

INCENTIVANDO O CONSUMO DE ENERGIA LIMPA COM PRECIFICAÇÃO DINÂMICA

Italo Cruz de Brito
Leonardo Costa Ribeiro
Luci Pirmez
Luiz Fernando Rust da Costa Carmo

Universidade Federal do Rio de Janeiro

RESUMO

Smart Grids são redes inteligentes de transmissão e distribuição de energia que habilitam uma comunicação de duas vias entre o consumidor e o distribuidor. *Smart Grids* são importantes para a sustentabilidade da energia e preservação do meio-ambiente evitando o consumo de energias não limpas, uma vez que fornecedores descentralizados estarão disponíveis para fornecer a demanda de energia por meio de energia limpa. Será possível incentivar o consumo de energia limpa utilizando um modelo de precificação dinâmica que estabelece diferentes preços para cada fonte de energia. A idéia principal é incentivar o consumo de energia limpa em horários de grande capacidade de geração de energia limpa. Foi analisado o impacto que uma precificação dinâmica teria na mudança do consumidor e na geração de energia.

Palavras-chave: Smart Grid, Energia Limpa, Precificação Dinâmica, Resposta à Demanda.

ABSTRACT

Smart Grids are smart networks of energy transmission and distribution that enable a two-way communication between the consumer and distributor. Smart Grids are important for energy sustainability and environmental preservation avoiding the non-clean energy consumption since decentralized suppliers are able to supply energy demands through clean energy. It will be possible to encourage clean energy consumption using a dynamic pricing model that establishes different prices to each energy source. The main idea is to encourage the clean energy consumption at a time of great capacity of clean energy generation. The impact of a dynamic pricing on consumption changes and energy generation was analyzed.

Keywords: Smart Grid, Clean Energy, Dynamic Pricing, Demand Response.

1. INTRODUÇÃO

Smart Grid é uma tecnologia promissora que irá modernizar a atual rede elétrica. Uma das suas maiores vantagens é prover energia renovável, também chamada energia verde, de forma distribuída. Há muitas fontes de energias renováveis como vento, sol, hidráulica, raio, corrente marítima, ondas, etc. *Smart Grid* ajudará a prover a crescente demanda de energia, e tornará possível evitar o consumo de energias não desejadas. Algumas fontes de energia que podem ser evitadas são as energias nucleares e oriundas de combustíveis fósseis, que podem causar danos ao meio-ambiente.

Uma comunicação de duas vias entre o consumidor e o distribuidor é uma poderosa ferramenta que pode ser usada para reduzir o uso de energia não limpa e também os danos ao meio-ambiente. Os medidores inteligentes, que são dispositivos inteligentes conectados a uma rede que medem o consumo e a geração de energia, podem enviar suas informações a um concentrador de dados (CD) em um curto tempo para calcular o consumo e a geração em tempo real. O CD é um nó da rede que armazena todas as informações sobre uma rede de distribuição. O CD pode calcular o preço da energia baseado no consumo e na geração total de uma rede. Essa estratégia de precificação dinâmica, chamada de Precificação em Tempo Real (RTP), pode ser implementada e usada para reduzir o consumo em um horário de pico, e então reduzir os investimentos em capacidade de geração de energia (Borenstein et al, 2002).

Os modelos de precificação dinâmica também podem ser usados para incentivar o consumo de energia em um horário com alta disponibilidade de energia limpa (Boccardo et al, 2013). Um índice de sustentabilidade poderia ser usado para identificar dinamicamente a proporção de cada fonte de energia renovável. Cada medidor inteligente que fornece energia para a rede teria um índice de sustentabilidade a ele associado, e então um CD poderia calcular um índice de sustentabilidade composto em uma rede de distribuição de acordo com cada fonte de energia. A ferramenta proposta usa o índice de sustentabilidade, o consumo em tempo real e as gerações de energias renováveis para calcular o preço. Quanto maior for o índice composto e a geração de energia limpa, menor ficará o preço.

Algumas preocupações surgem com a precificação dinâmica. Por exemplo, o lucro da distribuidora pode variar em cada mês. Outra preocupação é que o cliente pode consumir mais do que o normal, em um horário esporádico em que o preço está muito acima do normal, resultando em pagamentos adicionais. Portanto, é necessária uma estratégia para limitar a conta do cliente e a variação do lucro da distribuidora.

O objetivo deste trabalho é analisar o impacto que uma precificação dinâmica na *Smart Grid* teria em aumentar o consumo de energia limpa. Simulações foram feitas com cenários diferentes e depois foram analisados a variação do preço ao longo do dia, o aumento do consumo em horário fora de pico, a queda do consumo no horário de pico, a variação do lucro de uma distribuidora, entre outros.

2. TRABALHOS RELACIONADOS

Um modelo de precificação dinâmica interessante em uso é o RTP-DA (*Real Time Pricing Day Ahead*). No RTP-DA (Borenstein et al, 2002), o consumidor é provido com uma previsão dos preços por hora para cada hora do dia subsequente. Um esquema de tarifa RTP-DA-2 no estado de Georgia, Estados Unidos, é projetado de maneira que a curva de consumo do consumidor reflete com precisão os padrões médios de consumo. Se o consumidor continuar seguindo seus padrões, a sua conta não terá muito impacto com os preços em tempo real. Se o consumidor estiver hábil a reduzir seu consumo em horários que o preço está alto, poderá receber créditos significantes em sua conta.

Em (Faruqui e Sergici, 2010) é apresentada uma pesquisa de 15 experimentos de resposta do cliente para precificação dinâmica na eletricidade. Também é discutido um modelo para estimar a mudança do consumidor: o *Constant Elasticity of Substitution (CES)*. O CES é uma aplicação usada em centros de precificação de eletricidade para estimar a substituição do consumo.

Uma funcionalidade provida pela *Smart Grid* é o agendamento de utilização da energia (Wang et al, 2011). Os preços podem variar no mercado, então o consumidor pode agendar sua utilização de energia em um horário que o preço está baixo. *Home Area Networks (HAN)* podem ser implantadas para conectar os aparelhos eletrodomésticos em uma casa a um agendador, que ativa cada aparelho no horário apropriado para minimizar os custos de utilização da energia. Exemplos de aparelhos são lavadora e secadora de roupas, ar condicionado, ventilador, luz, e veículos elétricos.

Em (Safdarian et al, 2016) é feito um estudo de caso sobre os benefícios da resposta à demanda, a mudança no perfil de consumo de acordo com os preços da energia que normalmente se atualiza baseado somente na demanda de energia. A demanda no horário de pico pode reduzir potencialmente em até 20% na Finlândia, por exemplo. Foram estudados os impactos da resposta à demanda em 1600 consumidores em Kainuu, Finlândia. Resultados mostraram que apenas 10% do potencial de resposta à demanda melhoraria o pico de carga do sistema, perdas da rede e confiabilidade do serviço em 5,6%, 1,3% e 1,7%, respectivamente. O impacto potencial de cada aparelho eletrodoméstico que pode ser agendado também foi analisado, e quase todo

o benefício da resposta à demanda pode ser alcançado por sistemas de ventilação e aquecimento.

Uma revisão sobre previsão de carga, precificação dinâmica e *demand side response (DSM)* foi feita em (Khan et al, 2016). DSM é um abordagem para planejamento, implementação e monitoramento do consumo de energia durante os horários de pico. Alguns esquemas de precificação dinâmica discutidos são *Time of Use (ToU)*, *Critical Peak Pricing (CPP)* e *Real Time Pricing (RTP)*. ToU diferencia os preços em horário de pico e fora do horário de pico. CPP é uma modificação do ToU, o preço é diferente em alguns dias do ano quando o consumo no horário do pico é muito alto comparado ao horário de pico durante o resto do ano. Por último, o RTP pode ser dividido em dois tipos: a precificação por hora e a precificação do próximo dia. A primeira só poderá ser alcançada com uma rede de comunicação com um bom desempenho, já que é um esquema que calcula o preço da energia em tempo real. A segunda já foi discutida no esquema RTP-DA. As técnicas de previsão de carga consistem em modelos baseados em estatística ou inteligência artificial com a finalidade de prever os requerimentos futuros do sistema de energia.

3. METODOLOGIA

Neste trabalho, simulou-se apenas a geração de energia eólica, solar e hidroelétrica. Espera-se evitar o consumo de energia hidroelétrica por entender que podem causar mais danos ao meio-ambiente. Segundo o ranking de sustentabilidade em (Evans et al, 2009), a energia hidroelétrica ganha nos indicadores de preço, disponibilidade e limitações, e eficiência, entretanto, perde em uso da terra, consumo de água e impactos sociais.

Os dados da curva de velocidade do vento foram obtidos de Pernambuco (Lima et al, 2010). A velocidade do vento anual média mensal e a curva diária média horária foram obtidas da região de Monteiro. A curva de potência de energia de uma turbina eólica foi obtida em Petry e Mattuella, 2007. Então a curva de geração de energia eólica diária foi estimada usando a curva diária média horária da velocidade do vento combinada com a curva de potência de energia da turbina. Por último, um fator multiplicativo foi criado usando a velocidade do vento anual média mensal para aumentar ou diminuir a curva de acordo com a capacidade de geração de cada mês. Assumindo P_{MAX} como o mês de maior capacidade de geração eólica, P_M como o mês desejado a simular, P_W como a capacidade máxima de geração desejada e P_H como a capacidade de geração em cada hora, o fator multiplicativo F é dado por

$$F = \frac{\left(\frac{PM}{PMAX}\right) * PW}{\sum_{i=1}^{24} PHi}$$

e então a capacidade de geração de cada hora é dada por $PH = F * PH$. Como resultado, é obtida a curva da capacidade diária de energia eólica para cada mês.

A irradiação solar difusa anisotrópica da cidade de Botucatu em São Paulo foi obtida em Pai e Escobedo, 2006. Foi utilizada uma eficiência de 22% da irradiação solar para a capacidade de geração de energia, para então estimar a curva de geração de energia solar diária média horária. E um fator multiplicativo foi criado usando a curva de irradiação solar anual média mensal para obter a curva de capacidade de geração de energia solar diária para cada mês. A mesma equação usada na estimativa da curva de geração de energia eólica foi utilizada para a geração de energia solar.

A curva de consumo diária e seu desvio padrão foram obtidos em Francisquini, 2006, para consumidores residenciais com consumo mensal entre 100 e 200 kWh na cidade de São Paulo. Um fator multiplicativo também foi usado para ajustar a curva de consumo de uma rede de distribuição ao consumo mensal desejado. Assumindo que CH seria o consumo de energia em cada hora, e CD o consumo mensal desejado, o fator multiplicativo FC é dado por

$$FC = CD / \sum_{i=1}^{24} CHi$$

e depois o consumo de energia em cada hora é calculado por $CH = FC * CH$.

A Figura 1 mostra as curvas estimadas em um cenário com 49 MW de consumo mensal e capacidade total de geração de energia limpa (eólica e solar) de 50% da demanda em uma rede de distribuição no mês de novembro, mês de maior velocidade do vento e irradiação solar. Neste cenário, a demanda restante de energia é provida por usinas hidroelétricas, e sua curva de geração calculada pela diferença entre o consumo total e a geração de energia limpa. Como pode ser observado, nesse cenário existem alguns horários em que há bastante capacidade de geração de energia limpa e um consumo relativamente pequeno. Assumindo que não existem bancos de energia suficientes para armazenar uma possível sobra de energia, a capacidade máxima de geração de energia limpa poderia não ser usada. Espera-se reduzir o consumo no horário de pico e aumentar o consumo em um horário fora do pico com grande capacidade de geração de energia limpa.

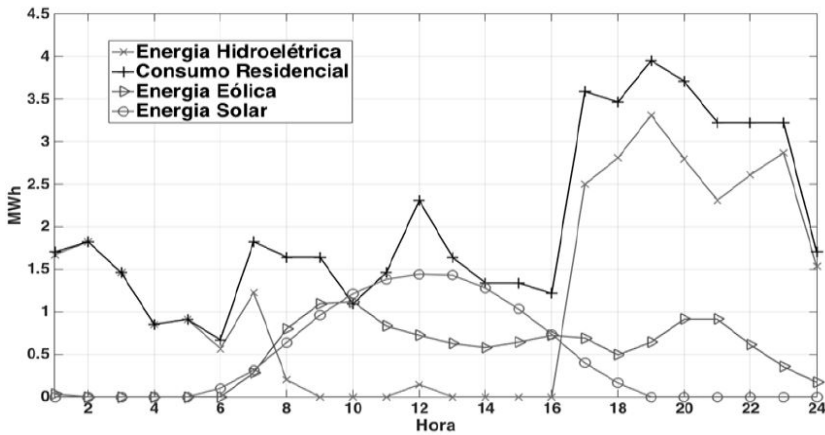


Figura 1 – Curvas de consumo e das capacidades de geração de energia em novembro

Os preços das energias limpas foram simulados variando entre 0% e 100% do original, e o preço da energia hidroelétrica variando entre 100% e 250%. As mudanças no comportamento do consumidor foram estimadas utilizando o modelo CES, logo após, calculado o preço final da energia a cada hora do dia. Então nós comparamos o consumo original com o consumo modificado pelo novo preço selecionado na precificação dinâmica.

Existe uma preocupação em reduzir o consumo no horário de pico para estabilizar a curva de consumo, possibilitando assim uma redução nos investimentos em ampliação da capacidade de geração de energia. Foi garantido que após o novo preço, a nova geração de energia hidroelétrica no horário fora do pico (entre 8 e 16 horas) não ultrapasse a geração de energia hidroelétrica anterior no horário de pico em cada mês.

O lucro da distribuidora pode aumentar ou diminuir de acordo com os preços selecionados. É necessário que a distribuidora tenha um lucro estável, então o preço das diferentes fontes de energia é selecionado de modo que a variação do lucro da distribuidora seja minimizada e a redução do consumo no horário de pico seja maximizada. Outra preocupação é a conta do consumidor. O cliente pode consumir mais do que o normal em um horário esporádico em que o preço está muito acima do normal resultando em pagamentos adicionais. Uma estratégia pode ser usada verificando cada curva de consumo individual dos consumidores como no RTP-DA-2 (Borenstein et al, 2002). Essa estratégia será melhor estudada em um trabalho futuro.

4. RESULTADOS

Um objetivo comum ao usar precificação dinâmica é para estabilizar a curva de consumo, adotando preços adequados para reduzir os investimentos na capacidade de geração de energia. Para escolher um preço adequado, é necessário balancear os preços da energia limpa e hidroelétrica para manter um lucro estável da distribuidora. O preço da energia limpa não pode ser muito baixo, pois como o consumidor poderá agendar o uso de energia para reduzir gastos, pode-se aumentar o consumo além do desejado em um horário fora do pico. O objetivo não é trocar de horário quase toda a demanda de energia, apenas incentivar o consumo de energia em um horário com grande capacidade de geração de energia limpa.

Cada mês, ou talvez cada estação, deve possuir um preço diferente para cada fonte para alcançar a máxima redução do consumo no horário de pico e incentivar o consumo em um horário fora do pico, uma vez que cada mês ou estação possuem capacidades de geração de energia limpa diferentes, de acordo com a velocidade do vento, irradiação solar, corrente marítma e etc.

Para a simulação do cenário, utilizou-se o consumo mensal de 49 MW, obtido a partir de um alimentador de distribuição da cidade de São Paulo. Foram selecionados preços adequados para trocar a demanda de consumo no horário de pico para um horário com grande geração de energia limpa, mantendo o lucro da distribuidora estável. Foram adotados dois preços diferentes: um para a energia limpa e um para a energia hidroelétrica. A Figura 2 mostra os preços por hora em novembro para capacidades de geração de energia limpa (solar e eólica) de 30%, 50% e 80% da demanda. Note que entre 0 e 7 horas o preço final da energia permaneceu maior que o original. Embora o consumo seja pequeno nesses horários, não existe uma boa capacidade de geração de energia limpa para suprir essa demanda, e quase todo o consumo é provido por energia hidroelétrica, cujo preço estaria maior. Entre 8 e 16 horas o preço diminuiu significativamente, pois a maior parte da energia provida é oriunda de fontes limpas.

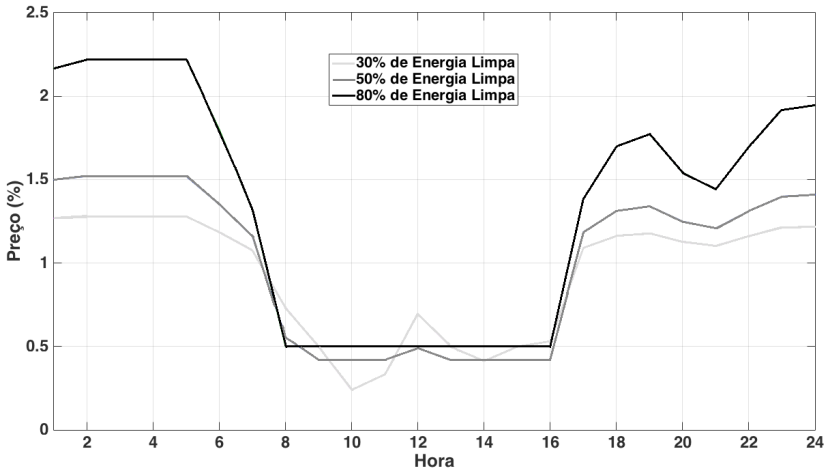


Figura 2 – Preços (%) em novembro para 30%, 50% e 80% de geração de energia limpa

A Tabela 1 apresenta os preços adequados para a energia limpa e a hidroelétrica em cada mês quando a geração de energia limpa corresponde entre 30% a 80% da demanda total de energia. Como pode ser observado, quanto maior for a capacidade de geração de energia limpa, maiores ficariam os preços para manter o mesmo lucro da distribuidora e incentivar mais o consumo no horário fora do pico.

Tabela 1 – Preços (%) adequados para as fontes de energia limpa e hidroelétrica

Mês	Energia Hidroelétrica						Energia Limpa					
	30%	40%	50%	60%	70%	80%	30%	40%	50%	60%	70%	80%
Jan.	120	130	136	153	153	170	25	29	35	37	47	47
Fev.	120	126	135	140	147	158	15	24	31	35	44	46
Mar.	122	128	134	145	151	165	20	29	33	38	44	43
Abr.	122	126	136	140	155	171	24	30	32	43	43	42
Mai.	122	125	129	137	143	148	4	25	31	34	35	45
Jun.	118	122	129	134	143	142	0	25	28	34	36	42
Jul.	122	124	134	142	145	157	13	24	31	36	42	46
Ago.	123	126	133	144	148	165	20	26	34	35	45	45
Set.	122	130	141	150	155	177	25	32	36	41	46	47
Out.	127	137	151	163	189	220	24	35	40	48	49	50
Nov.	128	142	152	167	194	222	24	37	42	49	50	50
Dez.	127	137	148	152	171	192	25	32	36	48	48	48

As Figuras 3, 4 e 5 apresentam os consumos de energia originais e novos, com suas gerações de energia em novembro. Pode-se observar que há desperdício de energia limpa em alguns momentos, e quanto mais capacidade de geração de energia limpa o cenário possuir, mais desperdício de energia limpa pode ocorrer. Os resultados apontaram que o consumo diminuiu 6,87 MW, 8,2 MW e 7,4 MW no horário de pico e o consumo de energia limpa aumentou 0,3 MW, 3,81 MW e 11,61 MW para os cenários com 30%, 50% e 80% de geração de energia limpa em novembro, respectivamente. Os novos consumos utilizam quase toda a geração de energia limpa e também reduzem a geração de energia hidroelétrica no horário de pico.

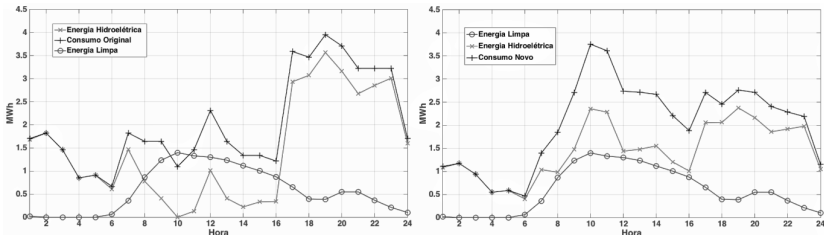


Figura 3 – Consumo original e novo com suas gerações para 30% de geração de energia limpa

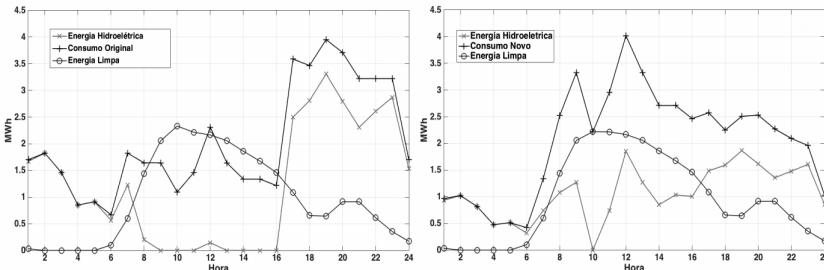


Figura 4 – Consumo original e novo com suas gerações para 50% de geração de energia limpa

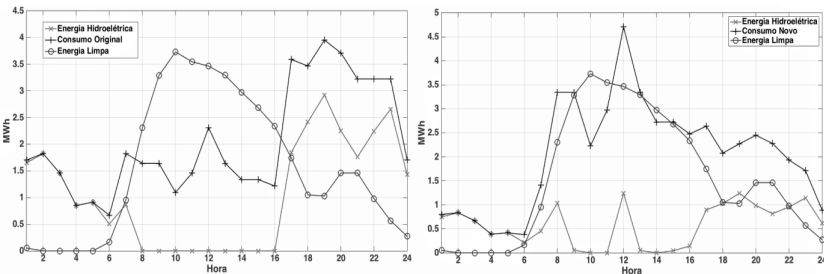


Figura 5 - Consumo original e novo com suas gerações para 80% de geração de energia limpa

A redução do consumo no horário de pico é diferente para cada mês. Isto se dá pelo fato de cada mês possuir uma capacidade diferente de geração de energia limpa. Quanto mais capacidade de geração de energia limpa o mês possuir, mais baixo ficará o preço da energia no horário de pico. O consumo diminuirá mais no horário de pico e aumentará mais fora do pico. A Figura 6 mostra a redução do consumo no horário de pico e o aumento de consumo de energia limpa para os cenários com 30%, 50% e 80% da energia consumida, sendo provida por energia limpa usando os preços adequados da Tabela 1. Pode-se notar que nos meses de outubro e novembro, o consumo de energia limpa aumentou mais, devido a maior capacidade de geração de energia limpa.

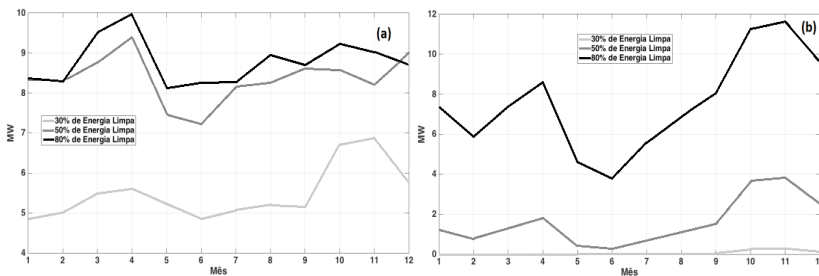


Figura 6 – a) Redução do consumo no horário de pico. b) Aumento do consumo de energia limpa

Como o preço varia cada mês e o consumo muda, o lucro da distribuidora pode variar. A Figura 8 mostra o lucro da distribuidora ao longo do ano ao utilizar os preços selecionados da Tabela 1 no cenário com 50% de geração de energia limpa. É possível observar que o lucro permaneceu próximo do original ao longo do ano. Caso seja usada uma estratégia para limitar a conta do cliente, o lucro da distribuidora pode mudar.

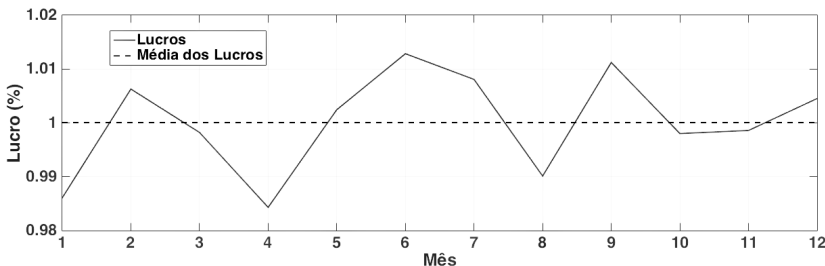


Figura 8 – Lucro da distribuidora (%)

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Pode-se concluir que é possível usar a precificação em tempo real no contexto de *Smart Grids* para evitar o consumo de energia suja e incentivar o consumo de energia limpa, como por exemplo, a eólica e solar. O consumo de energia que aconteceria normalmente em um horário de pico, foi deslocado para um horário com mais capacidade de geração de energia limpa devido a diferença de preços. Os preços mudarão sazonalmente para maximizar o uso de energia limpa e manter um lucro estável da distribuidora. Resultados mostraram que, para um cenário com 49 MW de consumo mensal, e com 30%, 50% e 80% da geração de energia sendo providos por energia limpa, apenas no mês de novembro, foi possível aumentar o consumo de energia limpa em 0,3 MW, 3,81 MW e 11,61 MW e reduzir o consumo no horário de pico em 6,87 MW, 8,2 MW e 7,4 MW, respectivamente.

Um grande desafio para o cálculo do preço da energia é garantir um nível de segurança exigido sem perda de desempenho na velocidade da comunicação entre os dispositivos da rede. Uma rede de comunicações com diferentes cenários e diferentes tecnologias será simulada para verificar o tempo necessário para o cálculo do preço em cada cenário, desde o envio das informações de cada medidor até o nó central que calculará o preço. Com a simulação de cada medidor individual, também será possível estudar estratégias para evitar que algum cliente tenha sua conta com pagamentos extras sem aumentar o consumo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

A. P. PETRY J. M. L. MATTUELLA. "Análise do Potencial Eólico e Estimativa da Geração de Energia Empregando o Software Livre Alwin" Technical Report, 2007.

BOCCARDO, D. et al, "Energy Footprint Framework: A Pathway Towards Smart Grid Sustainability", IEEE Communications Magazine, vol. 51, no. 1, pp. 50-56, Jan. 2013.

BORRENSTEIN, S., Jaske, M., Rosenfeld, A. "Dynamic Pricing, Advanced Metering, and Demand Response in Electricity Markets" Center for the Study of Energy Markets, University of California Energy Institute, 2002.

EVANS, A., et al, "Assessment of sustainability indicators for renewable energy technologies", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 13, Jun. 2009.

FARUQUI, A., SERGICI, S., “Household response to dynamic pricing of electricity: a survey of 15 experiments”, Springer Science+Business Media, 2010.

FRANCISQUINI, A. A., “Estimação de Curvas de Carga em Pontos de Consumo e em Transformadores de Distribuição”, Dissertação de Mestrado, UNESP, Ilha Solteira, 2006.

KHAN, A. R., et al, “Load Forecasting, Dynamic Pricing and DSM in Smart Grid: A Review”, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 54, Feb. 2016.

LIMA, F. J. L., et al, “Avaliação do Potencial Eólico em Cinco Regiões do Estado da Paraíba”, Revista de Geografia, 2010.

PAI, A. D., ESCOBEDO, J. F., “Série Temporal Diária Média Horária e Anual Média Mensal Diária da Irradiação Solar Difusa Anisotrópica”, Energia na Agricultura, 2006.

SAFDARIAN, A., et al, “Benefits of Demand Response on Operation Distribution Networks: A Case Study” IEEE Systems Journal, Vol. 10, No. 1, Mar. 2016.

WANG W., XU Y., KHANNA M., “A Survey on Communication Architectures in Smart Grid”, Computer Networks, vol. 55, Issue 15, Oct. 2011, pp. 3604–3629.

