

AVALIAÇÃO DE MODELOS ENERGÉTICOS PARA COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PONTO A PONTO ENTRE CONSUMIDORES E PROSSUMIDORES RESIDENCIAIS

Andriele Bratti Machado – andriele.bratti@posgrad.ufsc.br

Giuliano Arns Rampinelli – giuliano.rampinelli@ufsc.br

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Ciências, Tecnologias e Saúde

Resumo. *O excedente da energia elétrica gerada pelos sistemas fotovoltaicos de geração distribuída é injetado na rede de distribuição local e sua comercialização não é permitida. Entretanto, as normativas que regulam a geração distribuída e o mercado livre de energia elétrica no Brasil estão sendo revisadas, a fim de reduzir os incentivos públicos à geração distribuída e permitir o acesso de todos os consumidores ao mercado livre de energia elétrica. Neste contexto, novos modelos de negócios para o excedente de energia elétrica de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída devem ser implementados. Uma alternativa é a comercialização ponto a ponto, que se refere a uma microrrede composta por consumidores e prossumidores de energia elétrica que compram e vendem energia entre si. Para tanto, o presente trabalho propõe-se a desenvolver modelos energéticos para verificar a competitividade da comercialização de energia elétrica ponto a ponto entre consumidores e prossumidores residenciais. Dados de consumo da Celesc-Distribuição foram utilizados para desenvolver e analisar três modelos energéticos, cada um com dez participantes e diferentes níveis de inserção de sistemas fotovoltaicos.*

Palavras-chave: *Sistemas Fotovoltaicos de Geração Distribuída. Mercado de Energia Elétrica. Comercialização P2P de Energia Elétrica.*

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas fotovoltaicos de Geração Distribuída (GD) apresentaram redução dos preços nos últimos anos (GREENER, 2021), tornando-os economicamente acessíveis a uma parcela maior da população. Além disso, incentivos públicos são fornecidos para impulsionar a implementação destes sistemas e a participação no sistema de compensação de energia elétrica (HADIYA et al., 2019; SILVA et al., 2019). A energia elétrica que é convertida pelos sistemas fotovoltaicos de GD é instantaneamente utilizada na edificação de instalação para atender as cargas nela presentes e, quando há excedente, essa energia pode ser injetada na rede elétrica de distribuição, armazenada em bancos de baterias ou ainda, comercializada entre outros consumidores e prossumidores (SOTO et al., 2021). A comercialização do excedente de energia elétrica de prossumidores em microrredes favorece a segurança energética e a redução de perdas durante a transmissão e distribuição de energia elétrica (AN et al., 2020; MENGELKAMP et al., 2018).

Uma alternativa para a comercialização do excedente de energia elétrica de sistemas fotovoltaicos de GD é a comercialização de energia elétrica ponto a ponto (P2P), que já está sendo utilizada em diversos países (PARK; YONG, 2017; SOUSA et al., 2019; ZHANG et al., 2017). A comercialização de energia elétrica P2P refere-se a uma microrrede composta por consumidores e prossumidores de energia elétrica que compram e vendem energia entre si (ZHANG et al., 2018). A comercialização de energia elétrica P2P em uma microrrede visa reduzir os custos coletivos com energia, maximizar o lucro para os prossumidores (ALAM; ST-HILAIRE; KUNZ, 2017) e, também, pode reduzir os picos de demanda para as distribuidoras de energia elétrica (HADIYA et al., 2019).

A implementação de plataformas digitais com tecnologias de comunicação e algoritmos de monitoramento e tomada de decisão são necessários para o funcionamento de microrredes com comercialização de energia elétrica P2P. Além disso, essas plataformas eliminam a dependência e a interferência de terceiros durante a compra e venda de energia (GIOVANINI; ALMEIDA; SAATH, 2020).

Neste contexto, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver e avaliar modelos energéticos de microrredes com comercialização de energia elétrica P2P entre prossumidores e consumidores residenciais.

2. METODOLOGIA

Nesta seção são detalhados os perfis de consumo de energia elétrica e de geração de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos de geração distribuída e a modelagem das microrredes de comercialização de energia elétrica P2P.

2.1 Consumo de energia elétrica

Neste trabalho a modelagem é realizada hora a hora e, portanto, o consumo médio horário de energia elétrica é

necessário. Para tanto, dados de consumo da Celesc-Distribuição são utilizados. A metodologia apresentada é genérica e pode ser aplicada a quaisquer dados de consumo de energia elétrica. As unidades consumidoras foram separadas por classe de consumo e as curvas de cargas são apresentadas para os dias úteis, sábados e domingos. Os dados referem-se ao ano de 2020 e foram medidos a cada quinze minutos para cada unidade consumidora de uma amostra. O consumo médio horário de energia elétrica residencial foi calculado para a amostra, extrapolado para 2.370.404 consumidores residenciais e, posteriormente, dividiu-se o resultado pelo número total de consumidores. Os resultados são mostrados na Tab. 1 e na Fig. 1.

Tabela 1 – Perfil de carga médio horário por residência atendida pela Celesc-Distribuição.

HORA	DIA ÚTIL	SÁBADO	DOMINGO
00:00	0,22	0,24	0,24
01:00	0,20	0,21	0,21
02:00	0,18	0,19	0,18
03:00	0,17	0,18	0,17
04:00	0,17	0,18	0,17
05:00	0,17	0,17	0,17
06:00	0,21	0,19	0,17
07:00	0,26	0,22	0,19
08:00	0,26	0,26	0,23
09:00	0,25	0,28	0,25
10:00	0,30	0,31	0,36
11:00	0,33	0,33	0,34
12:00	0,35	0,35	0,34
13:00	0,34	0,33	0,33
14:00	0,29	0,32	0,29
15:00	0,31	0,31	0,29
16:00	0,34	0,32	0,32
17:00	0,40	0,40	0,36
18:00	0,51	0,45	0,46
19:00	0,53	0,45	0,43
20:00	0,50	0,40	0,43
21:00	0,44	0,35	0,39
22:00	0,38	0,32	0,35
23:00	0,30	0,29	0,27

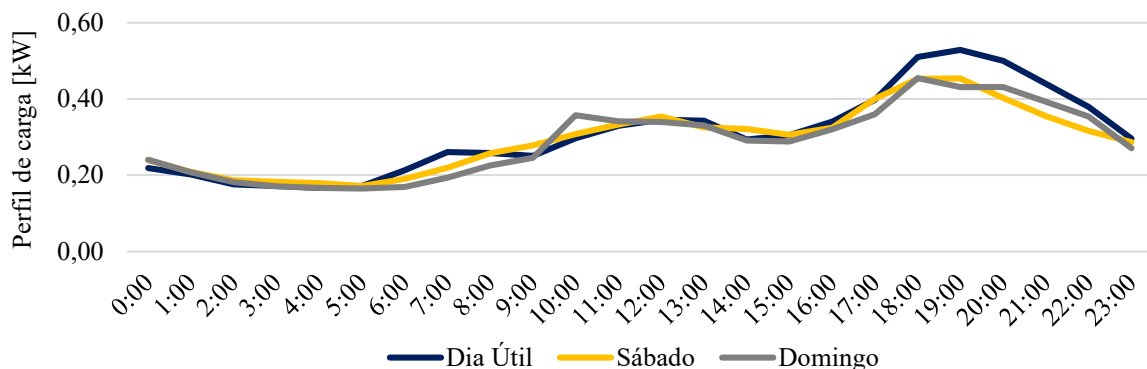


Figura 1 – Perfil de carga médio horário da classe residencial para o dia útil, o sábado e o domingo.

O consumo médio mensal anual foi calculado para definir a potência dos sistemas fotovoltaicos que serão inseridos nas microrredes P2P e relatados na seção a seguir. Para tanto, utilizou-se um mês padrão de trinta dias, com vinte dias úteis, cinco sábados e cinco domingos, resultando no valor de 217,80 kWh.

Para simular a microrrede, os perfis de consumo médios horários foram variados com desvios de $\pm 10\%$ e $\pm 20\%$ por unidade consumidora, ou seja, o consumo de energia elétrica médio horário (kWh) mais ou menos o desvio.

2.2 Geração de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos de GD

Neste trabalho, os sistemas fotovoltaicos foram simulados na cidade de Florianópolis/SC e os dados de irradiação solar média diária no plano inclinado, em kWh/m²-dia, foram extraídos da plataforma online do Centro de Referência

para Energia Solar e Eólica Sérgio Brito (CRESESB) inserindo a latitude 27.5969 Sul e a longitude 48.5495 Oeste. A potência nominal dos sistemas fotovoltaicos foi calculada pela Eq. 1

$$P_{NOM} = \frac{E_G}{Y_R \cdot P_R} \quad (1)$$

onde: P_{NOM} é a potência nominal estimada do sistema fotovoltaico (kW_p), E_G é o consumo médio mensal anual de energia elétrica ($kWh/mês$), Y_R é a produtividade de referência média mensal ($kWh/kW \cdot mês$) com ângulo igual a latitude para a cidade de Florianópolis/SC e P_R é a taxa de desempenho (%).

A taxa de desempenho é um parâmetro utilizado no cálculo para considerar as perdas (*mismatch*, cabeamento, conexões) de um sistema fotovoltaico em operação. Para o sul do Brasil, o valor utilizado é de 80 % (IEA, 2014; PEREIRA et al., 2017). Para aplicar a Eq. 1 os parâmetros devem estar em média mensal, portanto, os valores de irradiação média diária no plano inclinado fornecidos pelo CRESESB foram convertidos em médias mensais e, ambos, são apresentados na Tab. 2.

Tabela 2 – Valores de irradiação solar média diária e mensal no plano inclinado para a cidade de Florianópolis/SC.

MÊS	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA
IRRADIAÇÃO [kWh/m ² · dia]	5,2	5,2	4,9	4,4	4,0	3,6	3,6	4,2	3,9	4,3	5,0	5,2	4,4
IRRADIAÇÃO [kWh/m ² · mês]	160,6	145,0	160,9	146,7	136,7	120,0	110,0	111,0	125,7	120,0	128,4	156,2	135,1

Os dados utilizados para estimar a potência dos sistemas fotovoltaicos residenciais são resumidos na Tab. 3.

Tabela 3 – Valores médios mensais utilizados na Eq. 1 para definir a potência dos sistemas fotovoltaicos simulados.

MÊS	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA
CONSUMO [kWh/mês]	217,8	217,8	217,8	217,8	217,8	217,8	217,8	217,8	217,8	217,8	217,8	217,8	217,8
IRRADIAÇÃO [kWh/m ² · mês]	160,6	145,0	160,9	146,7	136,7	120,0	110,0	111,0	125,7	120,0	128,4	156,2	135,1

Aplicando os valores da Tab. 3 e uma P_R de 80 % na Eq. 1, obteve-se os resultados apresentados na Tab. 4. Os resultados foram aproximados para obter um valor inteiro de módulos fotovoltaicos por sistema, abatimento do consumo de energia elétrica acima de 100 % e a melhor combinação com o inversor.

Tabela 4 – Potência nominal dos sistemas fotovoltaicos residenciais e comerciais utilizados neste trabalho.

RESIDENCIAL	SISTEMA FV ESTIMADO	P_{NOM} [kW_p]	2,25
		Qtd. módulos	6,34
		Abatimento [%]	105
	SISTEMA FV ASSUMIDO	P_{NOM} [kW_p]	2,49
		Qtd. módulos	7
		Abatimento [%]	116

A partir dos dados de potência calculados, simulou-se os sistemas fotovoltaicos para obter a estimativa de geração de energia elétrica horária. A simulação foi realizada no *software System Advisor Model (SAM)*, desenvolvido pelo laboratório americano *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*. No *software*, escolheu-se a cidade de Florianópolis/SC, módulos fotovoltaicos do fabricante Jinko Solar, modelo JKM355M-72-J4 e 355 W_p de potência. O inversor escolhido para o sistema fotovoltaico residencial foi do fabricante SMA America, modelo SB3000US e com 3.000 W de potência. Na simulação considerou-se ângulo de inclinação dos módulos fotovoltaicos igual a 28° (latitude), orientação Norte e não foram consideradas perdas por sombreamento parcial. Isto é, os sistemas fotovoltaicos foram simulados em condições otimizadas de operação (GASPARIN; KREZNINGER, 2017). Salienta-se que para sistemas fotovoltaicos reais, pequenas variações no ângulo de inclinação e na orientação não afetam consideravelmente o desempenho energético destes sistemas, podendo ser admitidas em conformidade com as condições de instalação existentes.

As estimativas de geração de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos residenciais resultantes da simulação no *software SAM*, são fornecidas em base horária para cada dia do ano. Logo, a média horária diária mensal da geração de energia foi calculada para cada mês, obtendo um dia médio de geração de energia elétrica para cada mês do ano. Posteriormente, foi calculada a média horária diária anual, obtendo um dia médio de geração de energia elétrica horária que representa todos os dias do ano.

2.3 Modelagem das redes P2P de comercialização de energia elétrica

As microrredes de comercialização de energia elétrica P2P modeladas são compostas por consumidores e prossumidores residenciais. Três modelos de microrrede são modelados e estudados, com 30 %, 50 % e 70 % de inserção de sistemas fotovoltaicos. Todos os modelos possuem o total de dez unidades, entre consumidoras e prossumidoras. A metodologia é replicável para qualquer tamanho de microrrede, desde que haja poder computacional para a simulação. As transações energéticas são realizadas hora a hora para um dia médio, onde os perfis de consumos médios horários são variados com os desvios estabelecidos na seção 2.1 e são utilizados os dados de geração de energia elétrica para um dia médio horário. Este cenário pode ser extrapolado para uma semana, um mês ou um ano e sempre resultará em valores médios horários para qualquer período escolhido.

As microrredes modeladas são apresentadas na Tab. 5.

Tabela 5 – Características dos modelos 1, 2 e 3.

CLASSE	VARIAÇÃO	MODELO 1	MODELO 2	MODELO 3
Residencial	Médio	Prossumidora	Prossumidora	Prossumidora
Residencial	Médio	Prossumidora	Prossumidora	Prossumidora
Residencial	Médio - 10 %	Prossumidora	Prossumidora	Prossumidora
Residencial	Médio - 10 %	Consumidora	Prossumidora	Prossumidora
Residencial	Médio + 20 %	Consumidora	Prossumidora	Prossumidora
Residencial	Médio + 20 %	Consumidora	Consumidora	Prossumidora
Residencial	Médio + 10 %	Consumidora	Consumidora	Prossumidora
Residencial	Médio + 10 %	Consumidora	Consumidora	Consumidora
Residencial	Médio - 20 %	Consumidora	Consumidora	Consumidora
Residencial	Médio - 20 %	Consumidora	Consumidora	Consumidora

Para garantir que todas as unidades consumidoras tenham oportunidade de comprar energia elétrica da microrrede P2P, a energia total resultante do excedente das unidades prossumidoras foi dividida, de acordo com o desvio aplicado a cada consumo médio horário. Por exemplo, se o consumo da unidade consumidora foi desviado em + 20 %, a parcela disponível do excedente de energia elétrica que essa unidade consumidora poderá comprar é de + 20 % em relação a unidade consumidora média.

3. RESULTADOS

Na discussão dos resultados, a seguinte nomenclatura é utilizada “Total Comercializado na Rede P2P” corresponde a soma de toda a energia elétrica gerada pelos sistemas fotovoltaicos que foi negociada na microrrede P2P. Não inclui a energia elétrica que foi gerada e consumida instantaneamente pelas unidades prossumidoras do modelo avaliado.

As Fig. 2 e 3 e as Tab. 6 e 7 apresentam os resultados para o modelo 1 avaliado.

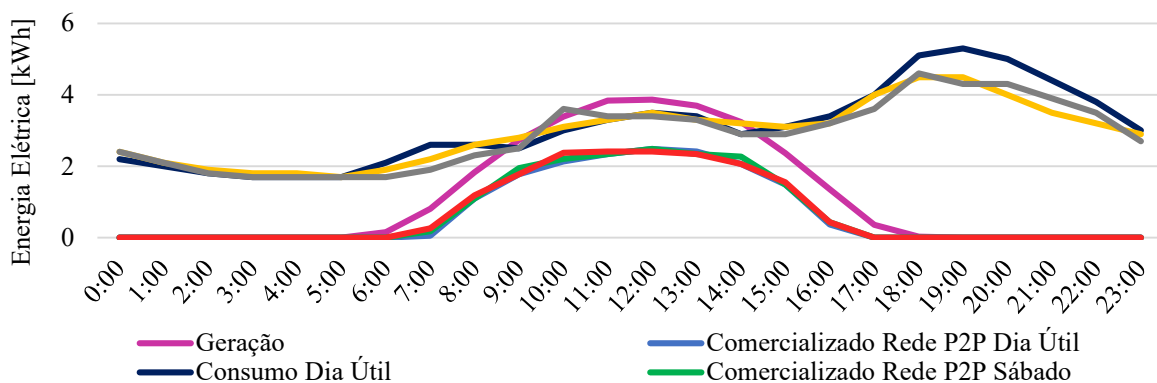


Figura 2 – Curvas de geração, consumo e do total de energia elétrica disponível na microrrede P2P para o modelo 1.

As Fig. 2 e 3 mostram que parte da energia elétrica gerada na microrrede P2P é vendida para a distribuidora e isso ocorre nos períodos em que a geração é superior ao consumo de energia elétrica. Este período corresponde ao período em que todo o consumo é suprido pela energia elétrica da microrrede P2P, que é das 9h00 às 14h00, com exceção das 9h00 do sábado e das 10h00 do domingo. No dia útil, 7,81 % da energia elétrica gerada foi vendida para a distribuidora, enquanto no sábado o percentual vendido foi de 5,89 % e no domingo foi de 6,76 %.

Em relação a energia elétrica comprada da distribuidora, para o dia útil calculou-se que 65,53 % do consumo foi suprido pela distribuidora, para o sábado o valor correspondeu a 62,98 % e para o domingo a 62,72 %. Neste caso, como o consumo do dia útil é maior durante a noite, maior parte do consumo é suprido pela distribuidora e a energia elétrica excedente durante o período diurno é vendida para a distribuidora. Em modelos de tarifação horários, o valor da energia

elétrica durante o dia normalmente é menor do que o valor da energia elétrica durante a noite, o chamado horário de pico. Logo, quanto menos energia elétrica for comprada da distribuidora a noite, mais lucrativo se tornam os modelos de tarifação horários. Também, é possível avaliar pela Fig. 3 que a quantidade de energia elétrica vendida para a distribuidora é bem menor do que a quantidade comprada da distribuidora. Isso ocorre pela baixa inserção de sistemas fotovoltaicos no modelo.

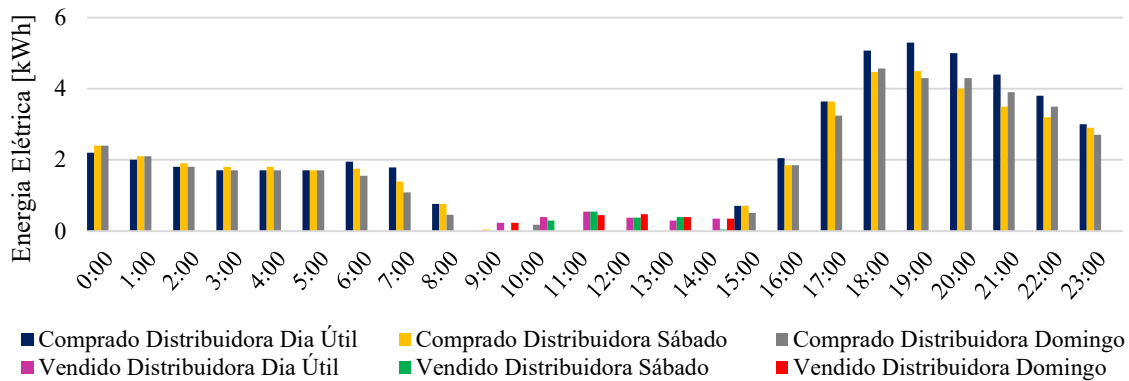


Figura 3 – Resultados para o modelo 1.

Tabela 6 – Perfis de geração e consumo de energia elétrica para o modelo 1.

HORA	TOTAL GERAÇÃO [kWh]			TOTAL CONSUMO [kWh]		
	DIA ÚTIL	SÁBADO	DOMINGO	DIA ÚTIL	SÁBADO	DOMINGO
0:00	0,00	0,00	0,00	2,20	2,40	2,40
1:00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,10	2,10
2:00	0,00	0,00	0,00	1,80	1,90	1,80
3:00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,80	1,70
4:00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,80	1,70
5:00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,70	1,70
6:00	0,15	0,15	0,15	2,10	1,90	1,70
7:00	0,81	0,81	0,81	2,60	2,20	1,90
8:00	1,83	1,83	1,83	2,60	2,60	2,30
9:00	2,73	2,73	2,73	2,50	2,80	2,50
10:00	3,39	3,39	3,39	3,00	3,10	3,60
11:00	3,84	3,84	3,84	3,30	3,30	3,40
12:00	3,87	3,87	3,87	3,50	3,50	3,40
13:00	3,69	3,69	3,69	3,40	3,30	3,30
14:00	3,24	3,24	3,24	2,90	3,20	2,90
15:00	2,37	2,37	2,37	3,10	3,10	2,90
16:00	1,35	1,35	1,35	3,40	3,20	3,20
17:00	0,36	0,36	0,36	4,00	4,00	3,60
18:00	0,03	0,03	0,03	5,10	4,50	4,60
19:00	0,00	0,00	0,00	5,30	4,50	4,30
20:00	0,00	0,00	0,00	5,00	4,00	4,30
21:00	0,00	0,00	0,00	4,40	3,50	3,90
22:00	0,00	0,00	0,00	3,80	3,20	3,50
23:00	0,00	0,00	0,00	3,00	2,90	2,70
TOTAL	27,66	27,66	27,66	74,10	70,50	69,40

A Tab. 7 demonstra que a comercialização de energia elétrica na microrrede P2P ocorre das 6h00 às 18h00 para os três dias analisados. O consumo de energia elétrica é totalmente suprido pela geração durante o período das 09h00 às 14h00, exceto para as 9h do sábado e as 10h00 do domingo, onde uma pequena parte do consumo é suprido pela distribuidora. A geração de energia elétrica a partir da inserção de 30 % de sistemas fotovoltaicos é capaz de atender 38,78 % do consumo total do modelo 1.

A porcentagem da energia elétrica gerada que foi comercializada na microrrede P2P foi de 58,62 % no dia útil, 60,65 % no sábado e 60,76 % no domingo. Como a geração de energia elétrica é igual para todos os dias, os valores indicam que no domingo, maior parte do consumo ocorre no período diurno, coincidindo com o perfil de geração e, conseqüentemente, mais energia é negociada entre os participantes da microrrede. Em contrapartida, o dia útil foi o dia que apresentou a menor porcentagem, já que o consumo fica deslocado para o período noturno. Assim, mais energia é vendida para a distribuidora e menos é comercializada na microrrede P2P.

Tabela 7 – Resultados para o modelo 1 do primeiro cenário.

HORA	TOTAL COMERC. P2P [kWh]			TOTAL COMPRADO DIST. [kWh]			TOTAL VENDIDO DIST. [kWh]		
	DIA ÚTIL	SÁB.	DOM.	DIA ÚTIL	SÁB.	DOM.	DIA ÚTIL	SÁB.	DOM.
0:00	0,00	0,00	0,00	2,20	2,40	2,40	0,00	0,00	0,00
1:00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,10	2,10	0,00	0,00	0,00
2:00	0,00	0,00	0,00	1,80	1,90	1,80	0,00	0,00	0,00
3:00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,80	1,70	0,00	0,00	0,00
4:00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,80	1,70	0,00	0,00	0,00
5:00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,70	1,70	0,00	0,00	0,00
6:00	0,00	0,00	0,00	1,95	1,75	1,55	0,00	0,00	0,00
7:00	0,06	0,17	0,26	1,79	1,39	1,09	0,00	0,00	0,00
8:00	1,09	1,09	1,18	0,75	0,75	0,45	0,00	0,00	0,00
9:00	1,78	1,95	1,78	0,00	0,04	0,00	0,23	0,00	0,23
10:00	2,13	2,20	2,38	0,00	0,00	0,18	0,39	0,29	0,00
11:00	2,34	2,34	2,41	0,00	0,00	0,00	0,54	0,54	0,44
12:00	2,49	2,49	2,41	0,00	0,00	0,00	0,37	0,37	0,47
13:00	2,41	2,34	2,34	0,00	0,00	0,00	0,29	0,39	0,39
14:00	2,06	2,27	2,06	0,00	0,00	0,00	0,34	0,04	0,34
15:00	1,49	1,49	1,55	0,71	0,71	0,51	0,00	0,00	0,00
16:00	0,37	0,43	0,43	2,04	1,84	1,84	0,00	0,00	0,00
17:00	0,00	0,00	0,00	3,64	3,64	3,24	0,00	0,00	0,00
18:00	0,00	0,00	0,00	5,07	4,47	4,57	0,00	0,00	0,00
19:00	0,00	0,00	0,00	5,30	4,50	4,30	0,00	0,00	0,00
20:00	0,00	0,00	0,00	5,00	4,00	4,30	0,00	0,00	0,00
21:00	0,00	0,00	0,00	4,40	3,50	3,90	0,00	0,00	0,00
22:00	0,00	0,00	0,00	3,80	3,20	3,50	0,00	0,00	0,00
23:00	0,00	0,00	0,00	3,00	2,90	2,70	0,00	0,00	0,00
TOTAL	16,22	16,78	16,81	48,56	44,40	43,53	2,16	1,63	1,87

As Fig. 4 e 5 e as Tab. 8 e 9 apresentam os resultados para o modelo 2 avaliado.

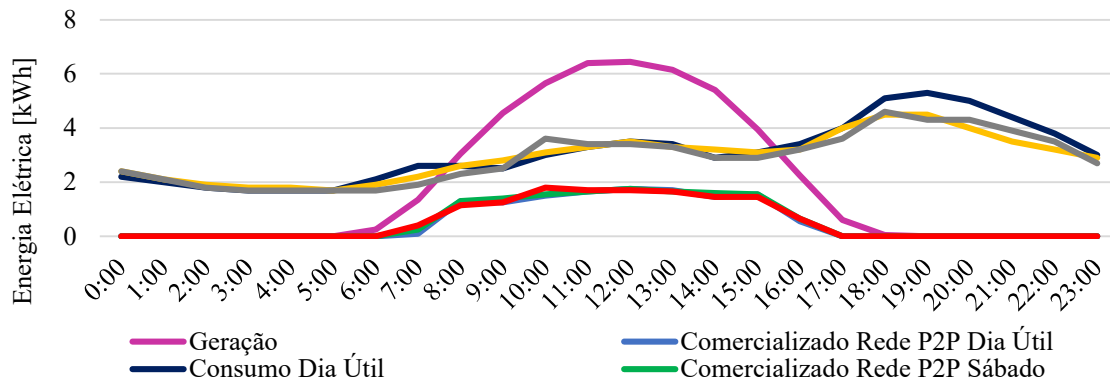


Figura 4 – Curvas de geração, consumo e do total de energia elétrica disponível na microrrede P2P para o modelo 2.

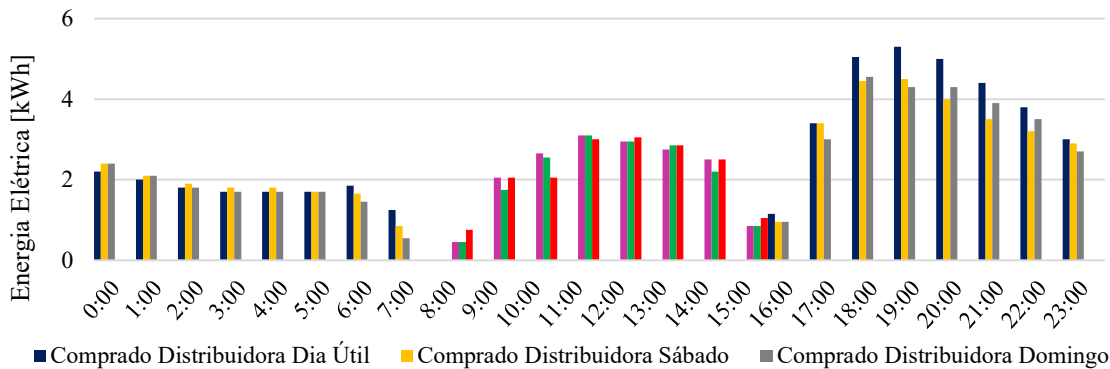


Figura 5 – Resultados para o modelo 2.

A Fig. 5 demonstra que o período em que a energia elétrica gerada na microrrede P2P é vendida para a distribuidora local corresponde das 8h00 às 15h00. No dia útil, 61,13 % da energia elétrica gerada foi vendida para a distribuidora,

enquanto no sábado o percentual vendido foi de 58,30 % e no domingo foi de 58,50 %. Nota-se que, em comparação com o modelo 1, o excedente de energia elétrica é muito maior. Logo, como a quantidade de participantes não aumentou de um modelo para o outro, todo o excedente é vendido para a distribuidora.

Em relação a energia elétrica comprada da distribuidora, para o dia útil calculou-se que 23,35 % do consumo foi suprido pela distribuidora, para o sábado o valor correspondeu a 23,69 % e para o domingo a 24,93 %. A quantidade de energia elétrica comprada da distribuidora no modelo 2 é menor do que no modelo 1, já que há mais geração e, consequentemente, mais energia para suprir o consumo de energia elétrica da microrrede P2P. Neste caso, também se observou que os maiores consumos são no período noturno, em que não há geração de energia elétrica. Portanto, a energia elétrica comprada da distribuidora se torna mais cara do que a energia elétrica vendida para ela, pois a compra está no período de ponta (valores mais caros devido ao pico de consumo) (ALAM; ST-HILAIRE; KUNZ, 2017).

Tabela 8 – Resultados para o modelo 2.

HORA	TOTAL COMERC. P2P [kWh]			TOTAL COMPRADO DIST. [kWh]			TOTAL VENDIDO DIST. [kWh]		
	DIA ÚTIL	SÁB.	DOM.	DIA ÚTIL	SÁB.	DOM.	DIA ÚTIL	SÁB.	DOM.
0:00	0,00	0,00	0,00	2,20	2,40	2,40	0,00	0,00	0,00
1:00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,10	2,10	0,00	0,00	0,00
2:00	0,00	0,00	0,00	1,80	1,90	1,80	0,00	0,00	0,00
3:00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,80	1,70	0,00	0,00	0,00
4:00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,80	1,70	0,00	0,00	0,00
5:00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,70	1,70	0,00	0,00	0,00
6:00	0,00	0,00	0,00	1,85	1,65	1,45	0,00	0,00	0,00
7:00	0,09	0,25	0,40	1,25	0,85	0,55	0,00	0,00	0,00
8:00	1,15	1,30	1,15	0,15	0,00	0,00	0,00	0,45	0,75
9:00	1,25	1,40	1,25	0,00	0,00	0,00	0,83	1,75	2,05
10:00	1,50	1,55	1,80	0,00	0,00	0,00	1,11	2,55	2,05
11:00	1,65	1,65	1,70	0,00	0,00	0,00	1,33	3,10	3,00
12:00	1,75	1,75	1,70	0,00	0,00	0,00	1,21	2,95	3,05
13:00	1,70	1,65	1,65	0,00	0,00	0,00	1,11	2,85	2,85
14:00	1,45	1,60	1,45	0,00	0,00	0,00	1,04	2,20	2,50
15:00	1,55	1,55	1,45	0,00	0,00	0,00	0,01	0,85	1,05
16:00	0,47	0,65	0,65	1,23	0,95	0,95	0,00	0,00	0,00
17:00	0,00	0,00	0,00	3,40	3,40	3,00	0,00	0,00	0,00
18:00	0,00	0,00	0,00	5,05	4,45	4,55	0,00	0,00	0,00
19:00	0,00	0,00	0,00	5,30	4,50	4,30	0,00	0,00	0,00
20:00	0,00	0,00	0,00	5,00	4,00	4,30	0,00	0,00	0,00
21:00	0,00	0,00	0,00	4,40	3,50	3,90	0,00	0,00	0,00
22:00	0,00	0,00	0,00	3,80	3,20	3,50	0,00	0,00	0,00
23:00	0,00	0,00	0,00	3,00	2,90	2,70	0,00	0,00	0,00
TOTAL	12,56	13,35	13,20	45,53	41,10	40,60	6,64	16,70	17,30

A partir da Tab. 8 observa-se que a comercialização de energia elétrica na microrrede P2P do modelo 2 ocorre das 6h00 às 18h00 para os três dias analisados, assim como para o modelo 1 visto que é o período de geração de energia elétrica dos sistemas fotovoltaicos. No modelo 2, o consumo de energia elétrica é totalmente suprido pela geração durante o período das 08h00 às 15h00, sem exceções, e englobando dois horários a mais em relação ao primeiro modelo.

A geração de energia elétrica a partir da inserção de 50 % de sistemas fotovoltaicos é capaz de atender 64,63 % do consumo total do modelo 2, 25,85 % a mais em comparação com 30 % de inserção de sistemas fotovoltaicos. A porcentagem da energia elétrica gerada que foi comercializada na microrrede P2P foi de 27,75 % no dia útil, 28,96 % no sábado e 28,63 % no domingo. Neste caso, a porcentagem de energia elétrica comercializada na microrrede é menor que no modelo 1, uma vez que, no modelo 2 há menos unidades consumidoras comprando o excedente de energia elétrica dos prossumidores

As Tab. 9 e 10 e as Fig. 6 e 7 apresentam os resultados para o modelo 3.

Assim como nos modelos 1 e 2, no modelo 3 a comercialização de energia elétrica na microrrede P2P ocorre das 6h00 às 18h00 para os três dias analisados. O consumo de energia elétrica é totalmente suprido pela geração durante o período das 08h00 às 15h00, igual ao modelo 2. Isso demonstra que mesmo aumentando a inserção de sistemas fotovoltaicos, o período de comercialização e o período o qual o consumo da microrrede é suprido pela geração de energia não são alterados.

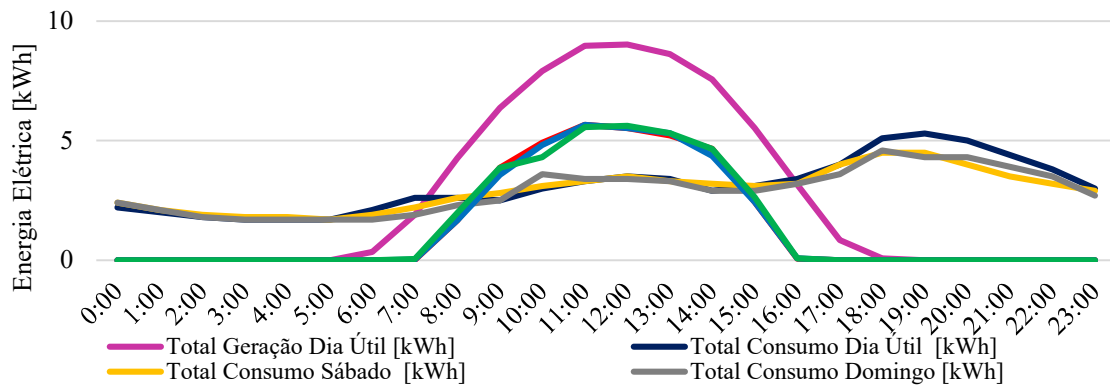


Figura 6 – Curvas de geração, consumo e do total de energia elétrica disponível na microrrede P2P para o modelo 3.

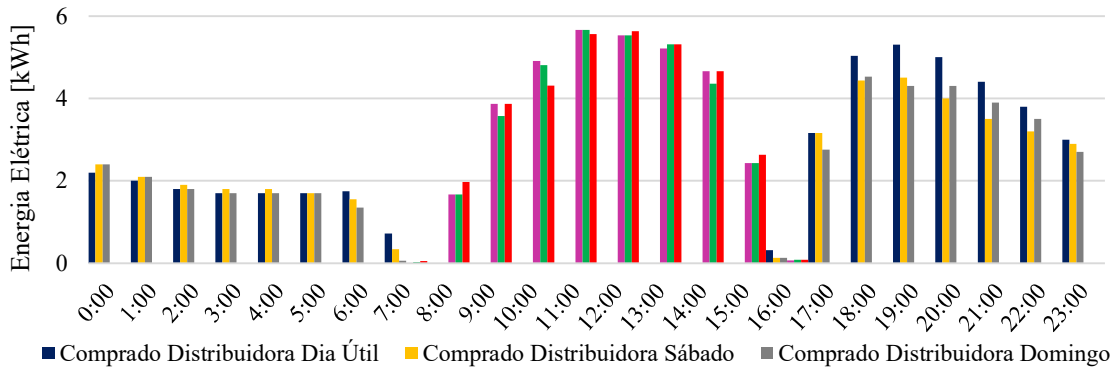


Figura 7 – Resultados para o modelo 3.

Tabela 9 – Perfis de geração e consumo de energia elétrica para o modelo 3.

HORA	TOTAL GERAÇÃO [kWh]			TOTAL CONSUMO [kWh]		
	DIA ÚTIL	SÁBADO	DOMINGO	DIA ÚTIL	SÁBADO	DOMINGO
0:00	0,00	0,00	0,00	2,20	2,40	2,40
1:00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,10	2,10
2:00	0,00	0,00	0,00	1,80	1,90	1,80
3:00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,80	1,70
4:00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,80	1,70
5:00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,70	1,70
6:00	0,35	0,35	0,35	2,10	1,90	1,70
7:00	1,89	1,89	1,89	2,60	2,20	1,90
8:00	4,27	4,27	4,27	2,60	2,60	2,30
9:00	6,37	6,37	6,37	2,50	2,80	2,50
10:00	7,91	7,91	7,91	3,00	3,10	3,60
11:00	8,96	8,96	8,96	3,30	3,30	3,40
12:00	9,03	9,03	9,03	3,50	3,50	3,40
13:00	8,61	8,61	8,61	3,40	3,30	3,30
14:00	7,56	7,56	7,56	2,90	3,20	2,90
15:00	5,53	5,53	5,53	3,10	3,10	2,90
16:00	3,15	3,15	3,15	3,40	3,20	3,20
17:00	0,84	0,84	0,84	4,00	4,00	3,60
18:00	0,07	0,07	0,07	5,10	4,50	4,60
19:00	0,00	0,00	0,00	5,30	4,50	4,30
20:00	0,00	0,00	0,00	5,00	4,00	4,30
21:00	0,00	0,00	0,00	4,40	3,50	3,90
22:00	0,00	0,00	0,00	3,80	3,20	3,50
23:00	0,00	0,00	0,00	3,00	2,90	2,70
TOTAL	64,54	64,54	64,54	74,10	70,50	69,40

A geração de energia elétrica a partir da inserção de 70 % de sistemas fotovoltaicos é capaz de atender 90,48 % do consumo total do modelo 3, 25,85 % a mais do que o modelo 2 e 51,70 % a mais do que o modelo 1. A porcentagem da energia elétrica gerada que foi comercializada na microrrede P2P foi de 9,78 % no dia útil, 10,94 % no sábado e 11,16 % no domingo, indicando que o consumo de energia elétrica no período diurno é maior aos domingos e menor nos dias úteis.

Tabela 10 – Resultados para o modelo 3.

HORA	TOTAL COMERC. P2P [kWh]			TOTAL COMPRADO DIST. [kWh]			TOTAL VENDIDO DIST. [kWh]		
	DIA ÚTIL	SÁB.	DOM.	DIA ÚTIL	SÁB.	DOM.	DIA ÚTIL	SÁB.	DOM.
0:00	0,00	0,00	0,00	2,20	2,40	2,40	0,00	0,00	0,00
1:00	0,00	0,00	0,00	2,00	2,10	2,10	0,00	0,00	0,00
2:00	0,00	0,00	0,00	1,80	1,90	1,80	0,00	0,00	0,00
3:00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,80	1,70	0,00	0,00	0,00
4:00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,80	1,70	0,00	0,00	0,00
5:00	0,00	0,00	0,00	1,70	1,70	1,70	0,00	0,00	0,00
6:00	0,00	0,00	0,00	1,75	1,55	1,35	0,00	0,00	0,00
7:00	0,08	0,26	0,45	0,72	0,34	0,06	0,01	0,03	0,05
8:00	0,70	0,70	0,62	0,00	0,00	0,00	1,67	1,67	1,97
9:00	0,68	0,76	0,68	0,00	0,00	0,00	3,87	3,57	3,87
10:00	0,81	0,84	0,97	0,00	0,00	0,00	4,91	4,81	4,31
11:00	0,89	0,89	0,92	0,00	0,00	0,00	5,66	5,66	5,56
12:00	0,95	0,95	0,92	0,00	0,00	0,00	5,53	5,53	5,63
13:00	0,92	0,89	0,89	0,00	0,00	0,00	5,21	5,31	5,31
14:00	0,78	0,86	0,78	0,00	0,00	0,00	4,66	4,36	4,66
15:00	0,84	0,84	0,78	0,00	0,00	0,00	2,43	2,43	2,63
16:00	0,60	0,73	0,73	0,32	0,13	0,13	0,07	0,08	0,08
17:00	0,00	0,00	0,00	3,16	3,16	2,76	0,00	0,00	0,00
18:00	0,00	0,00	0,00	5,03	4,43	4,53	0,00	0,00	0,00
19:00	0,00	0,00	0,00	5,30	4,50	4,30	0,00	0,00	0,00
20:00	0,00	0,00	0,00	5,00	4,00	4,30	0,00	0,00	0,00
21:00	0,00	0,00	0,00	4,40	3,50	3,90	0,00	0,00	0,00
22:00	0,00	0,00	0,00	3,80	3,20	3,50	0,00	0,00	0,00
23:00	0,00	0,00	0,00	3,00	2,90	2,70	0,00	0,00	0,00
TOTAL	7,25	7,71	7,75	43,58	39,41	38,93	34,02	33,45	34,07

Parte da energia elétrica gerada na microrrede P2P é vendida para a distribuidora local das 8h00 às 15h00. No dia útil, 45,91 % da energia elétrica gerada foi vendida para a distribuidora, enquanto no sábado o percentual vendido foi de 47,45 % e no domingo foi de 49,09 %. No dia útil a porcentagem é maior porque a maioria das pessoas trabalham em horário comercial, então há menos consumo de energia elétrica nas residências durante este período.

Em relação a energia elétrica comprada da distribuidora, para o dia útil calculou-se que 58,81 % do consumo foi suprido pela distribuidora, para o sábado o valor correspondeu a 55,90 % e para o domingo a 56,10 %.

Nota-se que, em relação ao modelo 2, as porcentagens de energia elétrica comprada da distribuidora não sofrem grandes variações. O aumento da inserção de sistemas fotovoltaicos nas microrredes P2P sem armazenamento de energia elétrica não garante que todo o consumo será suprido dentro da microrrede. O que de fato aumenta é a quantidade de energia elétrica que é vendida para a distribuidora. Para que a otimização ocorra, é necessário que os consumidores residenciais mudem os seus perfis de consumo. Por exemplo, deslocando o horário de banho da noite para o meio dia.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a análise de três modelos energéticos para comercialização de energia elétrica P2P. A análise ocorreu para três microrredes com consumidores e prossumidores residenciais, com 30 %, 50 % e 70 % de inserção de sistemas fotovoltaicos.

A maior e a menor porcentagem de energia elétrica comercializada entre os modelos foram de 60,7 % para o domingo do modelo 1 e 9,8 % para o dia útil do modelo 3, respectivamente. A baixa porcentagem de comercialização no modelo 3 ocorre devido a pequena quantidade de consumidores comprando energia na microrrede. Já para a quantidade de energia elétrica comprada da distribuidora, a menor porcentagem foi para o sábado do modelo 3, com 55,9 %. Entretanto, se objetivo for reduzir a comercialização de energia com a distribuidora, o modelo 2 mostra-se mais atrativo, pois a quantidade de energia comprada da mesma é próxima da quantidade comprada no modelo 3, enquanto a quantidade de energia vendida para a distribuidora é significativamente menor do que no modelo 3.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

5. REFERÊNCIAS

- Alam, M. R.; St-hilaire, M.; Kunz, T. An optimal P2P energy trading model for smart homes in the smart grid. *Energy Efficiency*, v. 10, n. 6, p. 1475–1493, 1 dez. 2017.
- An, J. et al. Determining the Peer-to-Peer electricity trading price and strategy for energy prosumers and consumers within a microgrid. *Applied Energy*, v. 261, p. 16, 2020.
- Gasparin, F. P.; Krenzinger, A. Desempenho de um sistema fotovoltaico em dez cidades brasileiras com diferentes orientações do painel. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 8, n. 1, p. 10–17, 2017.
- Giovanini, A.; Almeida, H. J. F.; Saath, K. C. O. Plataformas de financiamento P2P: análise da viabilidade econômica de sistemas distribuídos de energia solar fotovoltaica. *Textos de Economia*, v. 23, n. 2, p. 1–27, 14 dez. 2020.
- Greener. Estudo Estratégico Geração Distribuída. 2021.
- Hadiya, N. et al. Identifying the Potential for Peer-to-Peer Trading of Rooftop Solar Power for Indian Scenario. 2019 8th International Conference on Power Systems: Transition towards Sustainable, Smart and Flexible Grids, ICPS 2019. Anais...Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 1 dez. 2019.
- Iea. Technology Roadmap Solar Photovoltaic Energy - 2014 edition. p. 60, 2014.
- Mengelkamp, E. et al. Designing microgrid energy markets: A case study: the brooklyn microgrid. *Applied Energy*, v. 210, p. 870–880, 15 jan. 2018.
- Park, C.; Yong, T. Comparative review and discussion on P2P electricity trading. *Energy Procedia*. Anais...Elsevier Ltd, 1 set. 2017.
- Pereira, E. B. et al. Atlas Brasileiro de Energia Solar - 2a edição. INPE, p. 80, 2017.
- Silva, P. P. da et al. Photovoltaic distributed generation – An international review on diffusion, support policies, and electricity sector regulatory adaptation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 103, p. 30–39, 1 abr. 2019.
- Soto, E. A. et al. Peer-to-peer energy trading: a review of the literature. *Applied Energy*, v. 283, p. 116268, 1 fev. 2021.
- Sousa, T. et al. Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review *Renewable and Sustainable Energy Reviews Elsevier Ltd*, , 1 abr. 2019.
- Zhang, C. et al. Review of Existing Peer-to-Peer Energy Trading Projects. *Energy Procedia*. Anais...California: Elsevier Ltd, 2017.
- Zhang, C. et al. Peer-to-Peer energy trading in a Microgrid. *Applied Energy*, v. 220, p. 1–12, 15 jun. 2018.

EVALUATION OF ENERGY MODELS FOR PEER-TO-PEER ENERGY TRADING BETWEEN RESIDENTIAL CONSUMERS AND PROSUMERS

Abstract. The surplus of electricity generated by photovoltaic systems for distributed generation is injected into the local distribution network and its sale is not allowed. However, the regulations governing distributed generation and the free electricity market in Brazil are being revised in order to reduce public incentives for distributed generation and allow all consumers access to the free electricity market. In this context, new business models for electrical energy surplus from distributed generation photovoltaic systems must be implemented. An alternative is peer-to-peer energy trading, which refers to a micro-grid made up of electricity consumers and prosumers who buy and sell energy to each other. Therefore, the present work proposes to develop energy models to verify the peer-to-peer energy trading between residential consumers and prosumers. Consumption data from Celesc-Distribution were used to develop and analyze three energy models, each with ten participants and different levels of insertion of photovoltaic systems.

Key words: Distributed Generation Photovoltaic Systems, Electric Energy Market, P2P Energy Trading.