

OTIMIZAÇÃO ENERGÉTICA DE UM SISTEMA ELÉTRICO ISOLADO*

*José Ronaldo Silveira Júnior¹
Danilo Iglesias Brandão²
Braz de Jesus Cardoso Filho³
Sidelmo Magalhães Silva⁴
Marcos Paulo Brito Gomes⁵
Adriano Felício de Freitas⁶*

Resumo

Esse estudo considera a conexão de usinas solares e um banco de baterias em um sistema elétrico isolado com o objetivo de reduzir o uso de geradores diesel existentes. Um algoritmo de otimização é utilizado para coordenar o gerenciamento dos recursos energéticos considerando a melhor solução de operação que minimiza os custos de operação do sistema em diversos cenários. Foram avaliados cenários de suprimento de energia através de geradores diesel puramente. Em seguida foi avaliada a inclusão de uma usina solar, e em posterior a inclusão do armazenamento de energia por banco de baterias. Os resultados demonstraram que o banco de baterias viabiliza o uso da energia fotovoltaica existente, além de otimizar o uso dos geradores térmicos com a operação de apenas uma máquina diesel.

Palavras-chave: Sistema Isolado; Geração Fotovoltaica, Geração Diesel; Armazenamento Energia.

ENERGY OPTIMIZATION OF AN ISLANDED ELECTRIC POWER SYSTEM

Abstract

This study considers the connection of solar power plants and an energy storage system based in a battery bank aiming at reducing the use of existing diesel generators. An optimization algorithm is used to evaluate the management of the energy resources, considering the best operating solution that minimizes the costs of operating the system in several scenarios. Different energy supply scenarios were evaluated using only diesel generators, followed by the evaluation of the operation of the system when adding the solar power station and the battery energy storage. The results demonstrate that the battery bank maximizes the use of existing photovoltaic energy and optimizes the use of thermal generators with the operation of a single diesel engine.

Keywords: Isolated System; Photovoltaic Generation, Diesel Generation; Energy Storage

¹ Engenheiro, Mestre, Estudante, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, Brasil
² Engenheiro, Doutor, Professor, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, Brasil
³ Engenheiro, Doutor, Professor, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, Brasil
⁴ Engenheiro, Doutor, Professor, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, Brasil
⁵ Engenheiro, Estudante, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, Brasil
⁶ Engenheiro, Mestre, Estudante, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, Brasil.

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a geração de energia elétrica para cargas isoladas é predominantemente térmica, descentralizada, à base de óleo diesel e caracteriza-se pela grande dificuldade de logística de abastecimento. Dessa forma, é fundamental adotar medidas que visem eliminar desperdícios, reduzir custos e aumentar a eficiência do produção de energia, de modo a tornar tais operações mais competitivas e ao mesmo tempo, mais sustentáveis [1-2]. Nesse sentido esse trabalho avalia um sistema elétrico isolado que atualmente é abastecido através de uma Usina Térmica com 5.878 kW de capacidade instalada, dividida em quatro geradores diesel. Além disso, há a operação das duas usinas solares fotovoltaicas, capazes de gerar 950 kWp de potência de pico. As três usinas atuam de forma interligada.

A inserção da fonte solar é salutar, haja vista que a localidade recebe aproximadamente 2900 horas de sol por ano, uma média de quase 8h por dia. Destaca-se porém que ainda há em torno de 90% do abastecimento de energia feito em base térmica e às custas da queima de combustíveis fósseis. Dessa forma há a necessidade de mais estudos e investimentos que propiciem a redução do uso dos geradores diesel atualmente em funcionamento. Ante ao exposto, esse estudo tem o objetivo de avaliar alternativas que permitam a redução do uso dos geradores diesel em funcionamento no sistema elétrico do estudo de caso, sendo que para isso será considerada a conexão das usinas solares existentes e a inclusão de armazenamento de energia elétrica através de um banco de baterias de grande porte. A Figura 1 apresenta o unifilar proposto para o estudo em questão, onde pode-se notar a conexão dos geradores diesel na barra 5 e das usinas fotovoltaicas na barra 7, representadas como uma única usina solar.

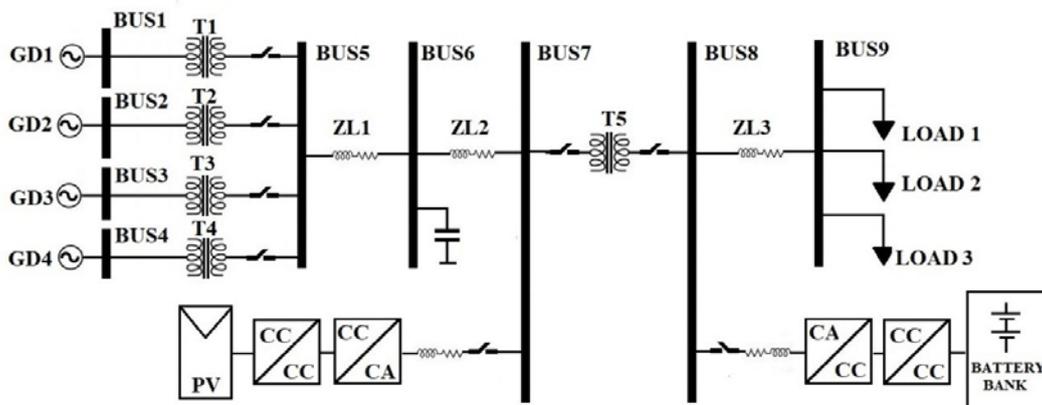


Figura 1. Unifilar do sistema elétrico isolado

2 DESENVOLVIMENTO

A resolução de um problema de fluxo de potência de um sistema com geradores distribuídos (GDs) consiste na busca por uma solução, em regime permanente, para um dado ponto de operação. Um ponto de operação consiste em uma determinada condição de geração e carga para a rede analisada, sujeita à restrições operativas e atuação dos dispositivos de controle [3]. As restrições operativas são: carregamento das redes e dos transformadores, capacidade máxima de geração das fontes e valor de tensão nas barras. Como dispositivos de controle podemos citar: transformadores defasadores, transformadores com *tap* variável, capacitores, compensadores síncronos, etc. Como ferramenta para resolução desse

tipo de problema destaca-se o MATPOWER [4] como uma importante ferramenta para os sistemas elétricos de potências. O MATPOWER é um pacote do Matlab™ M-files desenvolvido por pesquisadores da PSERC (*Power Systems Engineering Research Center*) da *Cornell University*. A ferramenta é uma poderosa ferramentacitada na literatura para a resolução de fluxo de potência, bem como problemas relacionados à otimização de fluxo de potência (OPF). Os métodos OPF utilizados para corrente alternada (c.a.) pelo MATPOWER são *Newton-Raphson*, *Fast-Decoupled* (versões *XB* e *BX*) e *Gauss-Seidel*, sendo utilizados para encontrar a melhor solução de operação de uma rede que minimiza os custos de operação do sistema. Também há um método para utilização em sistemas em corrente contínua (c.c.), embora haja na literatura poucas aplicações desse método para otimização e gerenciamento dos recursos energéticos distribuídos [5-8].

Nesse estudo será considerado o método *Newton-Raphson*, para encontrar a melhor solução que minimiza os custos de operação do sistema isolado do estudo de caso. A escolha desse método se deve ao fato de ser o mais comumente utilizado na literatura para resolução de problemas relacionados com otimização de fluxo de potência em sistemas de transmissão. Uma vez carregada a simulação com os dados do sistema elétrico do estudo de caso, o comando retorna valores de módulo e ângulo das tensões, potências ativa e reativa e perdas para cada cenário estudado, considerando o despacho econômico das fontes de geração de energia. Também foi utilizado o MatLab/Simulink para simulação e análise do sistema, nesse caso usando blocos customizados, no domínio fasorial.

2.1 Cargas do sistema elétrico do estudo de caso

As cargas foram divididas em três grupos, sendo a carga 1 de 675 kVA e fator de potência de 0,95 indutivo; carga 2 de 375 kVA e fator de potência de 0,98 indutivo; e carga 3 de 345 kVA e fator de potência de 0,92 indutivo. Os fatores de potência foram estimados. Na Figura 2 é apresentada a curva de carga consolidadas como numa barra única e em base horária em um período de 24 horas.

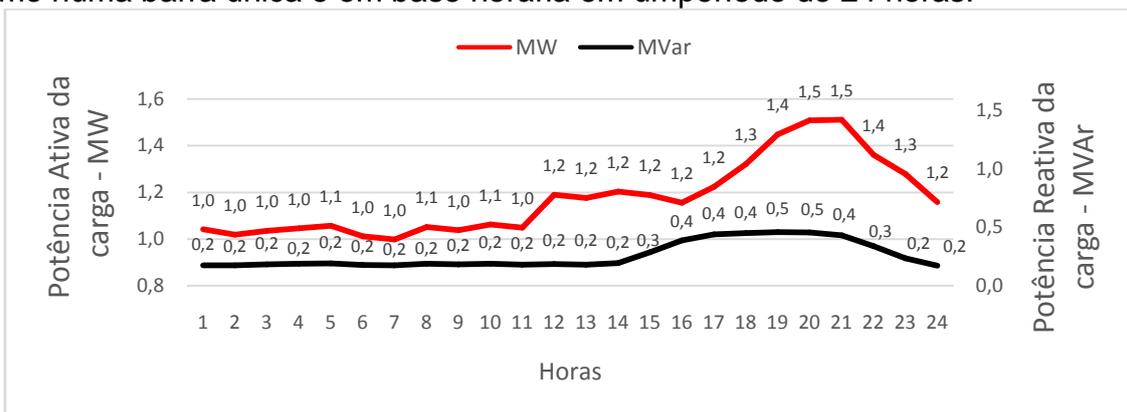


Figura 2. Consumo horário de energia consolidados das cargas

2.2 – Sistema de geração diesel

Geradores diesel são comumente utilizado em regiões isoladas para o suprimento de energia elétrica. Além disso, esse equipamento permite mitigar a variabilidade de fontes renováveis como a solar e eólica, quando existentes. Grupos geradores a diesel possuem uma geração mínima recomendada em torno de 30%

da capacidade nominal [9]. Esse limitador é importante para evitar elevadas correntes de excitação capazes de danificar o circuito do gerador, o que ocorre quando há baixas cargas. Outro cuidado que deve se ter com grupo geradores é que não se deve parar instantaneamente os geradores após um período de operação com carga [9].

Na Figura 3 é apresentada a eficiência dos geradores da marca Cummins existentes na UTE do estudo de caso para diferentes percentuais de utilização das máquinas. Tais equipamentos operam na tensão de 380 V [9]. Observa-se que o Gerador 2 de 900 kW é mais ineficiente que os demais geradores G1, G3 e G4 de 1.286 kW para a mesma condição de utilização do equipamento. Percebe-se também que para baixas utilizações das máquinas a eficiência é menor. Nesse caso a quantidade de combustível utilizada é maior, o que afeta diretamente os custos de operação do sistema.

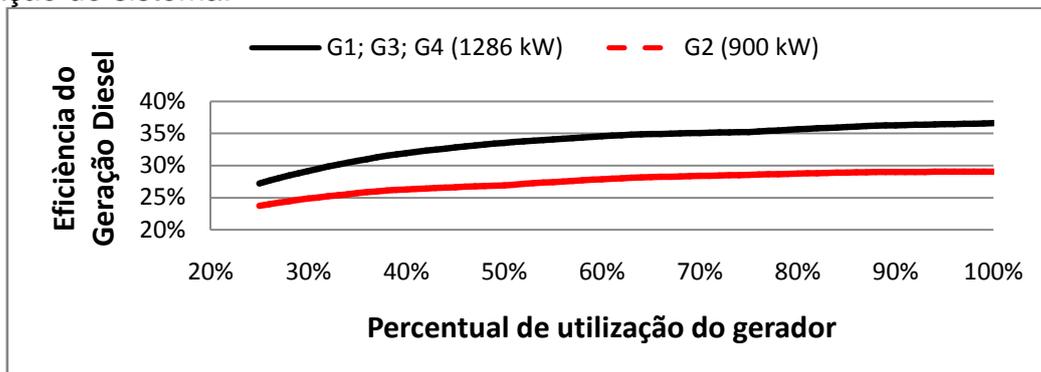


Figura 3. Eficiência dos geradores diesel da marca Cummins do estudo de caso: Poder Calorífico Superior do Diesel = 9,16 kcal/litro e 1 kcal = 0,00116 kWh
Fonte: Adaptado de [9]

2.3 – Avaliação do recurso solar

De uma forma geral os sistemas fotovoltaicos são constituídos por módulos fotovoltaicos operando em tensões de até 600V; conversores elevadores, usados para elevar a tensão contínua para níveis superiores; e inversores, usados para converter a tensão contínua em tensão alternada, sendo possível a distribuição pela rede de distribuição e transmissão. Dessa forma, como os dados meteorológicos do estudo de caso não estão disponíveis, a modelagem dos painéis fotovoltaicos mais a eletrônica de potência necessária pode ser feita considerando uma fonte de corrente. A potência gerada é sincronizada a partir da fase da rede de distribuição e a amplitude do perfil de corrente é modelada como uma onda senoidal de amplitude máxima de 70A de pico, sendo capaz de injetar portanto 966 kWp de energia (13,8 kV x 70 A = 966 kWp), aproximadamente do porte da GD solar existente na ilha. Na Figura 4 é possível observar o resultado final da simulação com a geração horária de energia do sistema fotovoltaico do estudo de caso.

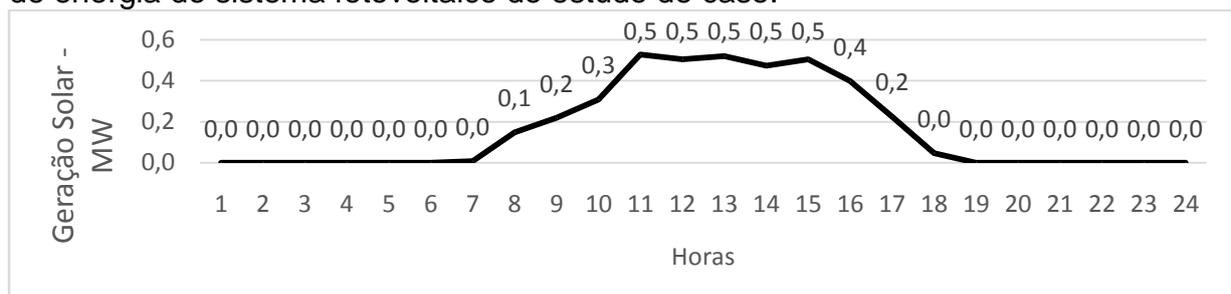


Figura 4. Simulação de geração horária de energia do sistema fotovoltaico

2.4 – Sistema de armazenamento de energia

Um sistema de armazenamento de energia típico é composto por: unidade de armazenamento, controlador de carga, inversor e carga. A unidade de armazenamento de energia mais popular é o banco de baterias que é um dispositivo destinado a transformar energia química potencial em energia elétrica. As aplicações possíveis para bancos de baterias incluem desde a integração de geração distribuída (GD) à utilização em serviços auxiliares, como sistemas de *back-up*, controle do fator de potência, entre outros.

Cada vez que a bateria sai de seu estado de carga plena, descarrega e é recarregada novamente, completando um ciclo.

A profundidade de descarga é resultado do tempo e da corrente de descarga, dessa forma estabelece o limite de energia que se pode retirar da bateria. Quanto mais profundos forem as descargas menor será a sua vida útil [10]. Em ambos os casos considera-se que o acumulador chega ao final de sua vida, quando atinge 80% de sua capacidade nominal [10].

Assim como os painéis fotovoltaicos, bancos de baterias operam em tensões inferiores à da rede elétrica, sendo necessária a utilização de conversores, inversores e controladores de carga para que opere em condições satisfatórias. Dessa forma, o banco de baterias mais a eletrônica de potência também podem ser modelados usando uma fonte de corrente. Novamente, os ângulos fase são obtidos a partir de medições das tensões da rede e a amplitude de corrente é um valor constante que alimenta as três fases.

Para este trabalho, a entrada em operação do banco de baterias se dará em momentos específicos com eventuais descargas profundas, por isso o melhor tipo de bateria para essa ocasião é chumbo ácido modificadas para sistemas fotovoltaicos, de modo que o tempo de vida útil seja prolongado. Como se trata de um sistema isolado, não há necessidade das baterias serem carregadas preferencialmente pela energia fotovoltaica. Nesse caso, do ponto de vista do menor custo, será considerado que o banco de baterias carregue nos momentos de menor demanda dos geradores diesel, com o intuito de aumentar o seu carregamento e com isso colocá-los num patamar de maior eficiência. Por outro lado, o banco de baterias será descarregado no momento de maior demanda, no período de 19 até 22 horas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa etapa são apresentados os resultados e análises dos testes realizados para o sistema isolado do estudo de caso. Para fins de simulação computacional, foram considerados os seguintes cenários para o sistema isolado em questão:

- Cenário 1: Suprimento exclusivamente através de geradores diesel;
- Cenário 2: Suprimento através de geradores diesel e fonte fotovoltaica;
- Cenário 3: Suprimento através de geradores diesel + fonte fotovoltaica + armazenamento de energia por banco de baterias.

Em todos os cenários o objetivo será o suprimento da carga conforme valores indicados na Figura 2. Para análise dos resultados serão considerados e ilustrados os perfis de potência de cada fonte, bem como o consumo de combustível em cada situação. As simulações serão feitas no ambiente do Matlab/Simulink sendo que o MATPOWER será a ferramenta para resolver os problemas de minimização de custos e para encontrar a melhor solução de operação da rede.

3.1 – Cenário 1- Suprimento exclusivamente através de geradores diesel

O cenário 1 considera o sistema operando de forma que a potência demandada pelas cargas seja suprida somente pelos geradores diesel. A produção de energia dos geradores varia conforme acompanham a variação de demanda da carga ao longo do dia, sendo que para baixas utilizações das máquinas, a eficiência é menor. Nesse caso, o custo de operação será maior em função do aumento do consumo de combustível.

Na Figura 5 são apresentados os custos de operação dos geradores para diferentes percentuais de utilização da capacidade plena das máquinas. Os valores são apresentados considerando o diesel a R\$3,321/litro conforme indicado pela Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis para o estado de Pernambuco em abril de 2018 [11]. Observa-se que o gerador G2 de 900 kW apresenta um custo maior que os demais geradores G1, G3 e G4 de 1.286 kW para a mesma condição de carregamento. Considerando o despacho econômico, esse fato, indica que o gerador G2 será sempre o último gerador a ser colocado em funcionamento pelo algoritmo de otimização. Como G1, G3 e G4 são idênticos e suficientes para suprir a carga, nesse caso a demanda poderá ser dividida nas três máquinas. Considerando o perfil da carga a ser suprida, ilustrada na Figura 2, a qualquer momento pelo menos dois geradores são capazes de atender à demanda. Dessa forma, serão consideradas as operações dos geradores G1 e G3. O Gerador G4 será desligado. Essa situação permite o aumento do carregamento dos geradores em funcionamento e os coloca em níveis de eficiência maior, com isso o custo de operação se reduz.

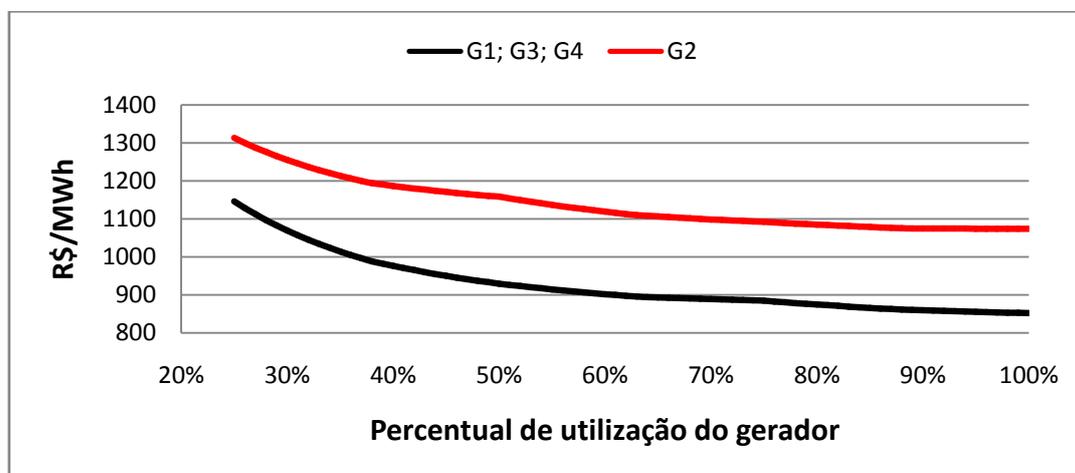


Figura 5. Custo de produção dos geradores diesel. Adotado diesel a R\$3,321/litro, Fonte: Adaptado de [9] e de [11]

Na Tabela 1 são apresentados os resultados consolidados de perdas, geração, carga e custos após um dia de operação no Cenário 1. Verifica-se que os geradores G1 e G3 atenderam à demanda da carga, conforme previsto, e o custo dessa operação foi de R\$ 27,3 mil por dia. A Figura 6 apresenta os resultados dos perfis de potência ativa gerada por cada fonte de geração no Cenário 1.

Tabela 1. Resultados de um dia de operação no Cenário 1

Cenário 1	Geração		Carga		Perdas		Custo
	P(MWh)	Q (MVArh)	P(MWh)	Q (MVArh)	P(MWh)	Q (MVArh)	Mil R\$
	28,7	7,2	28,1	6,6	0,6	0,7	27,3

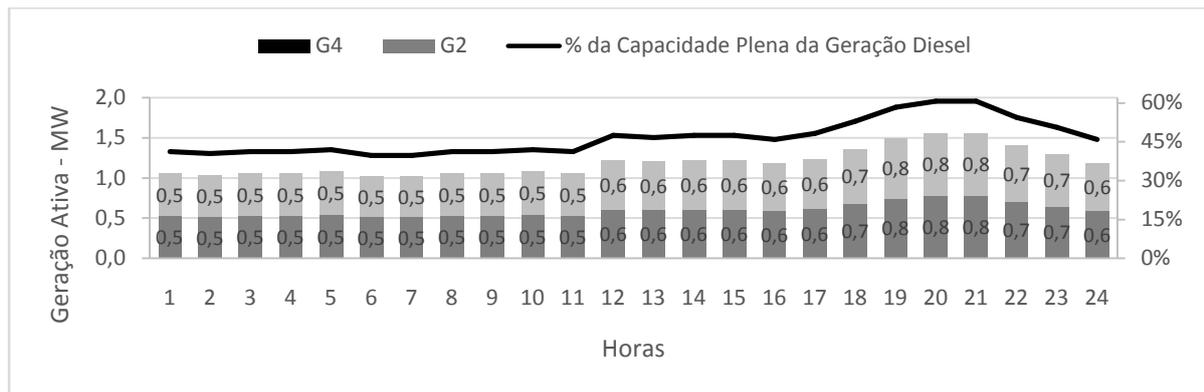


Figura 6. Potência ativa: geração das fontes no cenário 1

3.2 – Cenário 2- Suprimento através de geradores diesel e fonte fotovoltaica

O cenário 2 considera suprimento através de geradores diesel do Cenário 1, adicionado da conexão da usina solar existente. Assim como qualquer outra fonte de eletricidade, o custo da energia gerada por células fotovoltaicas consiste essencialmente dos custos de capital e operação e manutenção. O custo de capital inclui o custo de aquisição do módulo, interconexão dos módulos em forma de painel ou arranjo, estrutura de sustentação, terreno e fundações (para módulos instalados nos solo), custo do cabeamento, reguladores de carga, dispositivos de chaveamento e inversores, baterias ou conexão à rede elétrica. Embora o custo de capital ainda esteja relativamente alto, comparado a outras alternativas convencionais, o custo de operação e manutenção é baixo, visto que tal sistema não possui partes móveis e a fonte primária é solar. Todavia, os módulos requerem uma limpeza periódica devido à acumulação de sujeira, particularmente quando instalados nas áreas urbanas. Como esse estudo avaliará a etapa de operação, o custo de capital não será considerado e muito embora haja algum custo de manutenção e operação, para efeitos de simplificação o mesmo será considerado baixo o bastante para ser desconsiderado. Diante do exposto a fonte renovável será um gerador de energia regular com potência ativa e reativa fixos em base horária e custo zero de operação. Nesse sentido, o sistema fotovoltaico será modelado como uma barra P-Q como uma carga conectada à mesma, consumindo potência ativa negativa e potência reativa positiva.

A Figura7 apresenta os resultados dos perfis de potência ativa gerada por cada fonte de geração. Na Tabela 2 são apresentados os resultados consolidados após um dia de operação no Cenário 2, comparativamente com o Cenário 1. Verifica-se que os geradores G1 e G3 foram despachados para atender a demanda da carga com a fonte solar, sendo que o custo dessa operação foi de R\$ 24,7 mil, o que representa uma economia de R\$ 2,5 mil com relação ao Cenário 1. Nessa situação o sistema fica menos dependente da geração a diesel, diminuindo a participação dos geradores e o custo.No entanto, os geradores irão trabalhar em faixas de operação de menor eficiência, principalmente porque ainda será necessário a operação de duas máquinas para suprimento da carga, haja vista que, nos horários de 18 às 22 horas, a fonte solar não está disponível e a potência demandada pela carga supera a potência instalada de um único gerador. Observa-se também que nos momentos de maior geração solar, os geradores a diesel ficam abaixo de 30% da geração nominal.Nesse caso, a vida útil dos geradores fica prejudicada em razão do aumento da corrente de excitação, o que não é recomendado.

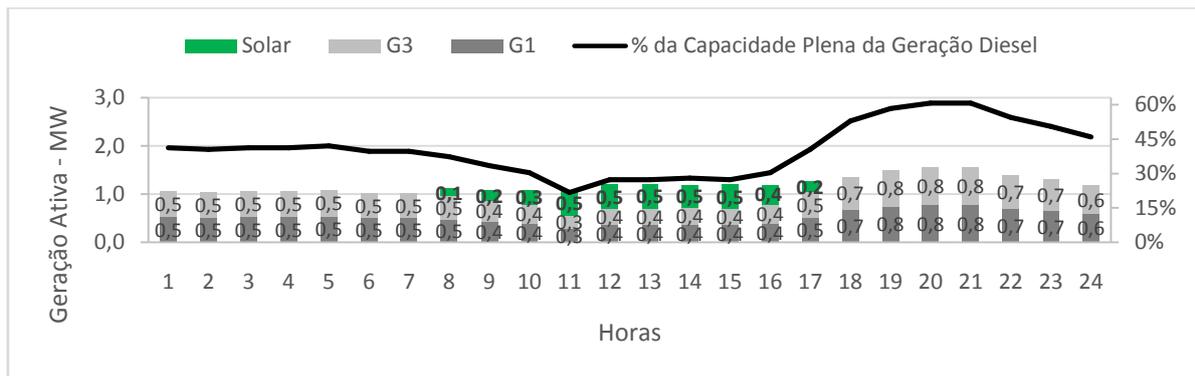


Figura 7. Potência ativa: geração das fontes no cenário 2

Tabela 2. Resultados de um dia de operação no Cenário 1 e 2

Cenários	Geração		Carga		Perdas		Custo Mil R\$	Variação*	
	P(MWh)	Q (MVAh)	P(MWh)	Q (MVAh)	P(MWh)	Q (MVAh)		Mil R\$	%
1	28,7	7,2	28,1	6,6	0,6	0,7	27,3	-	-
2	28,6	7,1	28,1	6,6	0,5	0,6	24,7	-2,5	-9,3

* Variação em relação ao Cenário 1

3.3 – Cenário 3- Suprimento através de geradores diesel, fonte fotovoltaica e armazenamento de energia por banco de baterias.

O cenário 3 considera o suprimento através da geração diesel, adicionado da conexão da usina solar existente e também da inclusão de armazenamento de energia por banco de baterias (sistema não existente). Será considerado primeiramente a operação de dois geradores diesel (Cenário 3a) e em seguida será avaliada a operação do sistema com um único gerador diesel (Cenário 3b).

É importante destacar que o banco de baterias apresenta comportamento dual, ora como carga ao ser carregado, ora como fonte de energia, nesse caso ao ser descarregado. O banco descarregará a sua energia em momentos de déficit da geração térmica e fotovoltaica ao suprir a carga. Também será considerado uma profundidade de descarga de até 50% da carga total com o intuito de conservar a vida útil das baterias. Ao carregar, o sistema de energia enxerga o banco como uma carga, nessa situação o mesmo poderá ainda operar com correção de fator de potência (fornecendo reativos capacitivos), melhorando a eficiência global. Dessa forma, o melhor momento para que essa operação ocorra será quando os geradores diesel estiverem com baixo carregamento, o que ocorre nos momentos de produção de energia da fonte solar, no período de 8 até as 17 horas (Figura 7). Assim como a fonte fotovoltaica, quando o banco de baterias opera no modo de descarga o mesmo será modelado como um gerador de energia convencional com potência ativa e reativa fixos em base horária e custo zero de operação. Nesse sentido, o banco de baterias também será modelado como uma barra P-Q com uma carga conectada na mesma consumindo potência ativa negativa e potência reativa positiva. Quando estiver carregando, o modelo será o de uma carga convencional.

- **Cenário 3a**

Nesse cenário o suprimento de energia é feito através da operação de dois geradores diesel, adicionado da fonte fotovoltaica e do armazenamento de energia por banco de baterias. A Figura 8 apresenta os resultados dos perfis de potência

ativa gerada por cada fonte de geração para o Cenário 3a. O banco de baterias é acionado para suprir a carga no período de 19 até 22 horas com injeção de 250 kW a cada hora, por outro lado, a carga das baterias ocorre em 4 horas a partir da disponibilização da fonte solar no período de 08 às 11 horas. Percebe-se que ainda há momentos em que os geradores estão abaixo de 30% da capacidade pela das máquinas, o que não é recomendado. Na Tabela 3 são apresentados os resultados consolidados para um dia de operação no Cenário 3a, comparativamente com os Cenários 1 e 2, sendo que o custo dessa operação foi de R\$ 23,1mil, o que representa uma economia diária de R\$ 4,2 Mil com relação ao Cenário 1.

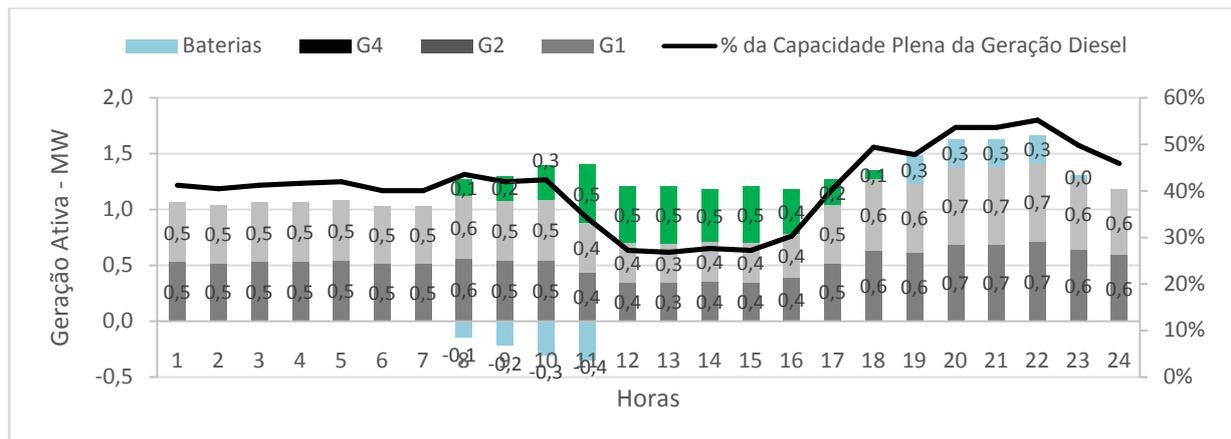


Figura 8. Potência ativa: Geração das fontes no Cenário 3a

Tabela 3. Resultados de um dia de operação no Cenário 1, 2 e 3a

Cenários	Geração		Carga		Perdas		Custo Mil R\$	Variação*	
	P(MWh)	Q (MVArh)	P(MWh)	Q (MVArh)	P(MWh)	Q (MVArh)		Mil R\$	%
1	28,7	7,2	28,1	6,6	0,6	0,7	27,3	-	-
2	28,6	7,1	28,1	6,6	0,5	0,6	24,7	-2,5	-9,3
3a	28,6	7,1	28,1	6,6	0,5	0,5	23,1	-4,2	-15,2

* Variação em relação ao Cenário 1

- **Cenário 3b**

Nesse cenário, o suprimento de energia é feito através da operação de um gerador diesel apenas, além da fonte fotovoltaica e do armazenamento de energia por banco de baterias. A Figura 9 apresenta os resultados dos perfis de potência ativa gerada por cada fonte de geração para o Cenário 3b. O banco de baterias é acionado para suprir a carga no período de 19 até 22 horas. Por outro lado, a carga das baterias ocorre em 4 horas no período de 8 às 11 horas. Verifica-se que gerador G1 é capaz de atender à demanda da carga com a fonte solar e o banco de baterias adicionados.

O uso de um único gerador diesel, adicionado da carga das baterias nos momentos de maior geração solar, coloca a máquina diesel em faixas de operação de maior eficiência, o que reduz o custo da energia produzida e evita o riscos de aumento da corrente de excitação causados por causa baixa utilização da máquina. Na Tabela 4 são apresentados os resultados consolidados para um dia de operação no Cenário 3b, comparativamente com os demais Cenários, sendo que o custo dessa operação foi de R\$ 21,8 mil, o que representa uma economia diária de R\$ 5,5 mil com relação ao Cenário 1.

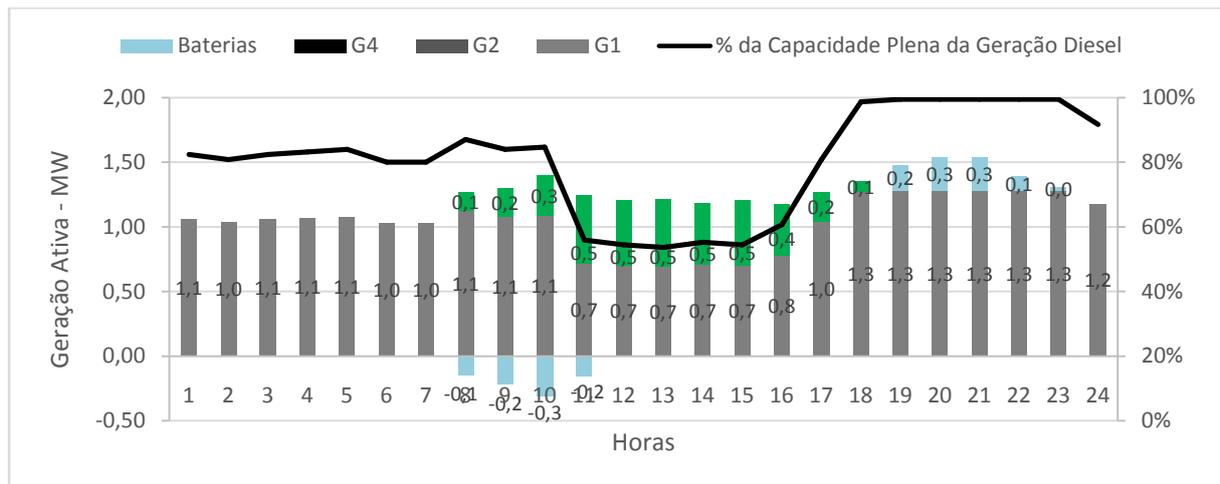


Figura 9 - Potência ativa: Geração das fontes no Cenário 3

Tabela 4. Resultados de um dia de operação no Cenário 1, 2, 3a e 3b

Cenários	Geração		Carga		Perdas		Custo Mil R\$	Variação*	
	P(MWh)	Q (MVAh)	P(MWh)	Q (MVAh)	P(MWh)	Q (MVAh)		Mil R\$	%
1	28,7	7,2	28,1	6,6	0,6	0,7	27,3	-	-
2	28,6	7,1	28,1	6,6	0,5	0,6	24,7	-2,5	-9,3
3a	28,6	7,1	28,1	6,6	0,5	0,5	23,1	-4,2	-15,2
3b	28,6	7,1	28,1	6,6	0,5	0,5	21,8	-5,5	-20,2

* Variação em relação ao Cenário 1

3.4 – Análise de viabilidade

Uma proposta preliminar para um banco de baterias com as características citadas foi cotado no mercado. O sistema possui capacidade injeção de potência de 1 MW e pode fornecer energia durante 1 hora. Vale destacar que tal instalação deverá ser realizada por uma empresa especializada através da implantação de banco de baterias de grande porte. A composição básica desse escopo é:

Sistema conversor:

- Um Conversor CC/CC que carrega e mantém em regime de flutuação a bateria de acumuladores
- O conversor será abrigado em container com sistema de ar condicionado;
- Sistema de refrigeração a água, redundante, para a ponte inversora;
- Sistema inversor para 1MVA com transformador isolador para rede, podendo ser em baixa ou média tensão, instalado em container com sistema de ar condicionado.

Bateria de acumuladores:

- Composto por 500 elementos de 2Vcc – 2000Ah/10h, bateria Selada para instalação a 25°C, com vida útil projetada de até 10 anos;
- Dimensional estimado: 20 racks cada um com as seguinte dimensões: altura: 1700 mm; largura: 2500mm; profundidade: 900mm;
- Massa Aproximada: 90 t
- A Bateria de Acumuladores, LINK CC de 1000 Vcc, para uma autonomia de 1 hora, abrigada em containers com sistema de ar condicionado.

Investimento deste Escopo: R\$ 5.000.000,00

De acordo com os dados desse estudo, o banco de bateria terá uma profundidade de descarga de 43%. Dessa forma, de acordo com [10], as baterias terão uma vida útil de aproximadamente 750 ciclos diários (Figura 10). Na (Figura 11) é feita uma avaliação econômica da inclusão do banco de baterias no estudo de caso. Essa avaliação foi feita num horizonte de 10 anos, considera a reposição das baterias após 750 ciclos e custos de reposição por baterias novas, conforme cotação feita no mercado adicionada de 25% para serviços de instalação. Nesse caso, levando a um custo de reposição aproximado de R\$ 1,0 milhão. O benefício adotado é referente à diferença do Cenário 1 com o Cenário 3b, gerando um ganho anual de R\$ 2,0 milhões (5,5 Mil R\$/dia x 365).

Os resultados dos estudos feitos até aqui demonstram que o banco de baterias viabiliza o uso da energia fotovoltaica existente, otimiza o uso dos geradores diesel e através da análise financeira verifica-se que ainda permite um Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 2,4 milhões, um Taxa Interna de Retorno (TIR) de 21% e um Payback Descontado de 5,4 anos num horizonte de 10 anos. A taxa de desconto adotada foi de 10% e o imposto de renda de 34%.

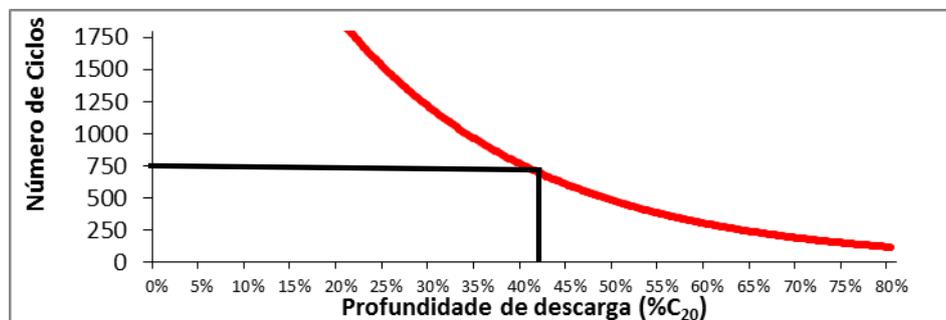


Figura 10. Possibilidade de ciclos em função da profundidade de descarga para o estudo de caso
Fonte: Adaptado de [10]

Avaliação Econômico-Financeira

		start-up										TOTAL	
Avaliação Econômica		Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9	Ano 10	
1) Redução de Custos	R\$mil		2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	20.085
EBITDA	R\$mil		2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	20.085
EBITDA	R\$mil		2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	2.009	20.085
(-) Depreciação	R\$mil		-820	-820	-820	-820	-820	-820	-820	-820	-820	-820	-8.200
Lucro Tributável	R\$mil		1.189	1.189	1.189	1.189	1.189	1.189	1.189	1.189	1.189	1.189	11.885
(-) IR	R\$mil		-404	-404	-404	-404	-404	-404	-404	-404	-404	-404	-4.041
Lucro Líquido	R\$mil		784	784	784	784	784	784	784	784	784	784	7.844
(+) Depreciação	R\$mil	0	820	820	820	820	820	820	820	820	820	820	8.200
(-) Capex	R\$mil	-5.000	0	0	-1.057	0	-1.057	0	-1.057	0	-1.057	0	-9.226
Fluxo de Caixa Livre	R\$mil	-5.000	1.604	1.604	548	1.604	548	1.604	548	1.604	548	1.604	6.818
Fluxo de Caixa Descontado	R\$mil	-5.000	1.459	1.326	412	1.096	340	906	281	748	232	619	2.418
FC Descontado Acumulado	R\$mil	-5.000	-3.541	-2.215	-1.804	-708	-368	538	819	1.567	1.800	2.418	-
TRR (%/ano) - Waac			10,0%										
IR (%)			34%										
TIR (%)			21%										
VPL (R\$mil) @ 2018			2.418										
TIRM (%)			14%										
Spread TIRM-TRR			4%										
Payback Descontado (Anos)			5,4										
VPI (R\$mil)			7.440										
VPL/VPI			0,33										

Figura 11. Avaliação Econômica Financeira

3 CONCLUSÃO

Esse estudo avaliou os recursos energéticos de uma carga isolada com o objetivo de reduzir o uso de geradores diesel no local. As usinas solares existentes contribuem para o suprimento de energia, no entanto, nos momentos de maior produção constatou-se que os geradores a diesel ficam abaixo de 30% da geração nominal, nesse caso deteriorando a sua vida útil em razão do aumento da corrente de excitação. A chave para essa questão passa pelo armazenamento de energia, o que foi avaliado através do uso de um banco de baterias de grande porte. O banco de baterias considerado possui capacidade de armazenamento de 1 MW e pode fornecer essa potência durante 1 hora. Os resultados demonstraram que o banco de baterias viabiliza o uso da energia fotovoltaica existente e otimiza o uso dos geradores diesel com a operação de apenas uma máquina diesel. Através da análise financeira, verificou-se que o investimento num banco de baterias ainda permite um Valor Presente Líquido (VPL) de R\$ 2,4 milhões, um Taxa Interna de Retorno (TIR) de 21% e um *Payback* Descontado de 5,4 anos num horizonte de 10 anos. Um banco de baterias de grande porte não existe na localidade. Dessa forma tal instalação deverá ser feita por uma empresa especializada. Os resultados do estudo de caso demonstraram também a eficácia do MATPOWER como ferramenta para resolver problemas de minimização de custos e para encontrar a melhor solução de operação de redes com GD.

REFERÊNCIAS

- 1 Moghaddam, M. H. Y., Garcia, A. L, Moghaddassian. M. On the Performance of Distributed and Cloud-Based Demand Response in Smart Grid. IEEE Transactions on Smart Grid ,vol.PP, no.99, pp.1-1, 2016.
- 2 Kilkki, O, Alahaivala, A, Seilonen. I. Optimized control of price based demand response with electric storage and space heating. IEEE Trans. on Industrial Informatics. Feb.2015
- 3 Borges, C. L. T. Análise de Sistemas de Potência. Departamento de Eletrotécnica – UFRJ, março de 2005.
- 4 Zimmerman, R. D., Murillo-Sánchez, C.E., and Thomas, R.J. MATPOWER: Steady-State Operations, Planning, and Analysis Tools for Power Systems Research and Education. IEEE Transactions on Power Systems, 2011.
- 5 Duerr, S, Ababei, C, Ionel, D.M. Load Balancing with Energy Storage Systems based on Co-simulation of Multiple Smart Buildings and Distribution Networks. 6th International Conference on Renewable Energy Research and Applications. San Diego, CA, USA, Nov. 5-8 2017.
- 6 Shengyan, S; Xiaoliu, S, Yawei, G. Research On Calculation Of Low Voltage Distribution Network Theoretical Line Loss Based On Matpower. 2011 The International Conference On Advanced Power System Automation And Protection. 2011.
- 7 Akorede, M.F, Hizam, H. Teaching Power System Analysis Courses using MATPOWER. International Conference on Engineering Education (ICEED 2009), December 7-8, Kuala Lumpur, Malaysia. 2009.
- 8 Zilberdrut, S, Cecchi. Investigating the Effects of Grid Equivalent Circuit at a Point of Common Coupling on Bus Voltage Variations due to Variable Distributed Generation. IEEE-2015 North American Power Symposium .Charlotte, NC, USA, 4-6 Oct. 2015.
- 9 Cummins Power Generator. Catálogos. [acesso em 27 mar. 2018]; Disponível em <http://www.cumminspower.com.br/bib_catalogo.asp>.
- 10 Baterias Estacionárias Ventiladas. Catálogos Moura Clean. [acesso em 31 mar. 2018]; Disponível em <<http://www.moura.com.br>>.
- 11 Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. [acesso em 12 abr. 2018]; Disponível em: <https://www.anp.gov.br/preco>