

Transações peer-to-peer de energia elétrica considerando as restrições da rede de eletricidade

Daniel F. Botelho
Dep. de Energia Elétrica
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de fora, Brasil
daniel.botelho@engenharia.ufjf.br

Tiago A. Soares
Centro de Sistemas de Energia
INESC Technology and Science
Porto, Portugal
tiago.a.soares@inesctec.pt

Pedro H. Peters Barbosa
Dep. de Energia Elétrica
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de fora, Brasil
pedro.peters@engenharia.ufjf.br

Bruno H. Dias
Dep. de Energia Elétrica
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de fora, Brasil
bruno.dias@ufjf.edu.br

Leonardo W. de Oliveira
Dep. de Energia Elétrica
Universidade Federal de Juiz de Fora
Juiz de fora, Brasil
leonardo.willer@ufjf.edu.br

Camile A. Moraes
Dep. de Eng. Agrícola/Núcleo de Energia
Universidade Federal de Viçosa
Viçosa, Brasil
camile.moraes@ufv.br

Abstract—Este trabalho apresenta uma metodologia para a otimização de transações bilaterais de energia ponto a ponto entre prossumidores/consumidores de eletricidade, levando em consideração as restrições físicas da rede elétrica, visando minimizar o custo total dos gastos com energia elétrica. Como estratégia de resolução, o problema de otimização é dividido em duas etapas. A primeira consiste em um problema puramente energético, em que os prossumidores/consumidores estabelecem as trocas energéticas de maneira eficiente, a fim de obter um balanço adequado entre demanda e geração total do sistema. A segunda etapa é física, na qual modela-se as restrições da rede, como carregamento máximo das linhas e nível de tensão dos barramentos. Um sistema de 14 barras com 19 *peers* (agentes) que considera também a possibilidade de troca com uma rede externa, que pode ser um outro conjunto de *peers*, uma outra comunidade energética ou simplesmente a rede sob responsabilidade da concessionária de energia local, é modelado para a avaliação da metodologia proposta. O método proposto se mostrou efetivo pois alcançou resultados onde a operação da rede elétrica é viável.

Index Terms—mercado peer-to-peer, restrições de rede, integração de energias renováveis, prossumidores, diferenciação do produto

I. INTRODUÇÃO

Na última década, o setor energético mundial vem sofrendo uma mudança de paradigma. A demanda de energia global é suprida em sua maior parte por grandes centrais de geração, centralizadas e, muitas vezes, baseadas em fontes não renováveis de energia [1]. Neste contexto, as fontes renováveis e descentralizadas de energia, também chamada de Geração Distribuída (GD) renovável, vem ganhando cada vez mais espaço no sistema elétrico [2].

Tal mudança de paradigma é consonante com o chamado “3 D’s” do setor de energia, que baseia-se na necessidade crescente de descarbonização, descentralização e digitalização do sistema elétrico mundial [3].

Diante deste panorama, as fontes renováveis de energia avançaram da margem para o centro da política global de energia e desenvolvimento deste setor. Essa integração pode tornar a fonte renovável a principal capacidade de geração mundial, nos próximos 10 anos [4]. Assim, o setor energético está em processo de redefinição estrutural, abrangendo a discussão de novos conceitos, o que afeta sua modelagem.

Com o aumento, cada vez mais expressivo, da conexão de GDs renováveis no sistema, os consumidores tradicionais de energia estão se tornando prossumidores, podendo consumir e gerar energia [5]–[7]. Sob a ótica dos prossumidores, quando a geração excede a demanda, há uma decisão a ser tomada, dentre as opções de decisões pode-se destacar:

- o prossumidor pode reduzir a sua geração de modo a igualar à sua demanda, realizando assim um balanço neutro entre produção e consumo de energia [8], [9];
- o prossumidor pode armazenar esse excedente com dispositivos de armazenamento de energia [10];
- o prossumidor pode exportar o excedente para a rede elétrica e vendê-la a outros consumidores de energia [11], [12].

Estas opções têm levado ao aparecimento de novos modelos de negócio e de mercado centrados no prossumidor. Um bom exemplo, é o comércio de energia ponto a ponto (do inglês *Peer-to-Peer* - P2P) que permite transações bilaterais de energia entre prossumidores e consumidores, podendo estes ser residenciais, comerciais ou industriais [13]. Geralmente esse design de mercado é implementado em sistemas de distribuição de eletricidade de uma comunidade local [14].

Em [13], os autores apresentam uma visão geral dos mercados P2P, a motivação, os desafios e os possíveis desenvolvimentos futuros nesse campo.

Em [15], os autores fazem uma revisão do estado da arte em P2P e realizam uma discussão aprofundada sobre seus vários algoritmos operacionais, seus princípios, características e recursos.

Quando se realiza estudos que incorporam o design de mercado P2P na comercialização de eletricidade, há dois principais problemas que devem ser levados em conta, um problema energético e um problema elétrico.

No problema energético, todos os *peers* vendem ou compram energia de todos os outros *peers* e ao final dessas transações bilaterais o montante de energia vendida deve necessariamente ser igual ao montante de energia comprada. Nesse problema não é levado em consideração as restrições físicas da rede de energia nem a localização física dos *peers*.

Os dois artigos supracitados resolvem exatamente este tipo de problema.

Já o problema elétrico, além do que é considerado na solução do problema energético, também leva em conta as restrições físicas da rede elétrica, como a capacidade de transporte de energia das linhas, as perdas elétricas do sistema, os limites de tensão nas barras, etc. Para tentar resolver essa questão, em [16], os autores propõem uma metodologia baseada na análise de sensibilidade para avaliar o impacto das transações P2P na rede e garantir uma troca de energia que não viole as restrições dessa. Os autores do estudo [17] propõem uma abordagem em três etapas utilizando fatores de distribuição topológicos como métrica para a penalização dos *peers* buscando solucionar o problema de mercado P2P de energia sem violar restrições da rede. Orlandini et. al. [18] propõem uma metodologia de coordenação entre o operador do sistema de distribuição (do inglês *Distributed System Operator* - DSO) e mercados de energia baseados em trocas P2P, penalizando os consumidores que causam violações dos limites da rede, atribuindo a esses uma "tarifa de rede".

Inspirado em [17] e [18], este trabalho propõe uma metodologia cooperativa para a resolução dos problemas energético e elétrico, considerando o mecanismo de mercado P2P. Mais precisamente é realizado um estudo de caso em um sistema de distribuição onde os prossumidores negociam energia entre si sem que nenhuma restrição da rede de eletricidade seja violada.

Além desta seção introdutória, o artigo é organizado em outras quatro seções. A seção II apresenta a metodologia utilizada. A seção III descreve os resultados obtidos para o sistema elétrico em estudo, a seção IV apresenta as principais conclusões enquanto a seção V discorre sobre os trabalhos futuros.

II. METODOLOGIA

A. Problema Energético

O problema energético compreende as transações P2P entre prossumidores que pode ser representado pela formulação matemática geral, denominada de *Full P2P market*, apresentada em [13]. À função objetivo (fob) acrescentou-se a parcela PD_n (do inglês *Product Differentiation*) que é responsável pela penalização das transações P2P que dão origem às violações dos limites físicos da rede (problemas de congestionamento e tensão).

Esse design de mercado é baseado em *peers* negociando diretamente entre si como mostra a Figura 1.

Assim, a formulação matemática do problema é definida como (1)-(5):

$$\min_D \sum_{n \in \Omega} C_n \left(\sum_{m \in \omega_n} P_{nm} \right) + PD_n \left(\sum_{m \in \omega_n} P_{nm} \right) \quad (1)$$

sujeito a:

$$\underline{P}_n \leq \sum_{m \in \omega_n} P_{nm} \leq \overline{P}_n \quad \forall n \in \Omega \quad (2)$$

$$P_{nm} + P_{mn} = 0 \quad \forall (n, m) \in (\Omega, \omega_n) \quad (3)$$

$$P_{nm} \geq 0 \quad \forall (n, m) \in (\Omega_p, \omega_n) \quad (4)$$

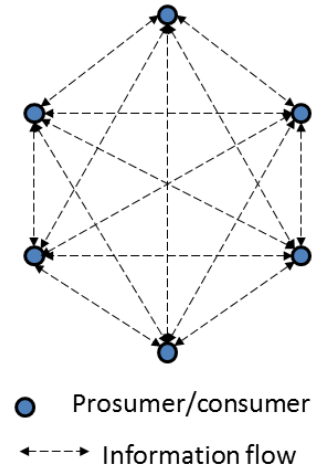


Fig. 1. Design de mercado *Full P2P*

$$P_{nm} \leq 0 \quad \forall (n, m) \in (\Omega_c, \omega_n) \quad (5)$$

onde $D = (P_{nm} \in \mathbb{R})_{n \in \Omega, m \in \omega_n}$, com P_{nm} correspondendo à troca de energia entre os agentes n e m e P_{mn} correspondendo à troca de energia entre os agentes m e n , para os quais um valor positivo significa venda/produção (4) e um valor negativo é igual a uma compra/consumo (5). Ω , Ω_p e Ω_c como conjuntos para todos os *peers*, produtores e consumidores, respectivamente (daí, $\Omega_p, \Omega_c \in \Omega$, $\Omega_p \cap \Omega_c = \emptyset$). O conjunto ω_n contém os parceiros comerciais de um certo *peer* n . As negociações bilaterais P_{nm} possuem a propriedade de reciprocidade, conforme definido por (3). \underline{P}_n e \overline{P}_n são os limites inferior e superior da energia gerada/consumida pelo *peer* n (2). A função C_n corresponde ao custo de produção e neste trabalho é utilizado uma função quadrática conforme [19], assim, $C_n = \frac{1}{2}a_n P_n^2 + b_n P_n$. Conforme (1) o objetivo é minimizar o somatório dos custos e maximizar os rendimentos de todas as transações bilaterais realizadas entre os *peers*, consequentemente resultando no chamado *Social Welfare*.

A parcela PD_n é dada por (6) e define as preferências de compra do *peer* n em relação aos outros *peers* do sistema:

$$PD_n = \sum_{m \in \omega_n} (K \Delta_{nm} \gamma_{nm}) \quad (6)$$

onde K é um fator de penalização, funcionando como um agravador das penalizações. Neste trabalho K é igual ao número da iteração, assim quanto mais iterações é preciso para atender às restrições maior é o fator de penalização utilizado. Δ_{nm} pondera as transações entre os *peers* n e m de acordo com preferências pré-estabelecidas. Como critério de preferência, pode-se considerar emissões, distância, reputação do *peer*, etc. Por exemplo, o critério da distância representaria que o *peer* n está disposto a negociar com parceiros m mais próximos fisicamente, o que pode incentivar o consumo de produtores locais e é exatamente este critério o utilizado neste trabalho. Δ_{nm} utiliza as distâncias em km entre os *peers* como um custo adicional, assim Δ_{nm} é dado em [\$/kWh]. γ_{nm} é utilizado para penalizar diretamente as transações que causam o

carregamento excessivo de determinadas linhas do sistema, assim γ_{nm} é igual a 1 para transações que não causam violação de restrições e é igual a 2.5 para as que causam, este valor foi escolhido empiricamente. γ_{nm} também é dado em [\$/kWh].

B. Problema Elétrico

O problema elétrico consiste na validação das transações energéticas entre os *peers* na operação da rede elétrica, verificando potenciais problemas de congestionamento e tensão. Isto é, utiliza-se as transações P_{nm} entre os *peers* encontrados na solução do problema energético para calcular um fluxo de potência (FP) CA utilizando o pandapower [20] que é uma ferramenta baseada em PythonTM

O Pandapower usa uma arquitetura baseada em elementos para modelar redes elétricas radiais ou em malha, incluindo um método de Newton-Raphson [21] para resolver o FP-CA.

Foram considerados como restrições a tensão nas barras e o carregamento das linhas, como em (7) e (8) respectivamente

$$0.95 p.u. \leq V_b \leq 1.05 p.u., \quad b = 1, \dots, n_b \quad (7)$$

$$L_l \leq 100\%, \quad l = 1, \dots, n_l \quad (8)$$

Onde V_b é a tensão no barramento b , n_b é o número de barramentos do sistema, L_l é o nível de carregamento da linha l e por fim n_l é o número de linhas do sistema.

C. Coordenação entre mercado P2P e operação da rede via mecanismo de diferenciação do produto

A metodologia proposta usa diferenciação de produtos para incentivar os *peers* a reduzir o uso da rede, modificando suas preferências de compra/venda de energia. Uma penalização é imposta às negociações que causam congestionamento na linha ou violação de tensão nos barramentos. Essa penalização é baseada na distância física em km entre os *peers*, ou seja, a distância entre as barras em que esses *peers* estão alocados. A Figura 2 representa o fluxograma do método iterativo proposto, composto por 3 etapas principais.

- **Etapa 1:** Resolve o modelo de mercado P2P (1) sem restrições de rede. Vale destacar que a primeira iteração desconsidera a diferenciação do produto (6), pois $PD=0$. Analisando as ofertas de compra e venda de todos os *peers*, os valores de P_n e P_{nm} são calculados, sendo utilizados como dados de entrada na etapa 2;
- **Etapa 2:** Com os valores de P_n e P_{nm} , é verificado a viabilidade das transações propostas por meio de um FP-CA. O FP-CA determina os fluxos P_{ij} entre todas as linhas $l \in n_l$ do sistema e os níveis de tensão $V_b \in n_b$ de todas as barras. O critério de parada utilizado é a verificação do congestionamento da rede (8), ou seja, se o fluxo de energia das linhas está acima de sua capacidade, bem como se o nível de tensão está fora dos limites (7). Se nenhuma das duas restrições é violada, o processo iterativo é finalizado e os resultados P_n , P_{nm} são apresentados. Se alguma das restrições for violada o método vai para a etapa 3;

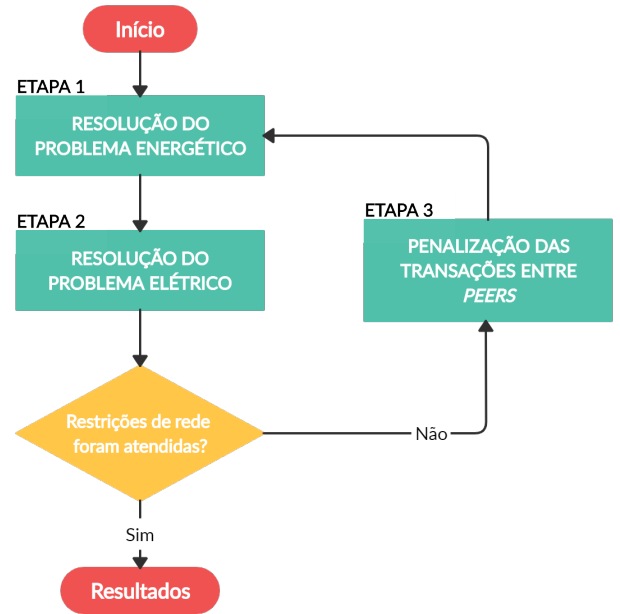


Fig. 2. Fluxograma da metodologia proposta.

- **Etapa 3:** Aplica o mecanismo de diferenciação do produto PD para penalizar as transações entre os *peers* através de K , Δ_{nm} e γ_{nm} (6). Retorna a etapa 1.

III. ESTUDO DE CASO

Devido à limitação da disponibilidade de dados, a fim de se avaliar a metodologia proposta, utilizou-se o sistema de distribuição de 14 barras com 19 *peers* e uma ligação à rede a montante (rede externa) ilustrado na figura 3, disponível em [13] e adaptado em [17].

Didaticamente, para o sistema de distribuição de 14 barras modificado são considerados os seguintes parâmetros:

- Nível de tensão da rede igual a 13 kV $\forall b \in n_b$;
- Frequência de 60 Hz;
- Máxima corrente de carregamento igual a 1,0 kA $\forall l \in n_l$;
- Os dados de rede assim como o tamanho das linhas estão em Anexo.

Os *peers* de 1 e 11 são prossumidores com excesso de geração (geradores) e os *peers* de 12 a 19 são prossumidores com excesso de demanda (consumidores). O *peer* 20 representa a rede da concessionária de energia, assim quando há um desbalanço entre demanda e geração dos *peers*, rede de energia externa supre tal diferença.

A tabela I mostra as faixas que os valores de geração e demanda de todos os *peers* podem assumir.

É considerado que os *peers* consumidores têm pouca margem no gerenciamento de sua carga, já os geradores possuem uma margem maior, podendo gerar qualquer valor de potência desde 0 MW até sua potência nominal.

Didaticamente, o fator de potência das cargas e dos geradores foi fixado em 1 ($\cos \phi_n = 1$), para que uma análise do impacto da geração distribuída no nível de tensão do sistema possa ser facilmente visualizada. Deste modo, a geração de energia reativa necessária para suprir as linhas é

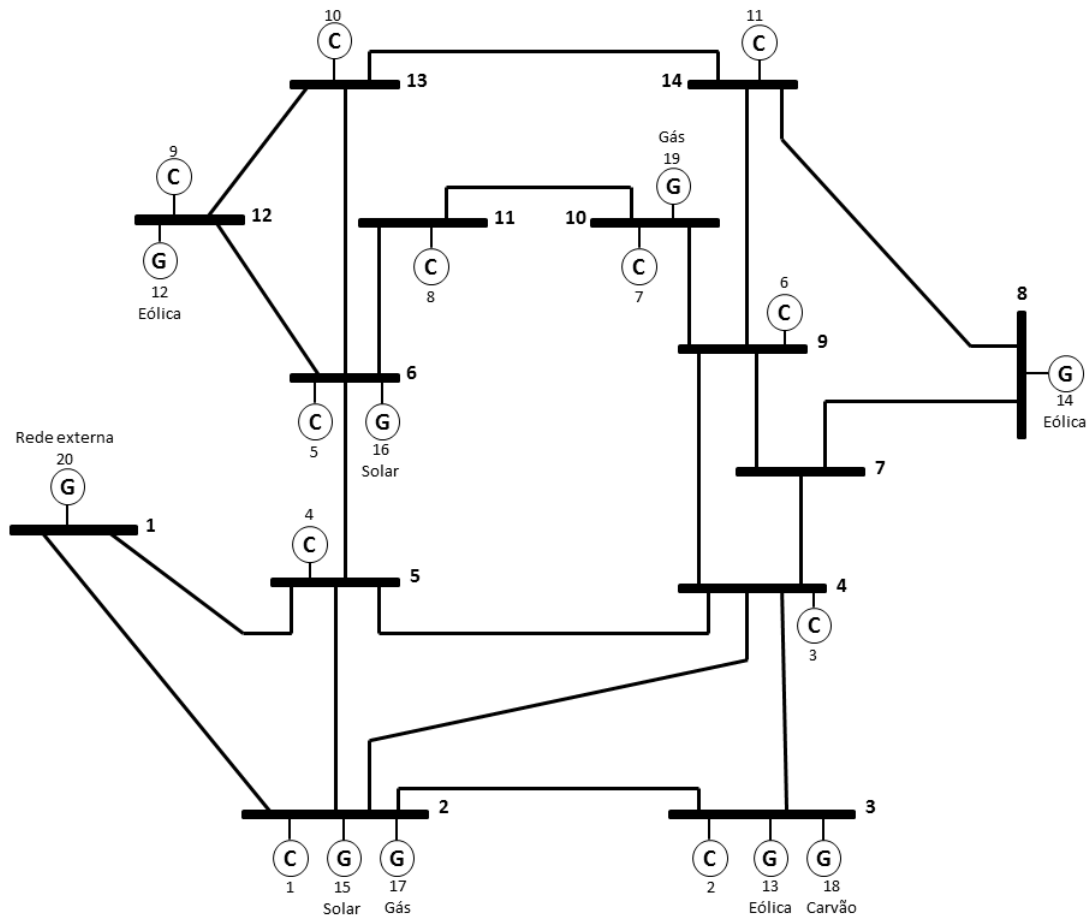


Fig. 3. Sistema 14 barras modificado.

Tabela I
CARACTERÍSTICAS DE GERAÇÃO E CARGA DE TODOS OS *peers*.

Consumidores (Peer em MW)		Geradores (Peer em MW)	
1	20.7 - 21.7	12	0 - 59
2	93.2 - 94.2	13	0 - 39
3	46.8 - 47.8	14	0 - 49
4	6.6 - 7.6	15	0 - 39
5	10.2 - 11.2	16	0 - 39
6	28.5 - 29.5	17	0 - 29
7	8.0 - 9.0	18	0 - 59
8	3.0 - 3.5	19	0 - 19
9	5.1 - 6.1	-	-
10	12.5 - 13.5	-	-
11	13.9 - 14.9	-	-

de responsabilidade única da rede externa, tal barramento é utilizado também como barra *slack* no FP-CA.

A. Resultados

Primeiramente, o problema energético dado pelo mercado P2P é resolvido. Na primeira iteração da metodologia proposta, onde a diferenciação do produto é nula, todo *peer* tende a negociar com todos os outros *peers*, uma vez que nesta etapa não é considerado qualquer característica física da rede. O valor da função objetivo, ou seja, o *Social Welfare* é de \$ 3936,41.

Uma vez estabelecido todas as transações entre os *peers* (P_n e P_{nm}) de maneira a minimizar os custos totais, o

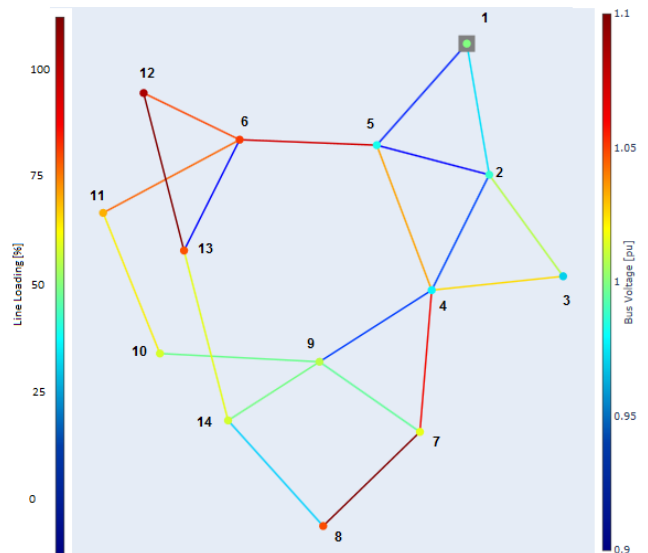


Fig. 4. Primeira iteração da metodologia proposta.

problema passa para a etapa 2 da metodologia, onde é calculado um FP-CA chegando aos resultados expostos na Figura 4.

O carregamento das linhas e as tensões nas barras após esta primeira iteração são apresentados na Tabela II e Tabela III, respectivamente. Estão destacados em negrito as linhas que violam o carregamento máximo e as barras que violam

Tabela II
CARREGAMENTO DAS LINHAS APÓS A PRIMEIRA ITERAÇÃO.

Linha	Carregamento (%)	Linha	Carregamento (%)
1-2	34.49	6-12	83.43
1-5	15.89	6-13	13.25
2-3	56.67	7-8	136,70
2-4	19.60	7-9	46.87
2-5	11.89	9-10	47.77
3-4	67.67	9-14	49.21
4-5	73.58	10-11	65.49
4-7	90.18	12-13	106.47
4-9	18.47	13-14	62.77
5-6	92.77	8-14	32.89
6-11	80.25	-	-

Tabela III
TENSÃO E ÂNGULO DAS BARRAS APÓS A PRIMEIRA ITERAÇÃO.

Barra	Tensão (p.u.)	Ângulo (rad)	Barra	Tensão (p.u.)	Ângulo (rad)
1	1.000	0.000	8	1.048	3.691
2	0.987	-0.334	9	1.009	1.394
3	0.970	-2.727	10	1.013	1.734
4	0.978	-1.102	11	1.032	3.241
5	0.983	-0.425	12	1.086	7.215
6	1.051	4.643	13	1.047	4.464
7	1.016	1.765	14	1.013	3.419

os limites de tensão máxima.

Um vez que houveram violações tanto no limite de carregamento de duas linhas quanto na tensão máxima de outras duas barras, uma segunda iteração ocorre. Nesta segunda iteração Δ_{nm} e γ_{nm} são atualizados, o primeiro com os valores das distâncias entre todos os *peers* e o segundo termo penalizando especificamente as transações que mais influenciaram as violações das restrições.

Com a atualização da parcela PD_n na fob, os *peers* recebem um incentivo para que negociem prioritariamente com seus vizinhos e as transações P_{nm} que causaram as violações na iteração 1 são penalizadas para que os *peers* envolvidos priorizem outras transações.

Após os cálculos da etapa 1 e etapa 2 (FP-CA) da segunda iteração tem-se os resultados expostos na Figura 5.

As principais alterações que ocorrem de uma iteração para outra no carregamento das linhas e tensões nas barras são:

- O carregamento da *linha*₁₂₋₁₃ passa de 106.47% para **70.31%**, não violando mais a restrição (8);
- O carregamento da *linha*₇₋₈ passa de 136,70% para **155.94%**, indicando assim que as penalizações γ_{nm} não foram suficientes e devem ser aumentadas. Neste caso específico, a parcela Δ_{nm} se sobrepõe à parcela γ_{nm} , favorecendo com que os *peers* que contribuem para o carregamento dessas linhas troquem mais energia entre si;
- A tensão na barra 6 passa de 1.051 p.u. para **1.035 p.u.**, não havendo mais violação de tensão nesta barra;
- A tensão na barra 12 diminui de 1.086 p.u. para **1.054 p.u.**, ainda extrapolando o limite máximo;
- A tensão na barra 8, antes de 1.048 p.u. passa a violar a restrição (7) chegando a **1.053 p.u.**, isso deve-se ao fato do aumento da geração nesta barra, uma vez que o

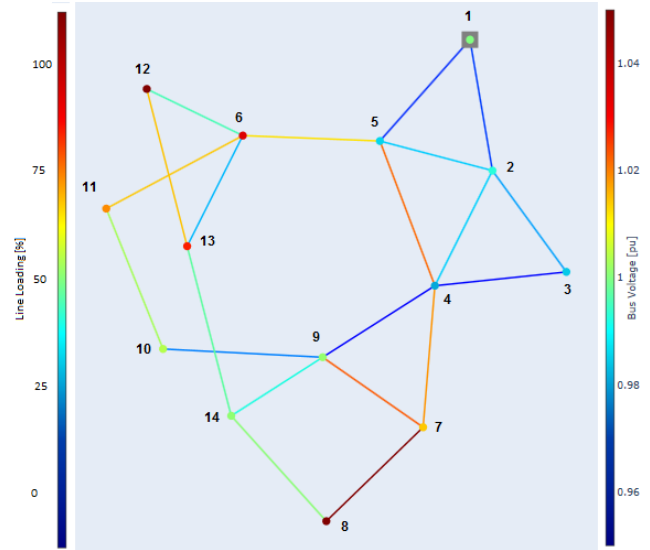


Fig. 5. Segunda iteração da metodologia proposta.

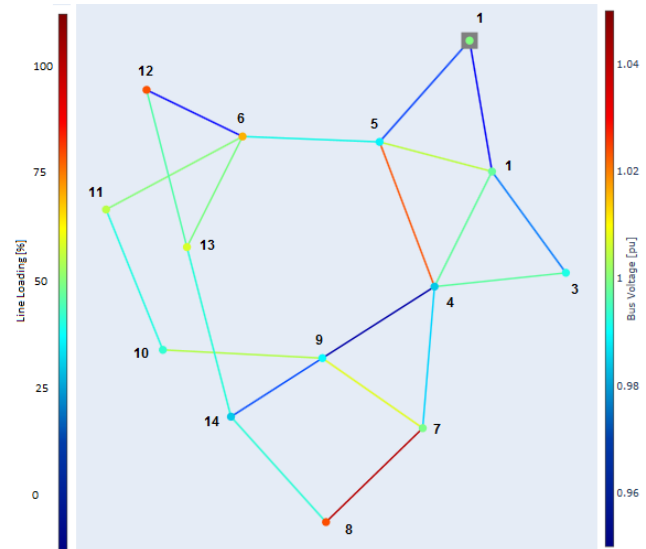


Fig. 6. Resultado final da metodologia proposta.

gerador 14, alocado nesta barra, passa a negociar mais energia com os outros *peers*.

Uma vez que ainda tem-se violações nas restrições de rede, mais iterações são necessárias. A metodologia proposta segue o fluxograma da Figura 2 e após 6 iterações consegue atingir uma configuração de transações entre *peers* que não viole nenhuma das restrições impostas.

Após a convergência o sistema encontra-se como mostrado na Figura 6.

A Tabela IV mostra a evolução do *Social Welfare* ao longo das 6 iterações. Como a cada iteração aumenta-se as restrições do problema afim de não violar os padrões desejados, tem-se uma diminuição do *Social Welfare*. Essa diminuição é o preço a ser pago para que todas as restrições de rede sejam atendidas, demonstrando a importância extrema de se considerar a parte elétrica nos problemas de mercado P2P de energia. O problema ótimo energético pode estar bastante distante de uma solução viável do sistema elétrico.

Tabela IV
VALORES DE *Social Welfare* AO LONGO DAS ITERAÇÕES.

<i>Social Welfare</i> (\$)	Iter 1	Iter 2	Iter 3
	3936.41	2621.24	1808.66
	Iter 4	Iter 5	Iter 6
1389.30	1139.25	607.47	

Tabela V
RESULTADO FINAL DA GERAÇÃO E CARGA DE TODOS OS *peers*.

<i>Consumidores</i> (Peer em MW)		<i>Geradores</i> (Peer em MW)	
1	20.7	12	17.83
2	93.2	13	39.00
3	46.8	14	30.77
4	6.6	15	39.00
5	10.2	16	39.00
6	28.5	17	11.93
7	8.0	18	59.00
8	3.0	19	12.20
9	5.33	-	-
10	12.5	-	-
11	13.9	-	-

Os resultados finais de demanda e geração P_n são mostrados na Tabela V e os valores finais de todas as transações bilaterais P_{nm} são expostos na Tabela VI.

Vale destacar que apesar da diminuição do *Social Welfare* há também uma grande diminuição das perdas elétricas do sistema, uma vez que os *peers* passam a priorizar as transações com os parceiros mais próximos fisicamente. A evolução das perdas ao longo das iterações é exposta na Tabela VII, onde se verifica que entre a iteração 1 e 6 há uma diminuição das perdas em 77.75%.

IV. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta uma metodologia coordenativa para a otimização de transações bilaterais de energia elétrica P2P levando em consideração as restrições físicas da rede elétrica. Para tal, realiza-se a divisão do problema principal em dois subproblemas (energético e elétrico) e utiliza-se de um processo iterativo e coordenado para a

Tabela VI
RESULTADO FINAL DA GERAÇÃO E CARGA DE TODOS OS *peers*.

P_{nm}	Valor (MW)	P_{nm}	Valor (MW)	P_{nm}	Valor (MW)
P_{1-15}	16.26	P_{3-16}	2.90	P_{7-14}	8.00
P_{1-17}	4.44	P_{3-17}	7.50	P_{8-16}	3.00
P_{2-13}	33.76	P_{3-18}	8.43	P_{9-12}	5.33
P_{2-14}	8.87	P_{4-16}	6.60	P_{10-12}	12.50
P_{2-18}	50.57	P_{5-16}	10.20	P_{11-14}	13.90
P_{3-13}	5.24	P_{6-16}	16.30	-	-
P_{3-15}	22.74	P_{6-19}	12.20	-	-

Tabela VII
PERDAS DO SISTEMA AO LONGO DAS ITERAÇÕES.

Perdas Iter 1		Perdas Iter 2		Perdas Iter 3	
p_mw	q_mvar	p_mw	q_mvar	p_mw	q_mvar
11.51	13.85	5.37	5.38	3.64	3.59
Perdas Iter 4		Perdas Iter 5		Perdas Iter 6	
p_mw	q_mvar	p_mw	q_mvar	p_mw	q_mvar
3.18	3.20	2.92	3.09	2.56	2.92

resolução destes. Os resultados de cada um dos subproblemas são utilizados de forma iterativa na solução do outro. Os resultados obtidos com o sistema de distribuição de 14 barras modificado, permitem avaliar a eficácia da metodologia proposta para uma posterior aplicação desta em problemas de maior porte. Observa-se que a resolução do problema P2P de troca de energia elétrica do ponto de vista puramente energético, embora conduza a um *social welfare* elevado (\$3936.41), pode culminar em resultados que não atendem as restrições da rede elétrica, levando, neste estudo, ao sobrecarregamento das linhas '7-8' e '12-13' e sobretensão nas barras '6' e '12'. Assim é de extrema importância a utilização de metodologias capazes de validar o impacto das transações P2P na rede elétrica. Ambos os subproblemas (energético e elétrico) são solucionados de forma coordenada, permitindo obter uma solução ótima de mercado que seja fisicamente exequível, garantindo assim uma operação segura da rede elétrica. Outro benefício proporcionado ao sistema pelo método proposto é a diminuição das perdas elétricas em 77.75%.

V. TRABALHOS FUTUROS

A seguir são apresentadas algumas sugestões de desenvolvimentos futuros, dando continuidade à linha de pesquisa descrita no presente trabalho:

- Aplicação em sistemas de maior porte;
- Aplicação de diferentes pesos e ponderações nas penalizações entre as transações P2P;
- Implementar diferentes métricas de penalização (distância entre *peers*, diminuição de perdas elétricas, tipo de energia à ser comprada por cada *peers*, etc.);
- Realizar a integração do problema energético com o problema elétrica e realizar uma otimização conjunta destes.
- Realizar um estudo comparativo entre as diferentes técnicas de resolução do problema de mercados de energia centrados no prosumidor existentes na literatura.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte dado pela Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES), Fundação de Amparo à Pesquisa no Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e INERGE.

ANEXO

REFERENCES

- [1] B. Dudley *et al.*, "Bp statistical review of world energy," *BP Statistical Review, London, UK, accessed Aug*, vol. 6, p. 2018, 2018.
- [2] I. E. Agency., *Renewables 2017: Analysis and Forecasts to 2023*. Organization for Economic, 2018.
- [3] M. L. Di Silvestre, S. Favuzza, E. R. Sanseverino, and G. Zizzo, "How decarbonization, digitalization and decentralization are changing key power infrastructures," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 93, pp. 483–498, 2018.
- [4] IRENA, "10 years: Progress to action." <https://www.irena.org/publications>, 2020. Accessed: 2020-01-19.
- [5] S. B. Jacobs, "The energy prosumer," *Ecology LQ*, vol. 43, p. 519, 2016.
- [6] Y. Parag and B. K. Sovacool, "Electricity market design for the prosumer era," *Nature energy*, vol. 1, no. 4, pp. 1–6, 2016.

Tabela VIII
DADOS DO SISTEMA.

Linha	De	Para	R	X	B	Tamanho (km)
1	1	2	0.01938	0.05917	0.0528	4.8738
2	1	5	0.05403	0.22304	0.0492	3.9278
3	2	3	0.04699	0.19797	0.0438	2.8833
4	2	4	0.05811	0.17632	0.034	3.3529
5	2	5	0.05695	0.17388	0.0346	1.7486
6	3	4	0.06701	0.17103	0.0128	1.7300
7	4	5	0.01335	0.04211	0.45	2.8835
8	4	7	0.000	0.20912	0.55	1.7696
9	4	9	0.000	0.55618	0.32	2.7540
10	5	6	0.000	0.25202	0.45	2.5671
11	6	11	0.09498	0.1989	0.18	1.3472
12	6	12	0.12291	0.25581	0.32	1.8832
13	6	13	0.06615	0.13027	0.32	1.9912
14	7	8	0.000	0.17615	0.32	1.0432
15	7	9	0.000	0.11001	0.32	1.0000
16	9	10	0.03181	0.0845	0.32	1.2901
17	9	14	0.12711	0.27038	0.32	1.8344
18	10	11	0.08205	0.19207	0.12	1.8044
19	12	13	0.22092	0.1988	0.12	1.5232
20	13	14	0.17093	0.34802	0.12	2.6787
21	8	14	0.17093	0.3802	0.12	4.6787

- [7] D. Botelho, B. Dias, L. de Oliveira, T. Soares, I. Rezende, and T. Sousa, "Innovative business models as drivers for prosumers integration-enablers and barriers," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 144, p. 111057, 2021.
- [8] R. Luthander, J. Widén, D. Nilsson, and J. Palm, "Photovoltaic self-consumption in buildings: A review," *Applied energy*, vol. 142, pp. 80–94, 2015.
- [9] E. Union, "Directive (eu) 2018/2001 of the european parliament and of the council of 11 december 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources," *Official Journal of the European Union*, vol. 5, pp. 82–209, 2018.
- [10] H. Ibrahim, A. Ilinca, and J. Perron, "Energy storage systems—characteristics and comparisons," *Renewable and sustainable energy reviews*, vol. 12, no. 5, pp. 1221–1250, 2008.
- [11] M. R. Alam, M. St-Hilaire, and T. Kunz, "Peer-to-peer energy trading among smart homes," *Applied energy*, vol. 238, pp. 1434–1443, 2019.
- [12] C. Zhang, J. Wu, Y. Zhou, M. Cheng, and C. Long, "Peer-to-peer energy trading in a microgrid," *Applied Energy*, vol. 220, pp. 1–12, 2018.
- [13] T. Sousa, T. Soares, P. Pinson, F. Moret, T. Baroche, and E. Sorin, "Peer-to-peer and community-based markets: A comprehensive review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 104, pp. 367–378, 2019.
- [14] F. Teotia and R. Bhakar, "Local energy markets: Concept, design and operation," in *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*, pp. 1–6, IEEE, 2016.
- [15] A. Shrestha, R. Bishwokarma, A. Chapagain, S. Banjara, S. Aryal, B. Mali, R. Thapa, D. Bista, B. P. Hayes, A. Papadakis, *et al.*, "Peer-to-peer energy trading in micro/mini-grids for local energy communities: A review and case study of nepal," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 131911–131928, 2019.
- [16] J. Guerrero, A. C. Chapman, and G. Verbič, "Decentralized p2p energy trading under network constraints in a low-voltage network," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 10, no. 5, pp. 5163–5173, 2018.
- [17] D. Botelho, P. Peters, L. Oliveira, B. Dias, T. Soares, and C. Moraes, "Prosumer-centric p2p energy market under network constraints with tdf's penalization," in *2021 IEEE Madrid PowerTech*, pp. 1–6 (in press), IEEE, 2021.
- [18] T. Orlandini, T. Soares, T. Sousa, and P. Pinson, "Coordinating consumer-centric market and grid operation on distribution grid," in *2019 16th International Conference on the European Energy Market (EEM)*, pp. 1–6, IEEE, 2019.
- [19] G. Hug, S. Kar, and C. Wu, "Consensus+ innovations approach for distributed multiagent coordination in a microgrid," *IEEE Transactions on Smart Grid*, vol. 6, no. 4, pp. 1893–1903, 2015.
- [20] L. Thurner, A. Scheidler, F. Schäfer, J.-H. Menke, J. Dollichon, F. Meier, S. Meinecke, and M. Braun, "pandapower—an open-source python tool for convenient modeling, analysis, and optimization of electric power systems," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, no. 6, pp. 6510–6521, 2018.
- [21] T. J. Ypma, "Historical development of the newton–raphson method," *SIAM review*, vol. 37, no. 4, pp. 531–551, 1995.