

Modelagem de uma microrrede utilizando Dinâmica de Sistemas

Priscila Ebert, Universidade Federal de Santa Maria, +55 53 999989255, pri.ebert@hotmail.com
Mauricio Sperandio, Universidade Federal de Santa Maria, +55 55 996484596, mauricio.sperandio@ufsm.br

Resumo

A busca por energia elétrica com confiabilidade e qualidade é primordial para o crescimento econômico de um país, principalmente em desenvolvimento, como o Brasil. Além disso, outro fato que torna a discussão sobre a renovação do setor elétrico mundial de suma importância é a preocupação com as questões ambientais, atualmente a matriz energética mundial tem base em combustíveis fósseis altamente poluentes e com disponibilidade limitada. Com base nestes fatores, a Geração Distribuída (GD) vem se destacando como o futuro do setor elétrico por fornecer energia em nível de distribuição reduzindo a dependência de geração de energia centralizada e melhorando a eficiência de transmissão e distribuição. É neste contexto que o presente trabalho busca apresentar a Dinâmica de Sistemas como uma nova metodologia para a modelagem de recursos energéticos distribuídos, com despacho controlado, visando o controle de demanda e redução nos custos de energia elétrica. Como estudo de caso é apresentada a modelagem energética de um sistema com geradores a etanol, utilizando os dados de demanda da Universidade Federal de Santa Maria, a fim de reduzir a conta de energia da universidade que atualmente se aproxima de 1.000.000,00 de reais.

Palavras-chave- Dinâmica de sistemas; Geração distribuída; Controle de demanda.

1. Introdução

O foco do mercado energético atualmente é diversificar as fontes de geração, aumentar a segurança e a confiabilidade do sistema e investir em eficiência energética a fim de racionalizar o consumo, esse novo modelo contrasta com o modelo tradicional que busca o retorno dos investimentos através do aumento do consumo. No modelo tradicional a geração de energia é centralizada, carecendo de extensas linhas de transmissão, com elevadas perdas e altos custos. Enquanto que no novo contexto do setor, a geração de energia tende a ser localizada próximo as cargas e com capacidades menores.

Um dos fatores que limitava a expansão desse novo mercado no Brasil era a falta de incentivo e políticas que regulamentam o setor, contudo em 2012 foi publicada a Resolução Normativa REN 482/2012 que regulamenta a mini e microgeração e estabelece o Sistema de Compensação de Energia Elétrica que permite ao consumidor trocar energia com a distribuidora, todavia essa resolução apresentava alguns pontos que precisavam ser aprimorados, então em 2015 a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) aprovou uma atualização da REN 482/2012, a chamada REN 687/2015, que define microgeração como central geradora com potência instalada de até 75 quilowatts (kW) e minigeração com potência entre 75 kW e 3 MW para fontes hídricas e menor ou igual a 5 MW para as demais fontes renováveis e geração qualificada. O sistema de compensação adotado no Brasil é semelhante ao *net metering* utilizado em alguns países, como EUA e Japão.

De acordo com a ANEEL o número de conexões de geração distribuída no Brasil passou de 1819 em outubro/dezembro de 2015 para 6670 em outubro/novembro de 2016, sendo que dessas conexões 47.266 kW são oriundos da geração solar (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA-ANEEL, 2016). Esses dados são um reflexo da publicação da REN 687/2015, que facilitou a entrada da geração distribuída no mercado brasileiro.

Tendo em vista os novos paradigmas do setor elétrico, são necessárias novas ferramentas que auxiliem no processo de planejamento e na inserção dos recursos. A falta de políticas de planejamento pode representar riscos e perda de investimento. Além da necessidade de avaliar os impactos técnicos é preciso analisar os impactos econômicos da inserção da geração distribuída em um sistema. Diante desse quadro, este trabalho apresenta a Dinâmica de Sistemas como uma ferramenta de análise econômica para sistemas distribuídos, tendo como principal objetivo o desenvolvimento de uma modelagem que apresente o retorno financeiro da inserção de GD por pequenos e médios consumidores. Como estudo de caso é apresentada uma parcela da modelagem de uma microrrede a ser instalada na Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), localizada no Sul do Brasil. Atualmente a conta de energia da universidade se aproxima de R\$ 1.000.000,00, sendo que custos de ultrapassagem da demanda contratada ocorrem esporadicamente devido a picos de poucos minutos a uma hora. Nesse caso, a geração fotovoltaica não pode ajudar. A fim de reduzir esta conta está sendo considerada a instalação de uma microrrede com GD controlável baseada em recursos disponíveis na universidade. O primeiro passo para a instalação é a análise econômica do investimento e é nesse caso que o presente trabalho tem sua relevância, apresentando a economia obtida a partir da instalação de um grupo gerador movido a etanol.

2. Biocombustíveis como alternativa ao controle de demanda

Diante da alteração do cenário energético global, os países estão em busca de fontes de energia que propiciem a redução do uso dos combustíveis fósseis, no que diz respeito aos biocombustíveis, o Brasil possui grande experiência na produção e na aplicação desse recurso, além de possuir extensa área territorial, condições de solo favoráveis e diversidade de matéria-prima. Os biocombustíveis são produzidos a partir da biomassa que pode ser de origem animal ou vegetal, sendo que os principais biocombustíveis produzidos no Brasil são o biodiesel e o etanol.

Algumas das principais vantagens dos biocombustíveis são: menor emissão de poluentes com a sua queima e produção, ao longo da sua cadeia produtiva geram empregos, são renováveis e diminuem o consumo de combustíveis fósseis, contudo possui a desvantagem de utilizar como matéria-prima recursos que precisam de amplas áreas para serem cultivados, trazendo como consequência a diminuição das áreas para plantio de alimentos e possibilidade de desmatamento (AZEVEDO; LIMA, 2016).

Apesar de o Brasil possuir uma matriz energética muito rica em recursos renováveis, como, por exemplo, a energia solar e eólica, esses recursos trazem algumas incertezas devido à intermitência que está associada a eles, com isso é necessário investir em alternativas que possam ser armazenadas e que permitam que o seu despacho seja controlado (MORATO et al., 2016). Neste contexto entram os biocombustíveis, que além de ser utilizados em motores de veículos, podem acionar grupos geradores a fim de produzir energia elétrica, assim como são utilizados os geradores a diesel atualmente. A modelagem do estudo de caso em análise é feita para o etanol, contudo pode ser adaptada para qualquer combustível apenas substituindo o processo e os custos de produção.

3. Tarifação no mercado brasileiro

A tarifação de energia no Brasil tem como base a demanda e o consumo, a demanda é dada em quilowatt e é faturada pelo maior valor medido no decorrer do período de fornecimento, enquanto que o consumo é dado em megawatt-hora e é referente ao valor acumulado durante o período de consumo (SOUZA et al., 2011). O sistema tarifário é dividido em dois grupos, Grupo A onde a tarifa de energia é binômica, na qual leva em consideração a demanda e o consumo de energia e o Grupo B onde a tarifa é monômica, baseada apenas no consumo de energia. Esses dois grupos são divididos em subgrupos, com base na tensão de fornecimento, como mostra a tabela 1.

Tabela 1- Subgrupos de consumo

Grupo	Subgrupo	Tensão de fornecimento (kV)
Grupo A	A1	Igual ou superior a 230
	A2	De 88 a 138
	A3	69
	A3a	De 30 a 44
	A4	De 2,3 a 25
	AS	Inferior a 2,3 a partir de sistema de distribuição subterrâneo
Grupo B	B1	Inferior a 2,3 – Residencial
	B2	Inferior a 2,3 – Rural
	B3	Inferior a 2,3 – Demais classes
	B4	Inferior a 2,3 – Iluminação Pública

Fonte: Elaboração própria com dados de (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA-ANEEL, 2010)

A partir desses grupos são definidas as modalidades tarifárias divididas em: Modalidade Convencional, Modalidade Horária e Modalidade Horo-Sazonal.

- Modalidade Convencional: Composta pelos consumidores integrantes do grupo A e B, sendo que consumidores dos subgrupos A3a, A4, AS só podem ser enquadrados nessa modalidade quando a demanda contratada for inferior a 300 kW. A tarifa para essa modalidade independe da hora do dia e dos períodos do ano.
- Modalidade Horária: Composta pelos consumidores do grupo B, com exceção do subgrupo B4 e para as subclasses de Baixa Renda do subgrupo B1. É representada pela Tarifa Branca, onde o preço da energia varia de acordo com o dia da semana e horário de utilização.
- Modalidade Horo-Sazonal: A tarifa varia de acordo com a hora do dia e o período de utilização da energia. É subdividida em:

Tarifa horo-sazonal verde: Aplicada aos consumidores do grupo A3a, A4 e AS. Nessa modalidade aplica-se uma tarifa para demanda e diferentes tarifas para o consumo (ponta, fora ponta, período seco e período úmido).

Tarifa horo-sazonal azul: Obrigatória para os subgrupos A1, A2 e A3 e opcional para os subgrupos A3a, A4 e AS. Nessa modalidade aplica-se diferentes tarifas para demanda (ponta e fora ponta) e diferentes tarifas para o consumo (ponta, fora ponta, período seco e período úmido).

Nas tarifas binômias é feito um contrato com a distribuidora na qual se define um valor para a demanda contratada, caso esse valor seja ultrapassado em mais de 10% o consumidor paga uma multa de ultrapassagem referente a diferença entre demanda contratada e demanda medida.

4. Estudo de caso

A modalidade tarifária adotada pela UFSM é a Tarifação horo-sazonal azul onde é necessário um contrato com a concessionária em que se estabelece um valor para demanda no horário de ponta e outro para o horário fora de ponta, o mínimo a ser cobrado é o valor contratado, se a demanda medida ultrapassar em mais de 10% a demanda contratada será aplicada a tarifa de ultrapassagem, essa tarifa possui um valor duas vezes maior do que o valor da demanda contratada. Os valores de demanda contratada pela UFSM nos períodos de ponta e fora ponta são, respectivamente, 3000 e 5000 kW. A Tabela 2 apresenta as tarifas de energia utilizadas na modelagem.

Tabela 2- Tarifas de energia em abril de 2015

Tarifa Consumo (R\$/kWh)		Tarifa Demanda (R\$/kW)		Tarifa Ultrapassagem de Demanda (R\$/kW)	
Ponta	Fora Ponta	Ponta	Fora Ponta	Ponta	Fora Ponta
0,53	0,37	19,71	12,88	39,43	25,77

Fonte: AESSul Clientes Corporativos, 2016.

Os dados utilizados de demanda são de abril de 2014 extrapolados para abril de 2015, uma vez que os dados de memória de massa só foram disponibilizados até esta data. A modelagem foi desenvolvida com o intuito de reduzir a conta de energia da universidade utilizando os recursos disponíveis no campus. A UFSM possui uma microdestilaria que transforma as bebidas alcoólicas apreendidas pela Receita Federal em etanol, em razão disso optou-se por utilizar o etanol como combustível para o gerador.

5. Estrutura do modelo

O modelo desenvolvido para o gerenciamento da demanda utilizando geradores a etanol foi desenvolvido em Dinâmica de Sistemas. Esta técnica desenvolvida por Jay W. Forrester, permite a modelagem, análise e simulação de sistemas que possuem inter-relacionamentos complexos e processos não-lineares, através dela é possível compreender a operação do sistema real, precisar os elementos de maior influência no sistema e aplicar diferentes formas de controle, obtendo assim as consequências para o sistema (ORTEGOSA, 2006). Diversos estudos relacionados ao setor elétrico vêm sendo desenvolvidos em DS, como, por exemplo, (ALVES, 1997) realiza um estudo sobre previsão de demanda no mercado residencial, (ORTEGOSA, 2006) propõe um modelo para analisar a viabilidade de substituição da energia elétrica por gás natural para o aquecimento de água em instalações comerciais, (BOURGES, 2009) apresenta um modelo para realizar o despacho, em curto prazo, de uma pequena central hidrelétrica. Esses estudos comprovam que a DS pode ser utilizada em diversos ramos do setor elétrico e que por ser uma metodologia com respostas rápidas tem sido bastante aceita tanto no meio acadêmico, como no empresarial.

Em DS existem duas abordagens para modelagem de um sistema, uma abordagem qualitativa (*soft*), na qual são apresentadas as principais variáveis e suas inter-relações através da construção de Diagramas de Laço Causal (DLC) e a abordagem quantitativa (*hard*), em que as variáveis são modeladas matematicamente a partir do Diagrama de Estoque e Fluxo (DEF).

Na Figura 1-Diagrama de Laço Causal do modelo proposto é exposto o DLC do modelo proposto com as principais variáveis envolvidas, as setas representam o vínculo entre os elementos e o sinal positivo ou negativo retrata de que forma um elemento afeta o outro. As setas em formato de círculo representam os *feedbacks*, que podem ser positivos quando a mudança em uma variável causa um incremento nas demais ou negativo quando o sistema tende a ficar balanceado. O DLC da Figura 1 apresenta as principais variáveis envolvidas no processo de produção de etanol até a geração de energia.

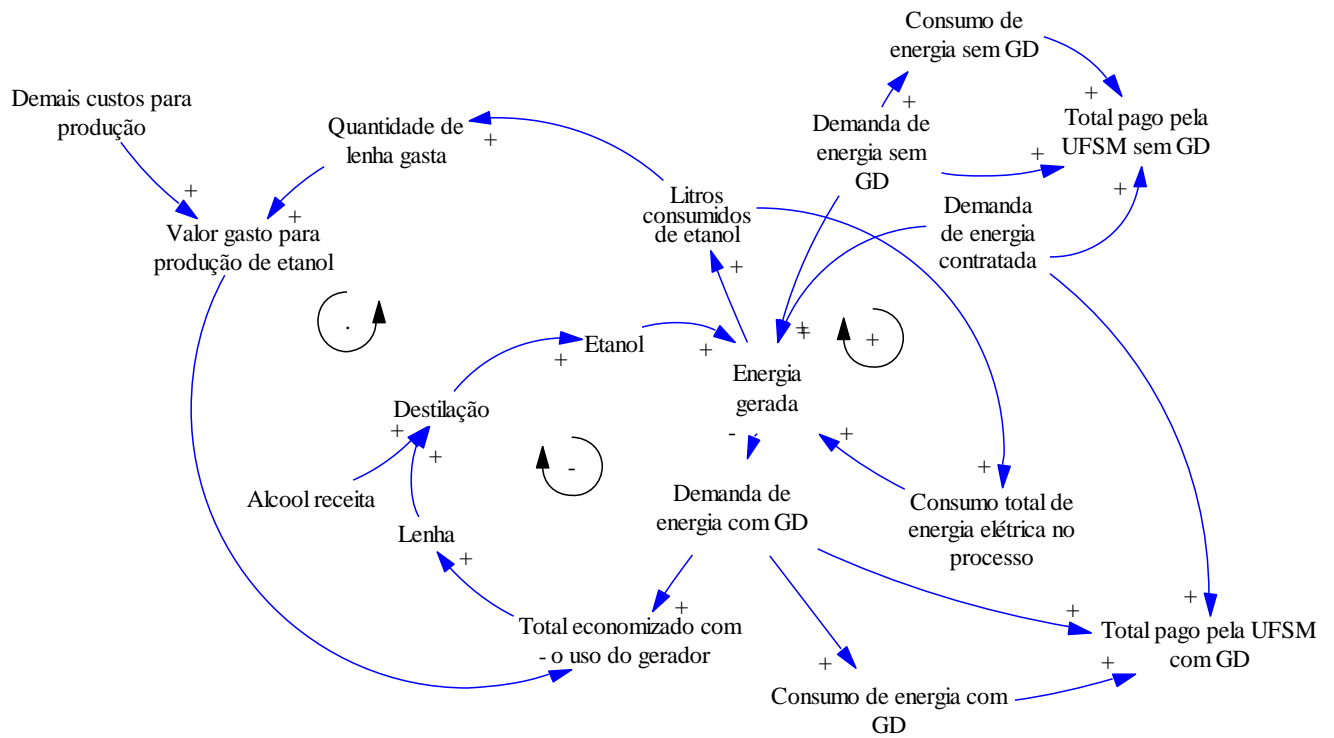


Figura 1-Diagrama de Laço Causal do modelo proposto

O despacho do gerador é controlado pela demanda medida e contratada, quando a demanda medida é maior que a demanda contratada o gerador é despachado. Essas duas variáveis juntamente com o consumo dão origem à fatura de energia da universidade, com a inserção do gerador os valores da demanda medida e do consumo são reduzidos, resultando em um valor menor na fatura. O modelo ainda leva em consideração os custos envolvidos no processo de produção do etanol, a matéria-prima (álcool da receita) é fornecida sem custo à universidade, com isso os custos de produção considerados até o momento são relativos à compra de lenha, esses custos são supridos pela economia obtida com a redução das multas por ultrapassagem da demanda contratada, isto é, a diferença entre a fatura de energia antes da inserção do gerador e depois.

Após a compreensão das relações entre as principais variáveis inseridas no modelo através do DLC, é necessário modelar matematicamente essas relações através do DEF, a partir deste diagrama é possível realizar as simulações e aplicar testes no sistema, contudo devido ao grande número de conexões o DEF não é apresentado.

A quantidade de bebida que está sendo recebida na microdestilaria atualmente por mês é cerca de 650 litros com teor alcoólico de aproximadamente 20 %, sendo que o tanque disponível para armazenagem dessas bebidas tem uma capacidade total de 30 mil litros, que não está sendo utilizado devido a pouca demanda de etanol na universidade, na qual utiliza-o apenas para abastecimento de alguns veículos de sua frota.

Para o cálculo do consumo de lenha na destilação foi utilizada a relação de 1 m³ de lenha para 130 litros de etanol produzido, a um valor de 60 R\$/m³. Os valores de energia elétrica gasta no processo bem como os demais custos de produção ainda não foram inseridos no modelo. Para as simulações foi utilizado um gerador com potência de 635 kVA com consumo médio de combustível de 70 litros por hora.

6. Discussão e análise dos resultados

A simulação foi realizada para o mês de março de 2015, os dados são apresentados a cada 15 minutos, sendo que o tempo 0 representa as 10h do dia 5 de março e o tempo 2683 representa as 08h45 do dia 2 de abril. As curvas de demanda nos períodos de ponta e fora ponta, assim como a demanda contratada são apresentadas nas Figura 2 e Figura 3.

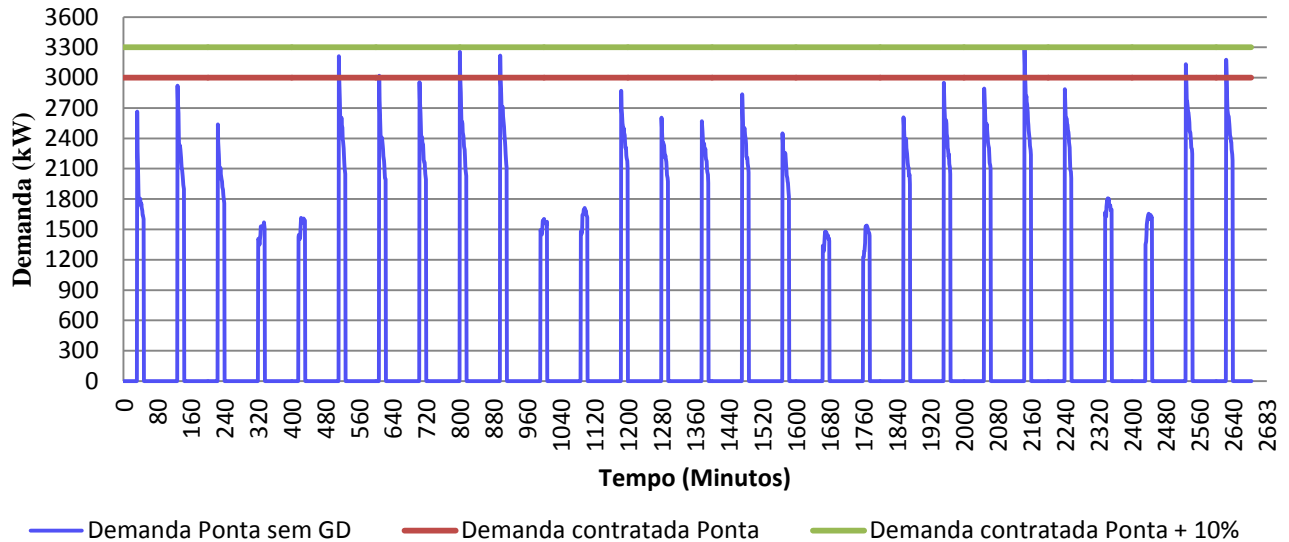


Figura 2- Demanda medida sem GD e demanda contratada no período de Ponta

Analisando a Figura 2 pode-se observar que no período de ponta a demanda extrapola a demanda contratada em diversos momentos, entretanto, não há multa por ultrapassagem, pois a curva não excede os 10 % de tolerância. Contudo, na Figura 3 é possível observar que existe a ultrapassagem de demanda com pagamento de multa, já que a curva excede 5500 kW.

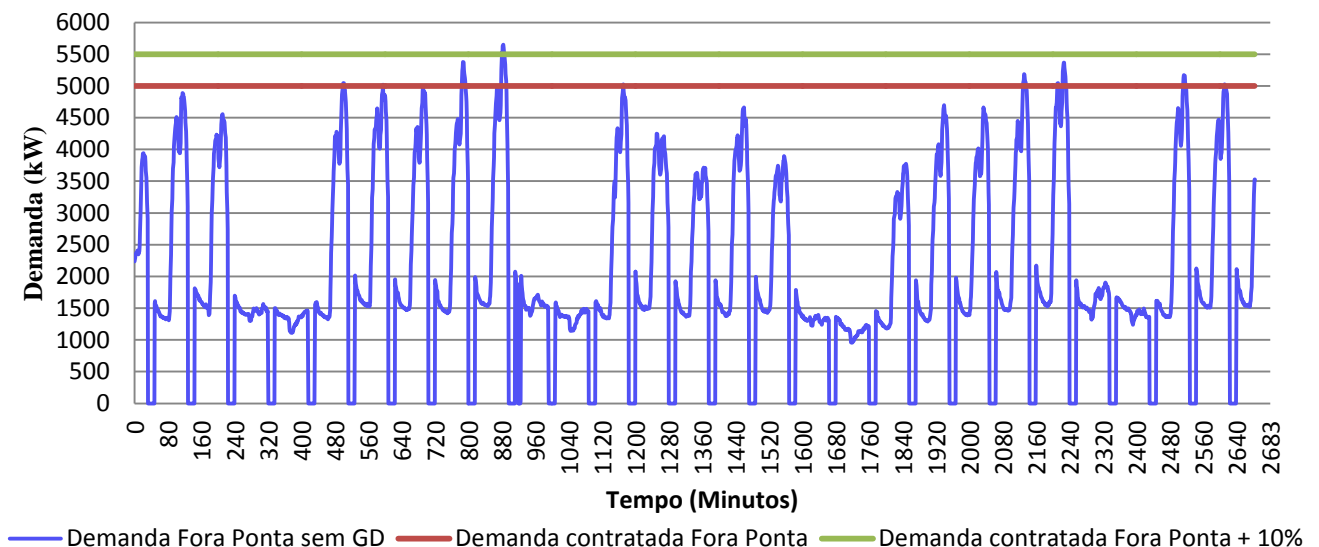


Figura 3- Demanda medida sem GD e demanda contratada no período Fora Ponta

A partir dos dados apresentados foi elaborada uma modelagem a fim de reduzir as ultrapassagens de demanda com a inserção da geração distribuída no sistema. O despacho de energia pelo gerador é exposto na **Erro! Fonte de referência não encontrada.** Figura 4.

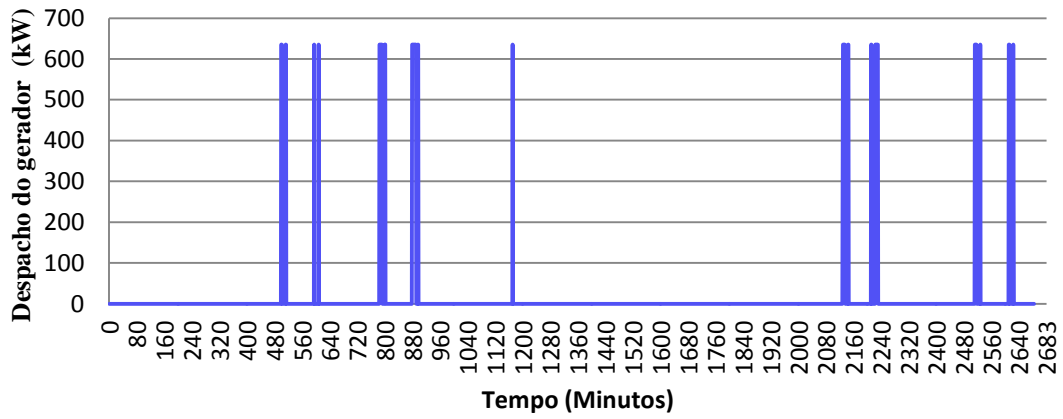


Figura 4- Despacho do gerador nos períodos de ultrapassagem de demanda

Fazendo uma comparação dessa figura com as curvas de demanda sem a GD pode-se constatar que o gerador é ativado toda vez que a demanda medida ultrapassa a contratada, resultando nas curvas das Figura 5 e Figura 6.

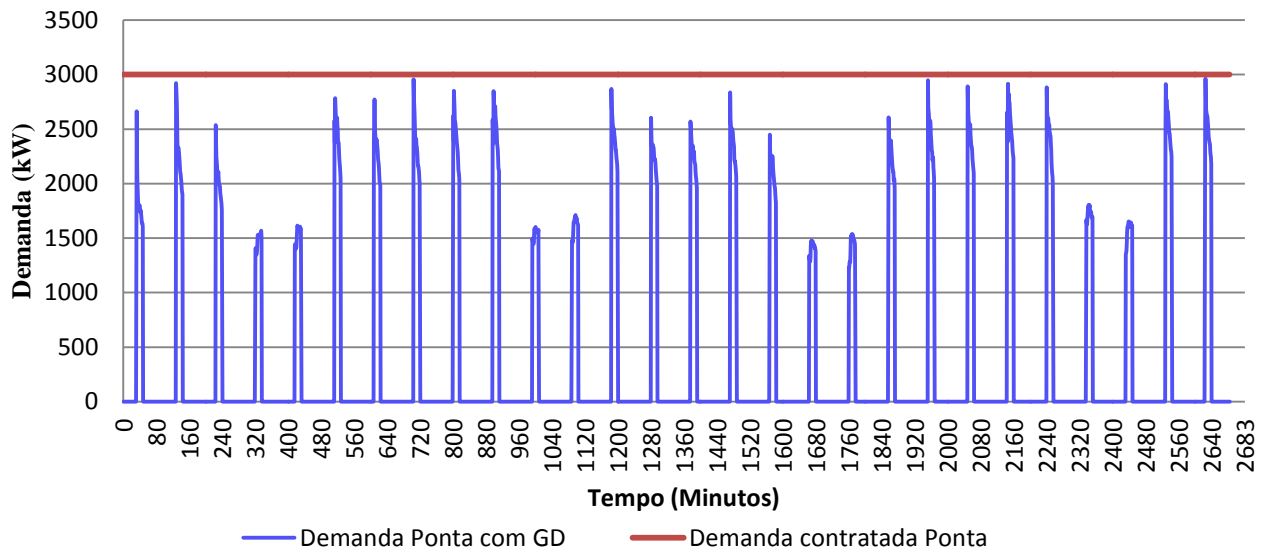


Figura 5- Demanda medida com GD e demanda contratada no período de Ponta

Pode-se observar que nos dois períodos o gerador de 635kVA foi suficiente para reduzir completamente as ultrapassagens de demanda.

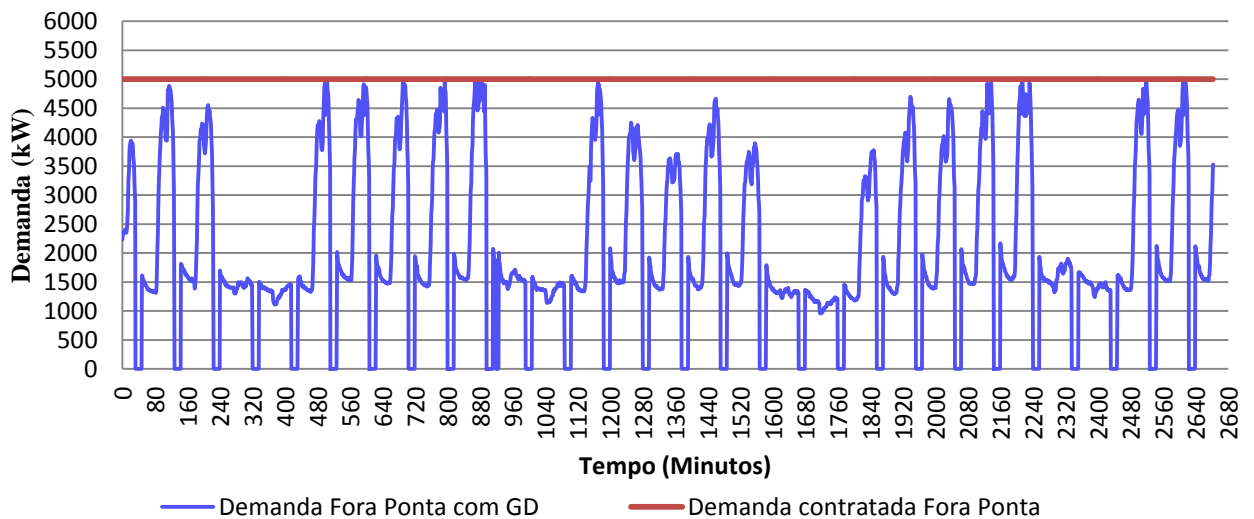


Figura 6- Demanda medida com GD e demanda contratada no período Fora Ponta

Considerando que o total de bebida armazenada mensalmente na microdestilaria é de 30 mil litros com teor alcoólico de aproximadamente 20 %, o total de etanol obtido após a destilação é 6 mil litros por mês. Analisando a Figura 7 pode-se constatar que a quantidade de etanol utilizada foi bem inferior à capacidade total de armazenamento.

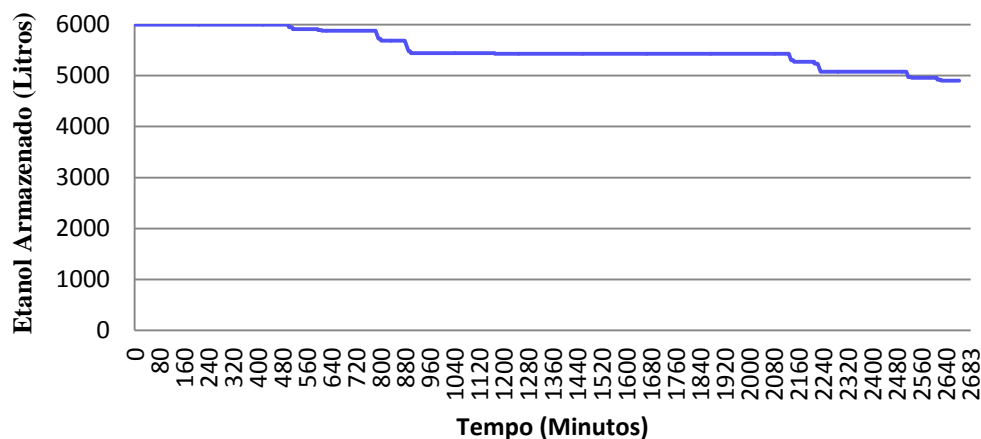


Figura 7- Total de etanol armazenado

A Figura 8 apresenta as curvas comparativas do total acumulado, em reais, do valor a ser pago pela universidade com e sem a inserção da GD. Com essas curvas é possível observar que há uma redução no valor a ser pago ao longo de todo o mês em estudo, resultando ao final do período em uma economia de R\$ 18.600,00. Considerando que o valor relativo à compra de lenha para a produção dos 6 mil litros de etanol foi de R\$ 2.769,00, o total economizado foi de R\$ 15.831,00.

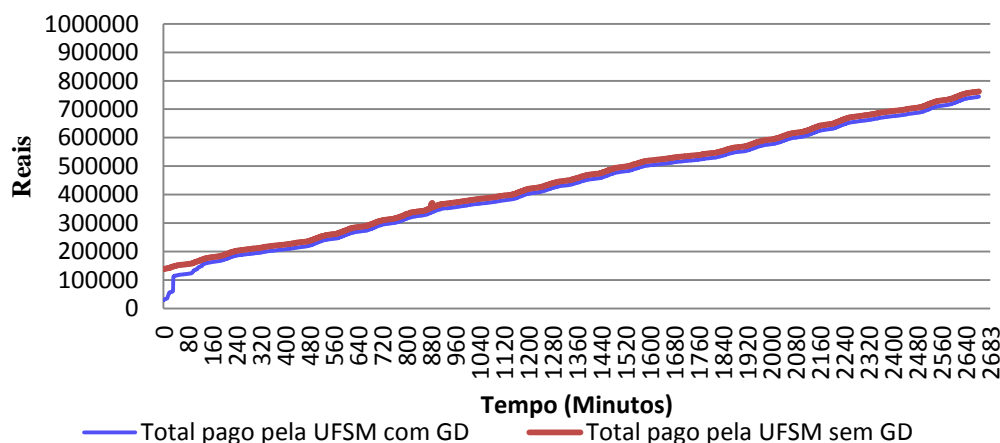


Figura 8- Total pago pela universidade com e sem a inserção da GD

Após a realização dos testes para redução da ultrapassagem de demanda testou-se uma redução no valor da energia contratada fora ponta. Tendo em vista a quantidade de etanol disponível mensalmente foi possível reduzir o contrato de energia fora ponta de 5000 kW para 4200 kW, com isso a economia passou de R\$ 15.831,00 para R\$ 31.031,00.

7. Conclusões

A partir do desenvolvimento do presente trabalho pode-se concluir que a Dinâmica de Sistemas é uma excelente ferramenta para auxiliar nas decisões do setor elétrico, pois além de fornecer respostas rápidas permite que o programador altere os parâmetros do modelo de forma simplificada possibilitando a obtenção de diversos cenários para solução de um determinado problema. No caso analisado no presente trabalho, foi possível obter o resultado em R\$ da inserção de geradores a etanol na rede da Universidade federal de Santa Maria, como alternativa ao controle de demanda, a fim de não ultrapassar o contrato de energia estabelecido com a concessionária.

A modelagem apresentada ainda necessita de alguns ajustes, contudo foi possível constatar que do ponto de vista econômico é vantajoso para a universidade inserir a Geração distribuída na rede, pois somente com a inserção de um

gerador de 635 kVA foi possível obter uma economia de R\$ 15.831,00, vale a pena ressaltar que esse valor foi obtido para apenas um mês e que se o estudo for realizado para um período de tempo maior o valor economizado será ainda maior. Além disso, foi possível observar que com a produção de 6 mil litros de etanol por mês é viável uma redução no contrato de energia com a concessionária de 5000 kW para 4200 kW no período fora ponta, gerando uma economia mensal de R\$ 31.031,00.

Os próximos passos a serem realizados serão a substituição do combustível etanol por biodiesel e posteriormente a modelagem de uma microrrede envolvendo os dois combustíveis.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Maria, ao Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio e incentivo na realização deste trabalho.

Referências

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA-ANEEL. Resolução Normativa N° 414, de 9 de setembro de 2010. p. 205, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA-ANEEL. **Geração Distribuída**. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/scg/gd/gd.asp>>. Acesso em: 2 dez. 2016.

ALVES, A. A. F. **Construção de cenários de demanda no setor residencial-Uma abordagem baseada em Dinâmica de Sistemas**. Florianópolis, Santa Catarina: Universidade Federal de Santa Catarina, 1997.

AZEVEDO, A. N. G. DE; LIMA, B. G. DE A. Biocombustíveis: desenvolvimento e inserção internacional. **Revista Direito Ambiental e Sociedade**, v. V.6, n.1, p. 77–100, 2016.

BOURGÉS, F. **Planejamento Da Operação De Pequenas Centrais Hidrelétricas : Enfoque Sistêmico**. Curitiba, Paraná: Universidade Federal do Paraná, 2009.

MORATO, M. M. et al. Estudo de uma planta híbrida de geração de energia na indústria da cana-de-açúcar. **XXI Congresso Brasileiro de Automática**, n. outubro, 2016.

ORTEGOSA, C. ZATORRE. **Metodologia para estudos da viabilidade econômico-financeira no uso do gás natural em instalações prediais residenciais: uma abordagem via Dinâmica de Sistemas**. Campor Grande, Mato Grosso do Sul: Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, 2006.

SOUZA, A. DOS S. et al. Adequação ao sistema de tarifação de consumidores de energia elétrica. **Omnia Exatas**, v. 4, n. 2, p. 43–62, 2011.

AESSul Clientes Corporativos. **Tarifas e Taxas**. Disponível em: <https://www.aessul.com.br/grandesclientes/site/content/informacoes/tarifas_e_taxas.aspx>. Acesso em: Janeiro de 2016.