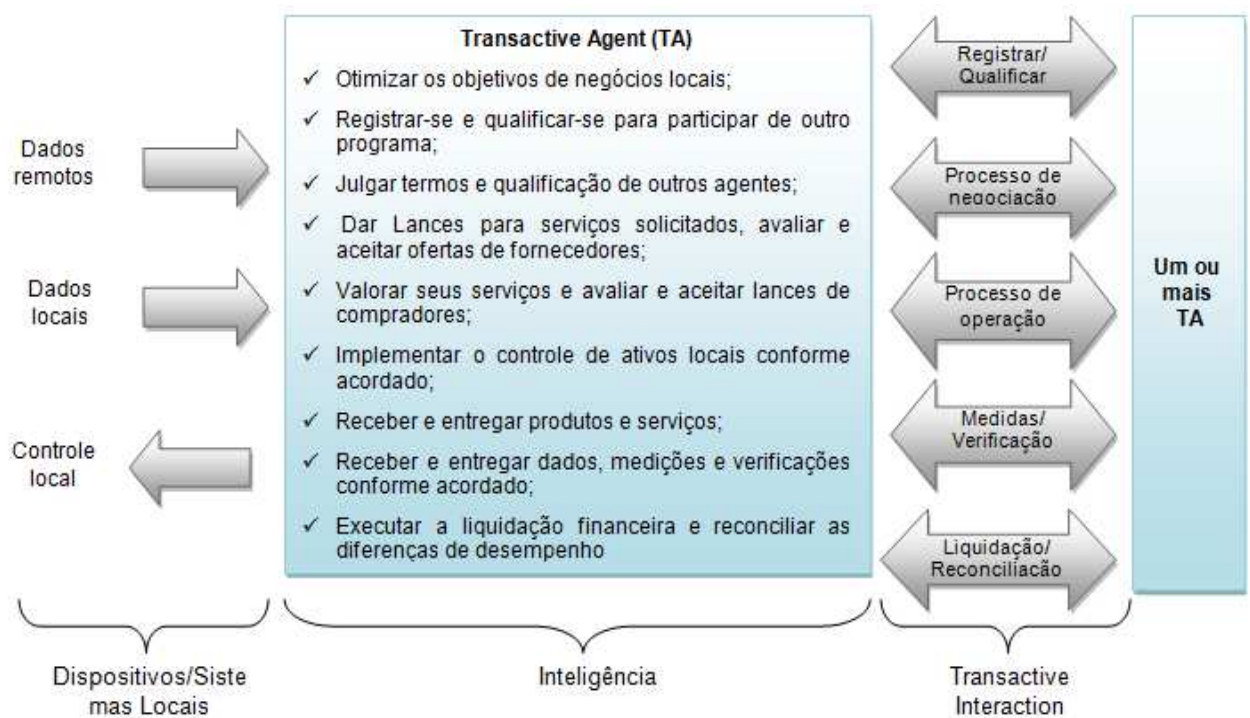
Todos esses agentes se comunicam através de sinais, que representam as necessidades dinamicamente e variáveis do sistema, sob a forma de valor econômico. AMBRÓSIO (2016) acredita que um agente pode influenciar o comportamento de outros agentes no sistema a partir de decisões que afetariam as ações de outros agentes.

As Figura 9 e Figura 10 representam o modelo de um TA com suas respectivas atribuições, deveres e interação com outros agentes.

Regulador	Utilities	Provedor de serviço	Prosumidor/Consumidor
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desenvolver decisões Políticas</li> <li>• Relacionar com os agentes de Produção, Distribuição e Consumo de Energia</li> <li>• Avaliar a abordagem Transativa</li> <li>• Implementar Melhores Práticas e valor para Todas as Partes</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conexão com Clientes e Parceiros</li> <li>• Desenvolver uma abordagem baseada no custo para o Fornecimento de Energia</li> <li>• Fornecer uma abordagem Transativa para que todas as partes tenham um mecanismo justo para Avaliar o preço Baseado no Tempo de Uso e Custos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Parceria com Clientes para fornecer uma Proposição de Valor Consistente para Suas Ofertas</li> <li>• Garantir a melhor relação Custo benefício para seus Contratos com uma Abordagem Transativa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Envolver com Provedores de Energia e Organizações de Serviços Através de Programas de Valor Transativo, Incentivos e Parcerias</li> <li>• Entregar Resposta a Demanda, Deslocamento de Carga ou Programas Similares para Provedores de Serviços e Utilitários</li> </ul>

**Figura 9:** Principais agentes e decisões

Fonte: Grid Wise Architecture Council, 2015. (Adaptado)



**Figura 10:** Modelo de Transactive agent

Fonte: HOLMBERG et AL, 2016. (adaptado)

#### 4.4. TRANSACTIVE ENERGY E SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

O crescimento em volume e diversidade de recursos energéticos distribuídos (DERs) conectados à distribuição está impulsionando um processo evolutivo que está moldando um novo planejamento de infraestrutura, operações de rede, mercados de energia, frameworks regulatórios e modelos de negócios no sistema elétrico conforme o conhecemos (MARTINI & KRISTOV, 2015).

A integração dos recursos de energia renovável (RES) e de armazenamento de energia (EES) no sistema de distribuição são considerados os principais requisitos das redes inteligentes, mas também implicam na necessidade de sistemas inteligentes de medição, monitoramento e comunicação que possibilitem reunir as informações de consumo do sistema de energia, enviá-lo via rede de comunicação sem fio para que os dados sejam gerenciados e analisados possibilitando a tomada de decisão ideal para os consumidores finais. (ATTEYA *et al*, 2017)

A operação do sistema a nível da distribuição possibilita explorar os potenciais de flexibilidade do DERs através de diferentes abordagens. O mecanismo centralizado foi proposto por CECATI *et al* (2011), NGUYEN *et al* (2016) & HU *et al* (2016).

CECATI e colaboradores (2011) & NGUYEN e colaboradores (2016), propõem em ambos os trabalhos um sistema integrado de gerenciamento da demanda e de geração distribuída no mercado atacadista através da utilização de um sistema de gerenciamento de energia de forma otimizada e centralizada, que visa melhorar a utilização de fontes de energia renováveis e promover a redução dos custos de consumo de energia dos clientes, provendo benefícios econômicos e ambientais.

Neste contexto, o sistema de gerenciamento da demanda se comporta como uma espécie de agregador de recursos energéticos distribuídos, permitindo a participação no mercado aberto. Ao integrar a gestão do lado da demanda e os esquemas de gerenciamento, permite uma melhor exploração das fontes de energia renováveis e uma redução dos custos de consumo de energia dos clientes, com benefícios econômicos e ambientais. Provendo melhora na resiliência e a flexibilidade da rede através da participação ativa de operadores de sistemas de distribuição (DSOs) e fornecimento/demanda de eletricidade que, de acordo com

suas preferências e custos, respondem aos sinais de preços em tempo real usando processos de mercado. (CECATI et al, 2011)

NGUYEN e colaboradores (2016), propõem solucionar o problema de agendamento de energia para a partir de uma entidade de atendimento de carga que atende a dois tipos de cargas: cargas inflexíveis e flexíveis. As cargas inflexíveis são cobradas sob uma tarifa de preços regular, enquanto as cargas flexíveis gozam de uma tarifa dinâmica de preços que garante economia de custos para elas. Além disso, as cargas flexíveis são incrementadas ao sistema através de vários agregadores. A interação entre a entidade de atendimento de carga e seus clientes é formulada como um problema de otimização de onde a entidade é a líder e os agregadores são os seguidores. A solução ideal deste problema corresponde à tarifa de preços ideal para cargas flexíveis. A principal vantagem do modelo proposto pelos autores é que ele pode ser facilmente implementado, graças à sua compatibilidade com as estruturas de preços existentes no mercado varejista. A partir de amplos resultados numéricos, os autores mostram que a abordagem proposta oferece uma solução vantajosa para ambos, entidade de atendimento de carga e seus clientes.

Em contrapartida, outro mecanismo proposto para gerenciar a integração dos DERs ao sistema de distribuição é por meio da utilização de controle a partir de transações (transactive control) proposto por KOK et AL (2005) & SHILTZ *et al* (2016). HAO *et al* (2017) definem o conceito de *transactive control* como uma estratégia de controle distribuído que utiliza mecanismos de mercado para envolver cargas sensíveis para fornecer serviços à rede. A única informação que precisa ser trocada entre as cargas elétricas e o operador do sistema é o preço e a quantidade do consumo desejado de eletricidade e, portanto, respeita a privacidade, preferência e livre arbítrio dos clientes.

Nos estudos de KOK e colaboradores (2005) foi desenvolvido o método de *Transactive Control* (TC) denominado "PowerMatcher" visando equilibrar a oferta e a demanda em redes elétricas. No método PowerMatcher, cada dispositivo é representado por um agente de controle, o *Transactive Agent*, que tenta operar o processo associado ao dispositivo de uma maneira economicamente ótima. O design do PowerMatcher baseia-se na descoberta teórica de que as economias dos agentes de controle local que utilizam um mecanismo de precificação dinâmico são

capazes de lidar com os recursos escassos de maneira adaptável de forma ideal tanto local quanto globalmente. Em um estudo de simulação apresentado pelos autores, o "PowerMatcher" mostrou-se que a simultaneidade da produção e do consumo de eletricidade pode ser aumentada substancialmente com esse conceito. Promovendo a otimização e melhor uso dos recursos.

SHILTZ *et al* (2016) propõem um mecanismo de mercado dinâmico integrado que combina a regulação de frequência com o mercado em tempo real, permitindo que geradores renováveis e consumidores flexíveis negociem iterativamente os preços da eletricidade a nível de mercado atacadista provendo acesso para utilização da informação mais recente para a tomada de decisão, conquistando, conforme as simulações realizadas pelos autores, o objetivo de reduzir o custo das reservas de regulação.

JIM *et al* (2012) desenvolveram um modelo de simulação de rede em larga escala para avaliar as condições de comunicação em TC com os locais de fornecimento, a partir dos sinais de ajuste de carga e feedback do usuário, para realizar o balanceamento entre a oferta e demanda. Foi realizado por meio de protocolo do sistema e mecanismo de controle dinâmico modelos que capturam variação de carga, perdas de sinal estocástico, fadiga do consumidor para demanda e critérios de adesividade nos sinais de controle que surgem de restrições físicas. Os resultados encontrados pelos autores, indicam que o mecanismo de controle foi capaz de realizar adequadamente o ajuste entre oferta e demanda com reduzidas perdas de sinais.

HU *et al* (2016) ressaltam que um dos principais desafios atuais na rede de distribuição residem no aumento do consumo de eletricidade ocasionados pela crescente adoção de veículos elétricos, que leva a uma expansão cara, economicamente falando, para corresponder ao tamanho e ao padrão de demanda. O que pode ser supressado em um contexto de rede inteligente, onde o próprio problema de ultrapassagem de restrições físicas da rede elétrica pode ser resolvido de forma usando estratégias de gerenciamento e controle, tais como o Transactive Control com base na tecnologia de informação e comunicação.

GALVAN *et al* (2016) propõem uma abordagem que utiliza controle transativo (TC) para integração e gerenciamento eficiente de veículos elétricos (EV) com o objetivo de minimizar o custo de carregamento de EVs e mitigar os efeitos adversos

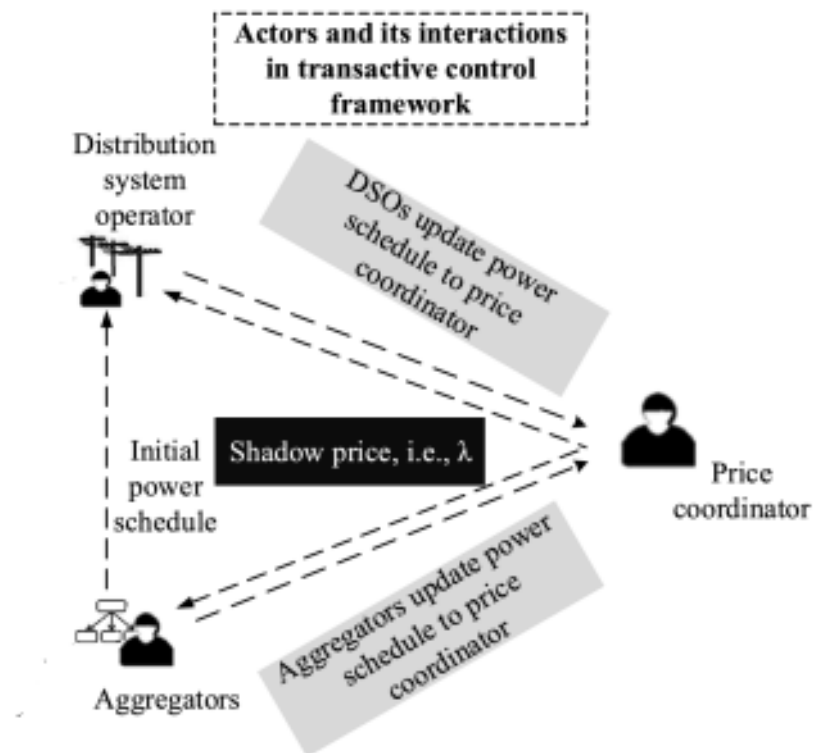
que o carregamento podem apresentar. No modelo proposto o operador do sistema de distribuição (DSO) gera um preço marginal de localização de distribuição que é enviado para a casa de cada cliente. Com base nas suas necessidades os consumidores poderiam determinar suas horas de cobrança de EVs. Após a execução, o consumidor envia as informações de volta ao transformador como um sinal de feedback transacional. Esta informação permite ao DSO recalcular e ajustar o novo padrão de demanda. De modo que para avaliar a eficácia da proposta de abordagem de TE e TC, os autores consideraram um estudo de caso de um transformador localizado em um sistema de teste de alimentação de distribuição de seis barras que demonstraram a capacidade de auxiliar significativamente os proprietários de EV, reduzindo suas contas de eletricidade de 60 a 75 por cento ao cobrar seus EVs de forma eficiente. Além disso, as vantagens da nova técnica proposta são (i) Permitir ao DSO através dos sinais atrasar a necessidade de equipamentos que acarretariam ao crescimento da demanda, e (ii) Reduzir a demanda de carga em equipamentos existentes (por exemplo, transformador), promovendo maior durabilidade ao equipamento.

BEHBOODI et AL (2016) consideraram um modelo em que os EV participam de um mercado de regulação, onde a tarifa é dada com base nos sinais de preço de varejo em tempo real. Os autores propõem que os veículos elétricos adiem seu carregamento e descarga conforme o preço de varejo, a partir de métodos de controle. Sabendo que os preços das reservas de compra e venda são baseados em expectativas de preços futuros e custos de oportunidade da energia vendida e que as restrições de capacidade do alimentador também afetam a formação do preço. Desta forma, à medida que o preço aumenta, a demanda para carregamento de EVs cai, e se a restrição causar novos aumentos de preços, os EVs começam a fornecer energia. Nesta abordagem, os resultados mostram que as estratégias de cobrança de veículos em TC aumentam significativamente a elasticidade da demanda de eletricidade a curto prazo e podem chegar a reduzir os custos de energia do consumidor em mais de 75%.

#### **4.4.1. MODELOS PROPOSTOS**

A Figura 11 a seguir apresenta o sistema de transactive control de rede restrita para integração de recursos energéticos distribuídos. Conforme descreve

YANG *et al* (2017) neste modelo, ignora-se as restrições físicas da rede de distribuição, o que significa que uma situação conflitante pode acontecer, por exemplo, agregadores podem optar por adquirir energia do mercado spot em um período de menor preço, porém podem causar desafios operacionais para as redes de distribuição.



**Figura 11:** Modelo de Transactive Control para integração de DERs

FONTE: YANG *et al* (2017)

No sistema acima é possível verificar as interações ente os atores do mercado, são eles:

- Agregadores

Os agregadores fornecem serviços de energia aos usuários de DER e coordenam com o DSO e coordenador de preços. Desta forma, o agregador possui papel semelhante a um varejista que, em nome dos clientes, adquire a eletricidade no mercado spot de energia. Os agregadores coletam informações dos usuários para fazer um cronograma de energia para DERs que será compartilhado com o DSO (YANG *et al*, 2017).

- Operador de sistema de distribuição (DSO)

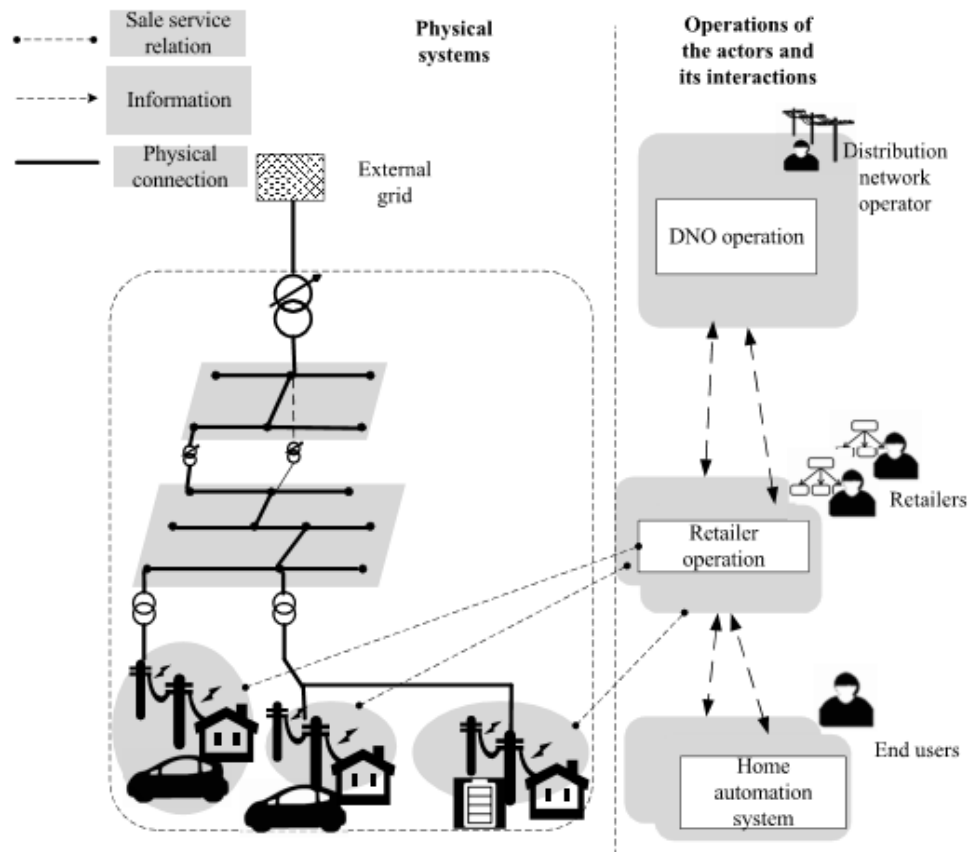
O operador do sistema de distribuição, é uma organização sem fins lucrativos que tem por principal função garantir o funcionamento seguro da rede de distribuição por meio da interação entre os agregadores e coordenadores de preços. Cabendo ao DSO ser informado sobre o cronograma de energia inicial dos agregadores, e realizando o gerenciamento contínuo do cronograma de energia de modo a responder ao preço estabelecido pelo coordenador de preços. (YANG *et al*, 2017).

- Coordenador de preços

O coordenador de preços é uma entidade autorizada para determinar os preços e facilitar as interações entre o DSO e os agregadores para alcançar um consenso de energia em cada barra presente no sistema (YANG *et al*, 2017) acreditam que o coordenador de preços deve ser uma organização sem fins lucrativos, que cobrará certas taxas operacionais aos seus clientes, incluindo DSOs e agregadores para manter sua operação e desenvolvimento.

A Figura 12 apresenta um segundo modelo de sistema de distribuição com utilização de TE aplicado para agendar e operar os DERs. Diferentemente do modelo anterior, neste modelo considera-se as restrições operacionais da rede de distribuição.





**Figura 12:** Visão geral do sistema de distribuição

Fonte: HU et AL (2017)

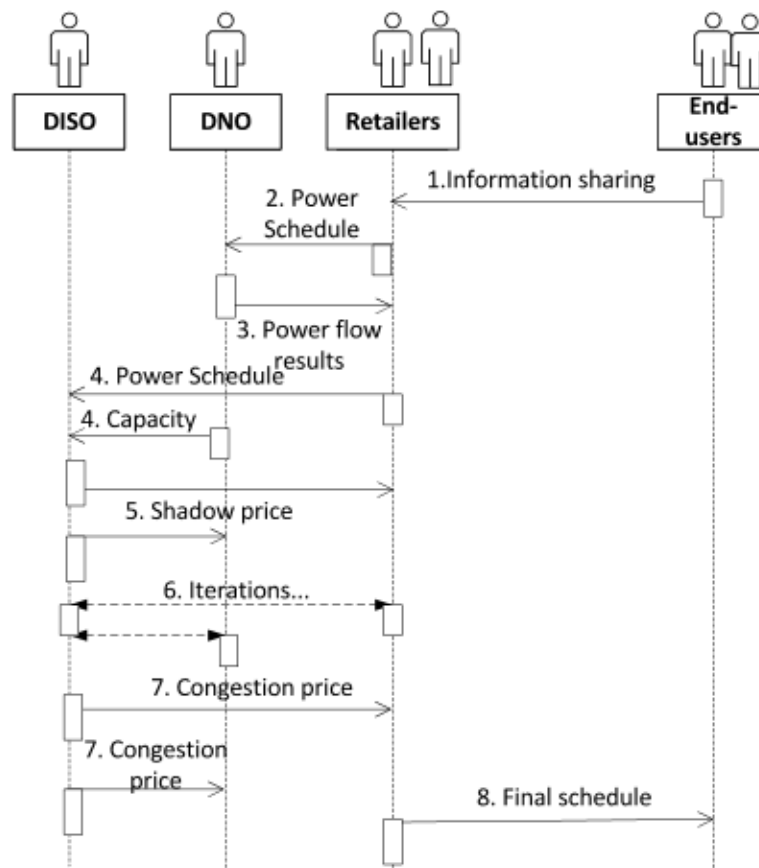
Segundo HU *et al* (2017), neste sistema, presume-se que, além de fornecer serviços de eletricidade para cargas convencionais, os varejistas também gerenciarão veículos elétricos para explorar os benefícios de suas fluições que podem minimizar os custos operacionais. Para integrar os recursos energéticos distribuídos, como os veículos elétricos e as bombas de calor de forma suave na rede de distribuição, são necessárias novas relações de controle para o sistema de distribuição. Os revendedores terão novas necessidades e funções para lidar com essas novas cargas flexíveis. Além disso, os varejistas irão coordenar seus horários e operações com o Operador da Distribuição.

Por sua vez, o Operador independente do sistema de distribuição (DISO), conforme definido por MARTINI & KRISTOV (2015) & HU *et al* (2017) é um conceito ainda não implementado e em discussão que possui papel fundamental no modelo de mercado da distribuição, sendo caracterizado como uma entidade regulada pelo estado e independente, sem qualquer afiliação com os compradores ou vendedores

de energia no atacado ou varejo, ou com os proprietários dos ativos de distribuição física.

O principal objetivo da DISO será planejar a operação do sistema de distribuição integrado, interconectar serviços DER para complementação da operação do sistema de distribuição e promover e facilitar os mercados de energia distribuídos de forma não discriminatória e de acesso aberto que assegure a segurança e a confiabilidade do sistema de distribuição.

Conforme mostrado na Figura 13, além do DNO, varejistas e usuários finais, um novo ator chamado operador independente do sistema de distribuição (DISO) é proposto com objetivo de coordenar DNO e os interesses dos varejistas e os conflitos operacionais



**Figura 13:**Diagrama da operação do sistema de distribuição utilizando TE

Fonte: HU *et al* (2017)

HU *et al* (2017) descrevem o fluxo da seguinte forma: Os usuários finais irão compartilhar suas informações de demanda com os varejistas, tais como, o padrão

de carregamento de veículos elétricos, a temperatura de conforto da casa, entre outros. Em seguida, os varejistas farão uma programação diária com base nos requisitos de energia dos usuários finais e do preço previsto no mercado spot. Esses cronogramas de Day-ahead serão compartilhados com o DNO, que após receber o cronograma inicial de cada revendedor, executará primeiro um cálculo de fluxo de potência para avaliar as condições de operação da rede, caso a operação ocorra dentro de um limite de segurança, o cronograma será aceito pelo DNO; Caso contrário, o DNO e os varejistas irão coordenar com o DISO para resolver a falta de correspondência. Nesta interação, os varejistas podem enviar o mesmo cronograma inicial para o DISO, e o DNO informará a capacidade permitida para o DISO. Depois de receber as informações do DNO e do varejista, o DISO usará o preço para coordenar os interesses operacionais e as restrições do DNO e dos varejistas. No último passo da coordenação, o preço do congestionamento será emitido para o DNO e os varejistas, o que também implica que o poder final é consentido entre o DNO e os varejistas. E por fim, as informações com o agendamento final serão enviadas aos usuários finais.

#### **4.4.2. SERVIÇOS ANCILARES**

A Comissão Federal de Regulamentação da Energia dos Estados Unidos (FERC) define os serviços auxiliares como aqueles serviços "necessários para suportar a transmissão de energia elétrica do vendedor ao comprador, de modo a manter as operações confiáveis do sistema interligado de transmissão".

HLEDIK & LAZAR (2016) ressaltam que embora a definição da FERC esteja relacionada ao sistema de transmissão interestadual, e não ao sistema de distribuição local, em termos funcionais, o mesmo se aplicado sistema de distribuição, embora a necessidade agregada de serviços ancilares no nível de distribuição possa ser mais variada de forma geográfica e temporal do que no nível de transmissão.

CHO & MEYN (2013) acreditam que assim como uma rede convencional de transmissão, um sistema de distribuição com elevada participação de DERs têm sua demanda e o fornecimento de energia elétrica sujeita a mudanças repentinas e inesperadas devido a condições climáticas locais, falhas do equipamento ou interrupções da geração. Por conseguinte, deve tornar-se prática comum para o

operador do sistema manter uma quantidade substancial de capacidade de produção de reserva para atender às flutuações que podem a vir ocorrer na demanda. Essas fontes secundárias de energia são conhecidas, conforme definição, como serviços ancilares.

TRAN-QUOC *et al* (2008) concluíram, a partir de um estudo de caso baseado em uma rede real presente em um cenário futuro com uma alta parcela de DERse com aumento do consumo, que apesar do crescimento de carga superior à capacidade das subestações, a rede foi capaz de manter a operação com alta segurança de fornecimento, graças a presença de DER controláveis capazes de operar em um modo insular e de fornecer controle de tensão e gerenciamento de congestionamentos como serviços auxiliares.

RAUTIANEN e colaboradores (2013) também discorrem sobre as possibilidades da utilização de DERs, mais especificamente de veículos elétricos, para produzir serviços auxiliares para redes de distribuição. Os autores acreditam que a baixa presença de EV ainda é fator limitante para uso em todos os tipos de serviços auxiliares, mas que as perspectivas de aumento de EV no mercado, podem tornar seu uso como serviços auxiliares economicamente atraentes. No entanto, os modelos de mercado em funcionamento devem ser modificados proporcionando aos proprietários dos veículos e outros recursos controláveis incentivos econômicos suficientemente altos para participar do mercado de serviços auxiliares.

KNEZOVÍČ *et al* (2017) provaram a viabilidade técnica de utilizar EV de maneira a proporcionar flexibilidade em redes de distribuição reais. A partir da utilização de um controlador de carga inteligente, foi realizada uma validação em uma rede de distribuição Dinamarquesa com um Nissan Leaf.

Com o objetivo de otimizar a aplicação de serviços ancilares, KHORDKHEILI *et al* (2014) propõem um método de otimização baseado em algoritmo genético que visa determinar o número de DERs, no caso específico da utilização de painéis fotovoltaicos (PV), além de determinar a disposição ótima na rede para maximizar o serviço auxiliar, sem violar os limites da operação da rede. O método proposto foi implementado em um modelo de uma parte de uma rede de distribuição Dinamarquesa para verificar sua eficácia e os resultados da simulação demonstraram a viabilidade do método, mantendo os requisitos da rede dentro dos limites operacionais padrão.

## Capítulo 5

### 5 CONCLUSÕES

As preocupações crescentes com sustentabilidade têm incentivado a geração de energia a partir de fontes com menor impacto ambiental e a utilização de equipamentos de uso final mais eficientes. A transição dos sistemas elétricos tradicionais para redes inteligentes vem se tornando a solução para adaptar o mercado a crescente utilização de fontes renováveis e geração distribuída, que cada vez mais farão parte do sistema elétrico.

Os benefícios potenciais presentes na flexibilização da operação para atender a presença de recursos energéticos distribuídos, propicia atender a um conjunto crescente de requisitos dos sistemas de energia modernos, tornando-os mais seguros, eficientes e confiáveis. Os conceitos provenientes de Transactive energy englobam sistemas cuja operação do sistema elétrico beneficie tanto objetivos individuais e tanto compartilhados de todos os envolvidos.

Uma transição do sistema de energia elétrica atual para Transactive Energy no nível de distribuição, será o principal desafio dos anos subsequentes. Os resultados dos casos de implementação bem sucedidos demonstram a necessidade de criação de novas diretrizes pelos tomadores de decisões empresariais e políticas, de modo a viabilizar novos mecanismos e metodologias de recuperação de receitas/investimentos econômica que tornem TE um investimento válido e vantajoso.

Além disso, o mercado econômico precisa estar preparado para suportar o recebimento de novos fornecedores que possam fornecer produtos e serviços que serão aplicados a TE, como plataformas operacionais, sistema e dispositivos mais inteligentes e sistemas de automação e controle que possibilitem operar o sistema conforme as expectativas.

Além de significativas modificações no mercado de energia que englobe o desenvolvimento de novas estruturas de mercado para fazer face à variabilidade dos recursos renováveis de grande escala e o surgimento de mercados operando em escalas de tempo cada vez mais curtas e o surgimento do Operador do Sistema de

Distribuição (DSO) cuja responsabilidade é equilibrar as variações da oferta e da procura a nível da distribuição e de ligar os agentes do mercado atacadista e varejista. Alterações que proporcionam impacto tanto na economia dos sistemas de energia elétrica como no controle de ambos os sistemas de energia e os usos finais da eletricidade.

## 6 REFERÊNCIAS

ABRACEL – Associação Brasileira de Comercializadores de Energia: Cartilha Mercado livre de energia, disponível em <[http://www.abraceel.com.br/archives/files/Abraceel\\_Cartilha\\_MercadoLivre\\_V9.pdf](http://www.abraceel.com.br/archives/files/Abraceel_Cartilha_MercadoLivre_V9.pdf)>. Último acesso 21 de fevereiro de 2017.

AMBROSIO, R. “*Transactive Energy Systems*”. *IEEE Electrification Magazine*, v.3, n.1, Dezembro, 2016.

ANEEL - Agencia Nacional de Energia Elétrica, nota técnica disponível em <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2012482.pdf>>, ultimo acesso dia 14 de fevereiro de 2017.

ATTEYA, I.I., ASHOUR, H.A, FAHMI, N., STRICKLAND, D. *Distribution network reconfiguration in smart grid system using modified particle swarm optimization*. IEEE - Renewable energy and applications, v.2, n.1, junho de 2017.

BANDEIRA, F.P.M., Redes de energia elétrica inteligentes – smart grids (2012). Biblioteca digital da câmara dos deputados, disponível em <<http://bd.camara.gov.br>>, último acesso em 20 de maio de 2017.

BEHBOODI, S., CHASSIN, D.P., CRAWFORD, C., DJILALI, N. Electric Vehicle Participation in Transactive Power Systems Using Real-Time Retail Prices. Hawaii International Conference, 2016.

BELLINI, Edgar X. Plataforma de Simulação de Leilão em Mercados Competitivos de eletricidade. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2015. p.44-48

CARRIJO, A.S, LOTERO, R.C. Comprando a realidade brasileira com desenvolvimento de smart grids em sistemas de distribuição nos Estados Unidos e na Europa, Universidade Federal de Itajubá. Itajubá, 2012. p.88-87.

CARNEIRO, M. C. F. Os Leilões de Longo Prazo do Novo Mercado Elétrico Brasileiro. Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006. p.30-34.

CAZALET, E. DE MARTINI, P. PRICE, J. WOYCHIK, E. CALDWELL, J. Transactive Energy Models - Business and Regulatory Models Working Group, 2016.

CECATI, C., CITRO, C., SIANO, P "Combined operations of renewable energy systems and responsive demand in a smart grid", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, v.5, n.1, 2011.

CEMIG – COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS S.A.: Visão geral do setor elétrico brasileiro, disponível em: <ri.cemig.com.br/modulos/doc.asp?arquivo=00245050.WAN&doc=ian370>, último acesso dia 20 de fevereiro de 2017

CHAO, H. New England ISO Market Monitor, "Price Responsive Demand Management for a Smart Grid World", *The Electricity Journal*, v.23, n.1, fevereiro de 2010.

CHEN P., CHENG S., CHEN K., "Smart Attacks in Smart Grid Communication Networks", *IEEE Communications Magazine*, v.50, n.8, Agosto de 2012, p 24 -29.

CHIA, I.M.C., CORREIA,V.T. Interface e gestão ativa de consumo de energia elétrica para smart grids, Universidade Federal do Paraná, 2011.

CHO, I.K., MEYN, S.P. Dynamics of ancillary service prices in power distribution systems. *IEEE -Decision and Control*, v.3, n.3, 2003

COELCE – COMPANHIA ENERGÉTICA DO CEARÁ. Visão geral do setor elétrico brasileiro, disponível em: <http://ri.coelce.com.br/arquivos/Coelce\_visao\_geral\_setor\_eletrico\_brasileiro.pdf>, último acesso dia 20 de fevereiro de 2017

COGEN –Associação da indústria de cogeração de energia: Geração distribuída – novo ciclo de desenvolvimento. Disponível em: <http://www.cogen.com.br/workshop/2013/Geracao\_Distribuida\_Calabro\_22052013.pdf>, Último acesso em 10 de abril de 2017.



CORREIA, P. B. LANZOTTI, C. R. & SILVA, A. J. S. Teoria dos leilões: Formulações e aplicações no setor elétrico, II Congresso de inovação tecnológica de energia elétrica, 2016.

DIAS, M. V. X. Geração distribuída no Brasil: Oportunidades e Barreiras. Universidade Federal de Itajubá. Itajuba, 2005.

ETHIER, R. ZIMMERMAN, R. MOUNT, T. SCHULZE, W. & THOMAS, R. *A uniform price auction with locational price adjustments for competitive electricity markets*. Electrical Power and Energy Systems v.21, 1996. p103–110.

FALCÃO, D.M. "Integração de tecnologias para viabilização de smart grids", Anais do SBSE, Rio de Janeiro RJ, agosto de 2010. p.9-14.

FALCÃO, D.M. "Smart Grids e microredes: O futuro já presente." Anais do SIMPASE, Rio de Janeiro, 2010.

FAQIRY, M. N. DAS, S. Double Sided Energy Auction: Equilibrium Under Price Anticipation. Electrical & Computer Engineering Department Kansas State University, 2016.

FELDMAN, R.A. MEHRA, R. Leilões: Algumas técnicas. Revista Finanças e desenvolvimento, Pontífice Universidade Católica, São Paulo, 1993.

FORFIA, D. KNIGHT, M. MELTON, R. *The View from the Top of the Mountain - Building a Community of Practice with the GridWise Transactive Energy Framework*, IEEE Power Energy Magazine, v.1, n.4, 2016.

GALVAN, E., MANDAL, P., VELEZ-REYES, M., KAMALASADAM, S. Transactive Control Mechanism for Efficient Management of EVs Charging in Transactive Energy Environment. IEEE Power Energy Magazine, 2016.

GELLINGS, C.W.; CHAMBERLIN, J.H. "Demand-Side Management, p. Concepts and Methods", Oklahoma, p. PennWell Publishing Company, 1993.

GONÇALVES, J. L. P. Modelos para a Comercialização de Energia Elétrica em Ambiente de Mercado, Coimbra, 2013.

GREEN, R. Electricity and Markets , Oxford Review of Economic and Policy, v.21, n.01, 2005.

GRID WISE ARCHITECTURE COUNCIL: The GridWiseTransactiveEnergy Frameworkis, 2015. <[http://www.gridwiseac.org/pdfs/te\\_framework\\_report\\_pnnl-22946.pdf](http://www.gridwiseac.org/pdfs/te_framework_report_pnnl-22946.pdf)> Último acesso 21 de fevereiro de 2016.

HAMMERSTROM, DJ, “Standardization of a Hierarchical Transactive Control System”, in the Proceedings of Grid-Interop, Denver, 2009. p.35-41.

HAO, H., CORBIN, C.D., KALSI, K., PRATT, R.G. Transactive Control of Commercial Buildings for Demand Response.IEEE Transactions on Power Systems v.32, n.1, janeiro, 2017.

HLEDIK, R.,LAZAR, J. Distribution Systems pricing with distributed energy resources.Future Electric, 2016.

HOLMBERG, D.HARDIN, D. CUNNINGHAM, R. MELTON, R. &WIDERGREN, S. A technical white paper, developed by SGIP’s Transactive Energy Coordination Group.v.01, 2015.

HU, J., YANG, G., XUE, Y. *Economic Assessment of Network-Constrained Transactive Energy forManaging Flexible Demand in Distribution Systems*. Energies, 2017.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, “Technology Roadmap – Smart Grids,” Paris, França, 2011.

JANUZZI, G. M. Políticas públicas para eficiência energéticae energia renovável no novo contexto de mercado: Uma análise da experiência recente dos EUA e Brasil, São Paulo, 2000.

JIM, D., ZHANG, X., GHOSH, S.Simulation models for evaluation of network design and hierarchical transactive control mechanisms in Smart Grids. IEEE, Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2012

JOSKOW,P. L. Competitive electricity markets and investment in new generating capacity, MIT, 2006.

KNEZOVIC, K., MARTINENAS, C., ANDERSEN, P.C., ZECCHINO, P., MARINELLI, M. Enhancing the Role of Electric Vehicles in the Power Grid: Field Validation of Multiple Ancillary Services. *IEEE Transactions on Transportation Electrification* v.3, n.1, 2017.

KESHAV, S., ROSENBERG, C. How internet concepts and technologies can help green and smarten the electrical grid. *ACMSIGCOMM Computer Communication Review*, v. 41. 2011. p.109–114.

KHODAYAR, M.E. MANSHADI, S.D. VAFAMEHR, A. “*The short-term operation of microgrids in a transactive energy architecture*”, *The Electricity Journal*, v.29, n.10, Dezembro de 2016, p.41-48.

KHORDKHEILI, R.A., POURMOUSAVI, S.A., PILLAI, J.R., HASANIEN, H.M., NEHRIR, M.H., Optimal sizing and allocation of residential photovoltaic panels in a distribution network for ancillary services application. *IEEE - Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM)*, 2014.

KIESLING, L. “Smart Policies for a Smart Grid: Enabling a Consumer-Oriented Transactive Network”, Presentation to the Harvard Electricity Policy Group, Fifty-Fourth Plenary Session, março, 2009.

KLEMPERER, P. “*Auction theory: a guide to the literature*”. *Journal of economic surveys*, v.13, 1999. pp. 227-286.

KLEMPERER, P. *Auctions: Theory and Practice*. Princeton – NJ: Princeton University Press, 2004.

KNIGHT, M. MELTON, R. MATER, J. *Transactive Energy in Less than a Thousand Words*, Grid Wise Architecture Council, 2014.

KOK, K., WARMER, C., KAMPHUIS, I., “Powermatcher: Multiagent control in the electricity infrastructure”, *Proc. 4th ACM Int. Joint Conf. Auton. Agents Multiagent Syst.*, 2005. p.75-82,

KOK, K. WIDERGREN, S. *A society of devices*, *IEEE Power Energy Magazine*, 2016.

LAMIN, H. "Análise de impacto regulatório da implantação de redes inteligentes no Brasil". Tese de Doutorado de engenharia elétrica. Universidade de Brasília, 2013

LAUTENSCHLEGER, A. H., Projeção de demanda de energia elétrica da classe residencial considerando a inserção de micro e minigeração fotovoltaica, 2013

LOPES, Y.FRANCO, R.H.F. , MOLANO, D.A., SANTOS, M.A, CALHAU, F.G, BASTOS,C.A.M., MARTINS, J.S.B., FERNANDES, N.C. Smart Grid – Novos desafios em redes de telecomunicações para o sistema elétrico. Anais do XXX Simpósio Brasileiro de telecomunicações, Brasília, setembro de 2012.

MACEDO, M.N.Q, GALO,J.J.M. Oportunidades e desafios do GLD no ambiente smart grid. Anais do congresso REG, 2014.

MAYO, R. Mercados de Eletricidade. Rio de Janeiro: Synergia, 2012.

MAGALHÃES, G.S.C.Comercialização de energia elétrica no ambiente de contratação livre: Uma análise regulatório institucional a partir dos contratos de compra e venda de energia elétrica, Programa de pós-graduação universidade de São Paulo, 2009.

McDANIEL, Patrick; McLAUGHLIN, Stephen.Security and Privacy Challenges in the Smart Grid.In: Secure Systems, maio-junho de 2009.

MENEZES, F.M. Ensaio: entendendo leilões – Revista de Economia sessão Conjuntura econômica, 1998.

NAE – NATIONAL ACADEMY OF ENGINEERING.Disponível em: <<https://www.nae.edu/>>, último acesso em 03 de junho de 2017.

NEVES, L.C.,BAGAROLLI, A. Os desafios da implementação dos projetos-piloto de smart grid no Brasil, Cad. CPqD Tecnologia, Campinas, v. 9, n. 1, janeiro, 2013. p. 15-22.

NGUYEN, D. T., NGUYEN, H. T., LE, L. B. "Dynamic pricing design for demand response integration in power distribution networks", *IEEE Trans. Power Syst.*, v. 31, n. 5, setembro. 2016. p. 3457-3472.

NIST - NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY, “NIST Framework and Roadmap for Smart Grid Interoperability Standards”, Release 2.0, Fevereiro de 2012.

OLADE - ORGANIZACIÓN LATINOAMERICANA DE ENERGÍA. Curso de la Generación Distribuida. SABA System., 2011. Disponível em: <http://www.olade.org/elearning>. Acesso em 15 de abril de 2017.

ONS – OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA, disponível em: [http://www.ons.org.br/institucional\\_linguas/modelo\\_setorial.aspx](http://www.ons.org.br/institucional_linguas/modelo_setorial.aspx) , último acesso 30 de fevereiro de 2017.

PETROV,K. Electricity Markets and Principle Market Design Models, 2010. <<http://leonardo-energy.com/sites/leonardo-energy/files/root/pdf/2010/Electricity%20Markets%20Paper.pdf>>, último acesso 30 de maio de 2017.

PINTO jr, H. ALMEIDA, E.F. BONTEMPO, J.V. IOOTY, M. Economia de Energia – Fundamentos Economicos, evolução histórica e Organização industrial. Rio de Janeiro: Editora Elsevier, v.15,n.4, maio de 2007.

POURBEIK, P.KUNDUR, P.S. &TAYLOR,C.W. “The Anatomy of a Power Grid Blackout”, IEEE Power and Energy Magazine, v. 4, n. 5, outubro de 2006. p. 22-29.

RAHIMI, F. IPAKCHI, A. FLETCHER, F.The changing electrical landscape, IEEE Power Energy Magazine, , v. 12, n. 3, novembro de 2016.

RAHIMI, F. A. IPAKCHI, A. “*Transactive Energy Techniques: Closing the Gap between Wholesale and Retail Markets*”, The Electricity Journal, v.25, n.8, Outubro de 2012, p. 29-35,

RAUTIAINEN, A.; MARKKULA, J.; REPO, S.; KULMALA, A.; JARVENTAUTA, P.; VUORILEHTO, K. Plug-in vehicle ancillary services for a distribution network. Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER), 2013.

RIBEIRO, C.S. Aspectos institucionais para Smart Grids no Brasil: riscos, oportunidades e desafios regulatórios. Universidade de Brasília, 2012.

SARAIVA, J.P.T., J.L.P.P.d.SILVA, and M.T.P.d. LEÃO, Mercados de electricidade regulação e tarifação de uso das redes. Coleção Manuais. 2002. p.-293 .

SILVA, C. V. Contratação de Energia Elétrica: Aspectos Regulatórios e Econômicos, Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL SGAN Q603 Módulos "I" e "J", 2012.

SHEBLE, G. B. Computational Auction Mechanisms for Restructured Power Industry Operation. Massachusetts, USA: Kluwer Academic Publishers, 1999.

SHILTZ, D. J., CVETKOVI, M., ANNASWAMY, A. M. "An integrated dynamic market mechanism for real-time markets and frequency regulation", *IEEE Trans. Sustain. Energy*, v.7, n. 2, abril de 2016. p. 875-885.

TOLEDO, F. Desvendando as redes elétricas inteligentes/ Coordenação geral Fábio Toledo – Rio de Janeiro, 2012.

TRAN-QUOC, T., BRAUN, M., MARTI, J., KIENY, C.H., HADJSAID, N., BACHA, S. Using Control Capabilities of DER to Participate in Distribution System Operation. *IEEE - Power Tech*, 2007

VICHI, F. M. MANSUR, M. T. C. Energia, meio ambiente e economia: O Brasil no contexto mundial, 2009

VIEIRA, Luciana Alves; BARROS FILHO, Mauro Normando Macêdo. A emergência do conceito de Arquitetura Sustentável e os métodos de avaliação do desempenho ambiental de edificações. *Humanae*, v.1, n.3, p. 1-26, Dez. 2009.

WOLFSTETTER, E. Topics in Microeconomics. Industrial Organization, Auctions, and Incentives. Cambridge University Press, 1999.

YANG, G. et AL. *Application of Network-Constrained Transactive Control to Electric Vehicle Charging for Secure Grid Operation*. *IEEE Trans. Sustain. Energy*, v. 8, n. 2, abril de 2017. p. 505-515.