

01 a 04 de outubro de 2018

**Evento:** XXIII Jornada de Pesquisa

## **PLANEJAMENTO DE EXPANSÃO DE REDE UTILIZANDO PLIM<sup>1</sup> NETWORK EXPANSION PLANNING USING PLIM**

**Sândi Da Costa Gehm<sup>2</sup>, Valéria Braidá<sup>3</sup>, Grazielle Techio De Melo<sup>4</sup>**

<sup>1</sup> Pesquisa desenvolvida no Curso de Mestrado em Engenharia Elétrica da UFSM, pertencente ao Centro de Excelência em Energia e Sistemas de Potência (CEESP)

<sup>2</sup> Mestranda em Engenharia Elétrica, na UFSM

<sup>3</sup> Mestranda em Engenharia Elétrica, na UFSM

<sup>4</sup> Aluna Especial de Mestrado em Engenharia Elétrica, na UFSM

Resumo- O aumento do consumo de energia elétrica influencia diretamente no planejamento dos sistemas de transmissão. Desta forma, as empresas responsáveis pelo planejamento da expansão destes sistemas devem buscar soluções com o objetivo de garantir o fornecimento e suprimento de energia aos consumidores de forma confiável e econômica. Este artigo tem o objetivo de apresentar o estudo e planejamento de expansão de uma rede de subtransmissão, onde será feita a projeção de um acréscimo de carga para suprir uma demanda futura, considerando uma previsão de carga para um horizonte de dez anos. Para a realização deste estudo de caso, foram utilizados os softwares ANAREDE e OTIMIZA. O software ANAREDE foi empregado para simular soluções aos problemas encontrados. De posse destas soluções, é realizada a otimização no software OTIMIZA, a fim de encontrar a solução de menor valor econômico.

Palavras-chave: Planejamento de uma rede, Rede de subtransmissão, Previsão de Carga.

### I. INTRODUÇÃO

O planejamento dos sistemas elétricos emprega metodologias, técnicas e ferramentas que fornecem suporte à tomada de decisões para a aplicação ótima dos recursos nos segmentos de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

A problemática do planejamento da expansão é caracterizada pela escolha da melhor solução em investimentos na rede para atender a demanda futura, a um custo mínimo, atendendo as restrições técnicas. Esta tarefa é de responsabilidade das empresas distribuidoras de energia elétrica, que trabalham com a alocação ótima de recursos na expansão e melhoria do sistema, com a missão de prover qualidade e confiabilidade do serviço para os consumidores.

Assim, altos custos de investimentos e de operação, que somados ao fato que o sistema de distribuição é responsável por conectar diretamente com os consumidores, ressaltam a importância do planejamento da expansão destes sistemas [1].

O objetivo do planejamento de redes é definir um plano de obras para o horizonte de estudo, para corrigir as deficiências do sistema existente, atender as necessidades do crescimento da geração e do consumo de energia elétrica, respeitando requisitos técnicos e econômicos [2].

Neste estudo, toma-se parte de um sistema de transmissão, onde é feita a projeção de um acréscimo de carga em um horizonte decenal. Este crescimento constitui problemas relacionados ao suprimento da demanda futura, tais como o sobrecarregamento de linhas de transmissão,

01 a 04 de outubro de 2018

**Evento:** XXIII Jornada de Pesquisa

transformadores e mudanças nos níveis de tensão que ultrapassam os limites normais de operação. Sendo assim, faz-se necessário um estudo para a elaboração de obras de expansão, de modo que o sistema sustente a nova demanda de energia dentro de padrões de operação normatizados. Isso gera um problema de planejamento, onde a otimização do investimento é o objetivo principal do presente trabalho, buscando a redução de custos em paralelo a resolução de problemas decorrentes do aumento de carga na rede estudada.

Para isso, foi utilizado o software ANAREDE para a modelagem e os cálculos de fluxo de potência das diferentes topologias da rede propostas. Os resultados obtidos no software ANAREDE foram utilizados para a modelagem da função objetivo e suas restrições, com o intuito de maximizar os benefícios considerando critérios de baixos custos de realização das obras e baixos custos com as perdas de energia. O cálculo para a tomada de decisão foi realizado usando o software OTIMIZA, onde foram inseridas a função objetivo e restrições do problema proposto.

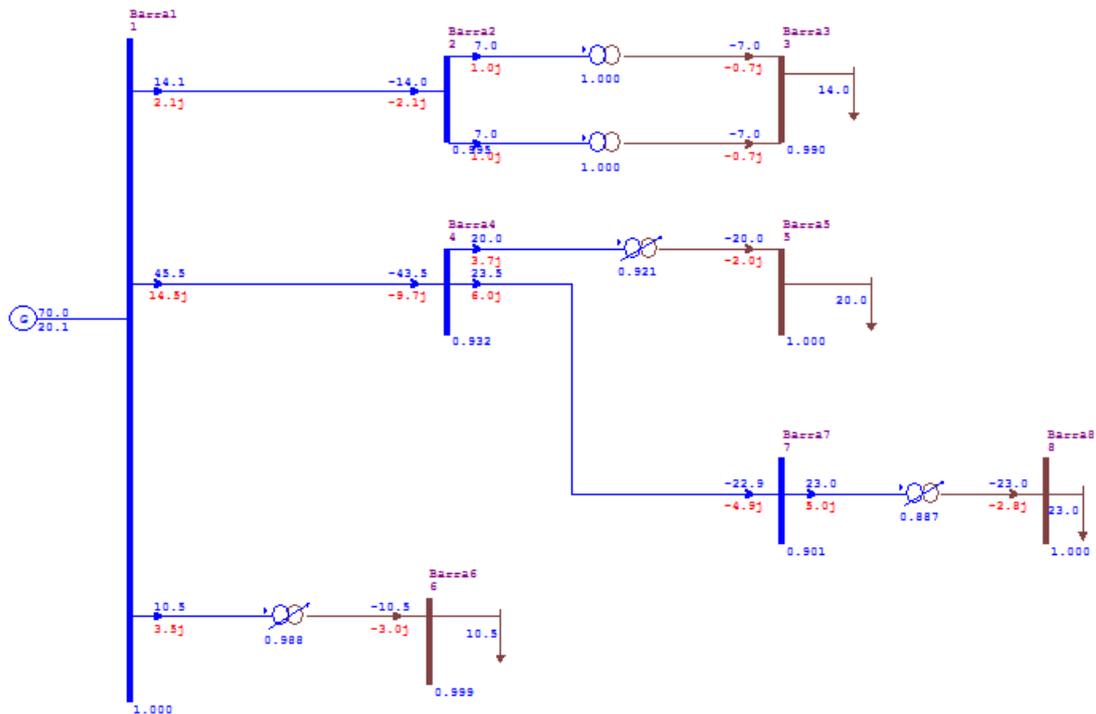
## II. ANÁLISE DO SISTEMA E PLANEJAMENTO DA EXPANSÃO

O sistema de subtransmissão utilizado para o estudo de planejamento apresenta tensões de 138/23,1 kV, constituído por oito barras e cinco transformadores de potência. Inicialmente, em seu primeiro ano de referência, o sistema opera de forma adequada, não apresentando violações nas barras e nos transformadores, conforme mostra a Figura 1.

Figura 1: Sistema de subtransmissão analisado

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: XXIII Jornada de Pesquisa



A partir do ano de referência e realizando uma projeção de carga considerando um período de dez anos à frente e percentuais de crescimento de 3,79%, 3,96%, 3,05% e 4,76% para as subestações SE-1, SE-2, SE-3 e SE-4, o sistema sofrerá aumentos progressivos de carga ao longo de cada ano, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1: Projeção do aumento de carga

01 a 04 de outubro de 2018

**Evento:** XXIII Jornada de Pesquisa

PROJEÇÃO DE CARGA								
Ano	Barra 6		Barra 3		Barra 5		Barra 8	
	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar	MW	Mvar
Referência	10,50	3,00	14,00	1,50	20,00	2,00	23,00	3,00
1	10,90	3,11	14,55	1,56	20,61	2,06	24,10	3,14
2	11,31	3,23	15,13	1,62	21,24	2,12	25,24	3,29
3	11,74	3,35	15,73	1,69	21,89	2,19	26,45	3,45
4	12,19	3,48	16,35	1,75	22,56	2,26	27,71	3,61
5	12,65	3,61	17,00	1,82	23,24	2,32	29,03	3,79
6	13,13	3,75	17,67	1,89	23,95	2,40	30,41	3,97
7	13,63	3,89	18,37	1,97	24,68	2,47	31,86	4,16
8	14,14	4,04	19,10	2,05	25,44	2,54	33,38	4,35
9	14,68	4,19	19,85	2,13	26,21	2,62	34,97	4,56
10	15,24	4,35	20,64	2,21	27,01	2,70	36,63	4,78

Os dados referentes ao crescimento de carga no horizonte decenal foram aplicados no software Anarede. Com o crescimento estimado de carga no sistema em dez anos, ocasionando o surgimento de problemas, tais como os listados a seguir.

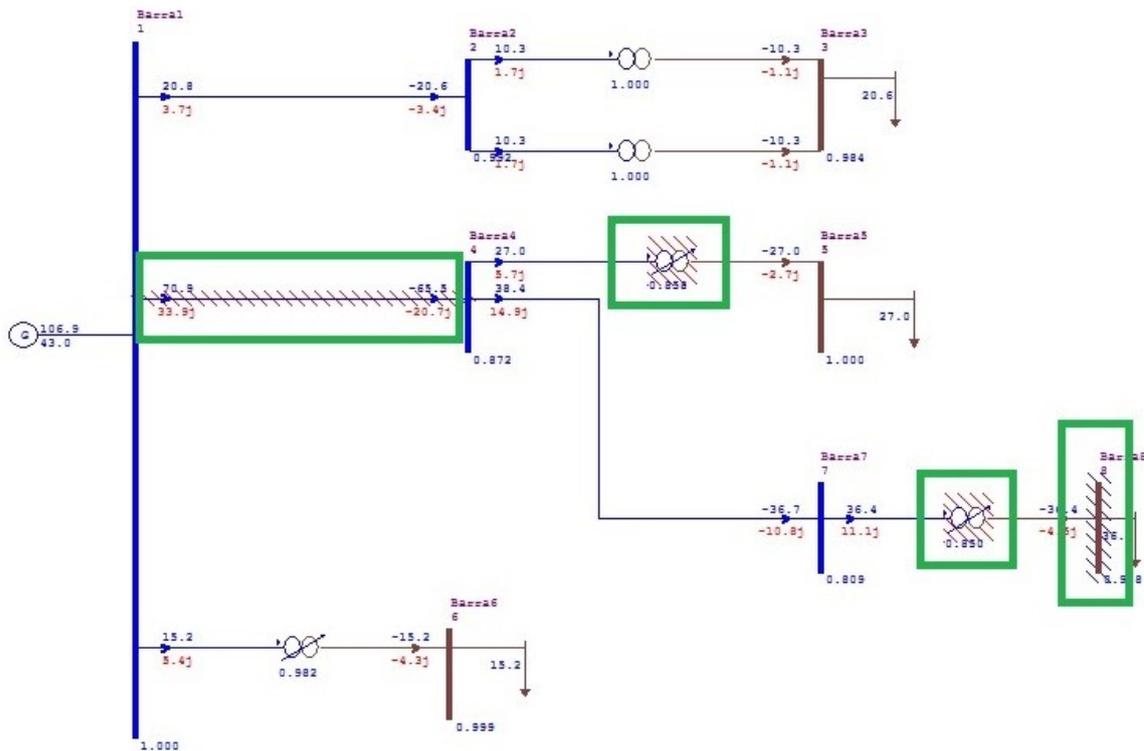
- Problema 1: A linha de transmissão entre as barras 1 e 4 está sobrecarregada, visto que sua capacidade nominal é de 55 MVA e, após a projeção de aumento de carga, ela passa a operar com 79 MVA;
- Problema 2: O transformador entre as barras 4 e 5 está sobrecarregado, visto que sua potência nominal é de 25 MVA, e após a projeção de aumento de carga, ele passa a operar com 27 MVA;
- Problema 3: O transformador entre as barras 7 e 8 também está sobrecarregado, pois sua potência nominal é de 25 MVA, e agora, ele passa a operar com 40,5 MVA;
- Problema 4: A barra 8 está com subtensão, uma vez que os limites de tensão para esta barra variam de 0,95 a 1,05 pu, e no momento, ela está operando com 0,917pu.

Os problemas listados acima resultam da entrada de novos dados de demanda no sistema e podem ser vistos na Figura 2.

Figura 2: Simulação do sistema ano 10

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: XXIII Jornada de Pesquisa



Através dos problemas de sobrecarga e subtensão, demarcados na Figura 2, é necessário projetar algumas soluções para que o sistema volte a operar normalmente, após o crescimento da demanda. Estas soluções se caracterizam por obras com a finalidade de eliminar os problemas surgidos.

Dessa forma, foi simulado no software Anarede, um conjunto de obras a fim de expandir o sistema. Os resultados obtidos são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2: Relação entre obras executadas e problemas solucionados

01 a 04 de outubro de 2018

**Evento:** XXIII Jornada de Pesquisa

Obras executadas	Solução dos problemas
Inserir uma GD de 30 MVA na barra 5	Problemas 1, 2 e 4 solucionados
Acrescentar um transformador em paralelo entre as barras 7 e 8	Problemas 3 e 4 solucionados
Acrescentar uma nova LT entre as barras 1 e 4	Problemas 1 e 4 solucionados
Substituir o transformador entre as barras 4 e 5 por um de 30 MVA	Problema 2 solucionado
Acrescentar um transformador em paralelo entre as barras 4 e 5	Problema 2 solucionado
Substituir o transformador entre as barras 7 e 8 por um de 50 MVA	Problema 3 solucionado

Apesar de estas soluções resultarem em benefícios ao sistema, cada problema solucionado representa o custo de uma obra. Dessa forma, é necessário otimizar as obras, afim de selecionar aquelas que possibilitam maior benefício aliado ao menor custo de implementação.

### III. OTIMIZAÇÃO DE OBRAS E INVESTIMENTOS

O consumo anual de energia elétrica no Brasil é de 555 TWh (Terawatt-hora), com crescimento médio, nos últimos dez anos, de 4% ao ano. Com esse nível de demanda, é inegável a necessidade de se realizar investimentos para garantir a oferta. Depois do apagão de 2001, a segurança energética virou um dos assuntos mais urgentes para o desenvolvimento do país.

Nos últimos anos, a capacidade instalada do Brasil deu um salto. Em 2002 era de 80,3 GW e em 2013 chegou a 124,8 GW. O crescimento no período foi de 55,4%, uma média ao ano de 4,2%, muito próxima ao crescimento do consumo. Hoje, apenas as hidrelétricas já respondem por 85,3 GW da potência. E as térmicas - que em 2002 produziam 8,5 GW - já são responsáveis por 19,3 GW. Até 2025, a capacidade instalada deve chegar a 195,1 GW [3].

O planejamento da expansão do sistema elétrico é uma das principais atividades do setor, pois representa uma grande parcela dos investimentos realizados pelas distribuidoras de energia elétrica. Dessa forma, determinar de forma eficiente onde serão realizados os investimentos é fundamental. Desta forma, o problema de otimização deve selecionar as obras que ofereçam menor investimento, através da função objetivo. Ainda, um conjunto de restrições, que são funções variáveis de decisão do problema, devem abranger variáveis inteiras e reais contínuas relativas aos limites de carregamento das linhas de transmissão, transformadores e níveis de tensão, que dependem do inter-relacionamento entre as demais soluções [4]. Deste modo, existe a possibilidade de uma obra só ser viável se a outra também for selecionada. Isso é feito juntamente com o apoio do software OTIMIZA, através da Programação Linear Inteira Mista (PLIM).

01 a 04 de outubro de 2018

**Evento:** XXIII Jornada de Pesquisa

Este método utiliza algumas variáveis inteiras e as demais são variáveis contínuas reais. Sendo assim, a PLIM acrescenta restrições para as variáveis inteiras que não assumiram valores inteiros, a partir do problema de programação linear relaxado [4]. Assim, respeitando os limites de carregamentos dos transformadores e das linhas de transmissão a função objetivo e o conjunto de restrições definem a escolha de soluções para o bom funcionamento do sistema, com o menor custo de investimento.

Para se fazer uso da PLIM, primeiramente é necessário realizar um levantamento dos investimentos utilizados para a implementação de cada obra. Para a estimação desse levantamento de custos, foi utilizado como base o banco de preços da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), tendo como referencia o ano de 2015. O resultado deste levantamento pode ser visualizado na Tabela 3.

Tabela 3: Investimentos para execução de obras

Obras executadas	Custos
Inserir uma GD de 30 MVA na barra 5	R\$ 24.000.000,00
Acrescentar um transformador de 25MVA em paralelo entre as barras 7 e 8	R\$ 1.322.741,00
Acrescentar uma nova LT entre as barras 1 e 4	R\$ 26.283.498,00
Substituir o transformador entre as barras 4 e 5 por um de 30 MVA	R\$ 1.587.290,00
Acrescentar um transformador de 25MVA em paralelo entre as barras 4 e 5	R\$ 1.322.741,00
Substituir o transformador entre as barras 7 e 8 por um de 50 MVA	R\$ 2.645.483,00

Em relação a nova LT, adotou-se que a possível LT entre as barras 1 e 4 deverá ser de 55 MVA. Já quanto a inserção de GD foi adotado o óleo diesel como tipo de geração e o custo médio da implantação ficou em R\$ 800,00/kW [5].

#### IV. RESULTADOS

De posse das alternativas, com seus custos de implementação, fez-se a análise de custo-benefício no software OTIMIZA. Neste software é realizada a modelagem do problema linear, definindo o objetivo básico com respeito à otimização procurada, variáveis de decisão e restrições. O software realiza a otimização através do método de programação linear inteira e mista [6].

A modelagem para a programação linear inteira mista (PLIM) utilizada neste estudo é a que segue em Figura 3.

Figura 3: Modelagem PLIM

01 a 04 de outubro de 2018

**Evento:** XXIII Jornada de Pesquisa

```
| ! Escolha da obra minimizando os investimentos|
min 24000000o1 + 1322741o2 + 26283498o3 + 1587290o4 + 1322741o5 + 2645483o6
st
! Restrição de orçamento
24000000o1 + 1322741o2 + 26283498o3 + 1587290o4 + 1322741o5 + 2645483o6 <= 40000000
!SÃO NECESSÁRIAS NO MÍNIMO 2 OBRAS PARA SOLUCIONAR TUDO
o1+o2+o3+o4+o5+ o6 >=2
! Restrições de obras excludentes
o3 + o1 <= 1
o4 + o5 <= 1
!Obras excludentes para a solução 1
o1+o3 = 1
!Obras excludentes para a solução 2
o1+o4+o5 = 1
!Obras excludentes para a solução 3
o2+o6 = 1
!Obras excludentes para a solução 4
o1+o2+o3 =1
! Restrições de obras interdependentes
o2 - o1 <= 0
end
```

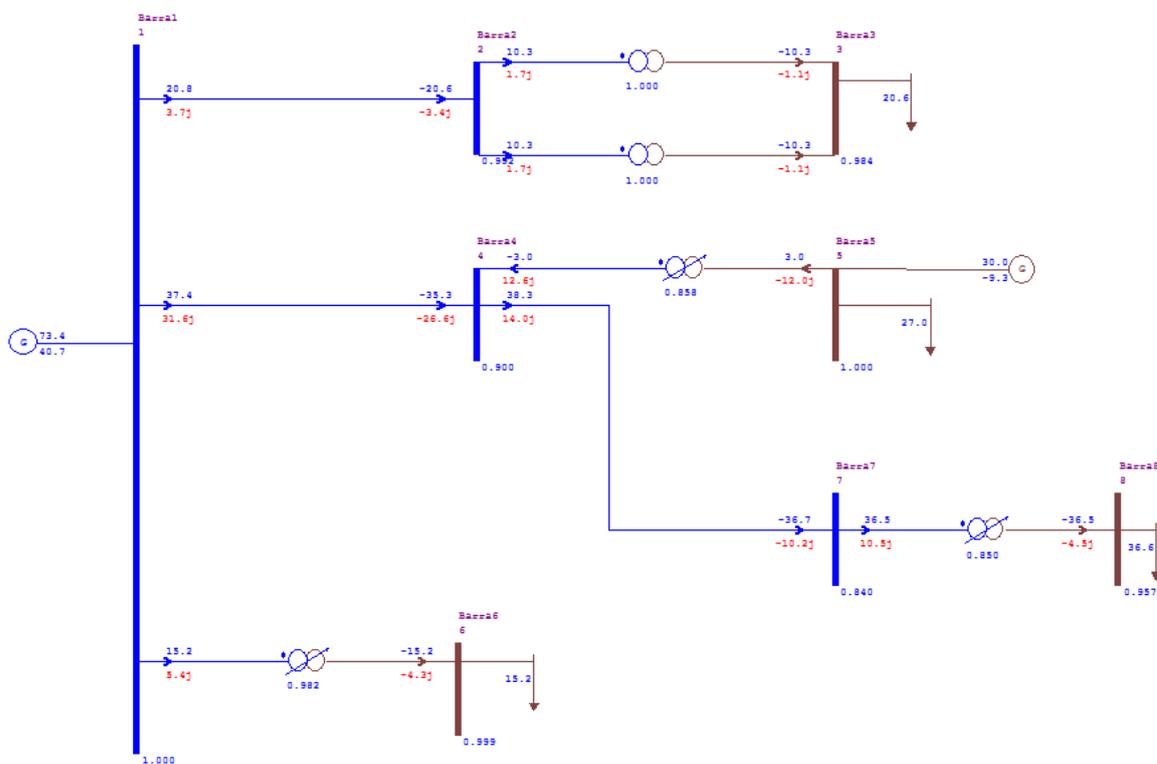
Sendo assim obteve-se como melhor solução a inserção de GD através de um gerador a óleo diesel com potência de 30 MVA na barra 5. Também foi substituído o transformador entre as barras 7 e 8 por um de 50 MVA. Os resultados obtidos podem ser vistos na Figura 4.

Através do resultado da otimização, com a função objetivo apresentamos um investimento de R\$ 26.645.483,00, um resultado bem sucedido levando em consideração que o valor máximo disponível para ser investido era de R\$ 40.000.000,00.

Figura 4: Sistema corrigido após a otimização

01 a 04 de outubro de 2018

Evento: XXIII Jornada de Pesquisa



## V. CONSIDERAÇÕES

O planejamento da expansão do sistema de energia elétrica é fundamental, pois resulta em um produto de qualidade para os consumidores e em conformidade com os preceitos estabelecidos pela ANEEL. No entanto, ultimamente as empresas distribuidoras de energia elétrica defrontam de um orçamento limitado para as adequações de suas obras e acabam tendo que adaptar-se aos recursos reduzidos.

Neste estudo de caso, foi realizada uma projeção de um acréscimo de carga em um horizonte decenal, considerando parte de um sistema de transmissão. A partir deste crescimento foram encontrados problemas relacionados ao suprimento da demanda futura, os quais foram corrigidos através de um planejamento para elaboração de obras, tornando o sistema capaz de suprir o novo valor de demanda.

A utilização do software ANAREDE, foi fundamental para a interpretação do funcionamento de sistemas elétricos de potência. Através deste software, foi possível realizar diversas simulações, demonstrando métodos para a solução dos problemas de expansão e ainda, através do software OTIMIZA, encontrar a solução de maior viabilidade econômica para as obras em questão.

## VI. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao apoio do DEMEI, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de

01 a 04 de outubro de 2018

**Evento:** XXIII Jornada de Pesquisa

Nível Superior (PROEX-CAPEs), Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq PQ 1D 311516/2014-9) e à Universidade Federal de Santa Maria (UFSM).

#### REFERÊNCIAS

- [1] COSSI, A. M., Planejamento de Redes de Distribuição de Energia Elétrica de Média e Baixa Tensão. 2008. 233 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP, São Paulo.
- [2] ANEEL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST - Módulo 2 - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição. Brasília, 2011.
- [3] O planejamento e futuro do setor elétrico Brasileiro. FGV ENERGIA. Disponível em: <http://fgvenergia.fgv.br/noticias/o-planejamento-e-o-futuro-do-setor-eletrico-brasileiro>, acesso em 24 de set. de 2017.
- [4] N. Kagan; H. P. Schmidt; C. C. B. Oliveira e H. Kagan. Métodos de otimização aplicados a sistemas elétricos de potência, São Paulo: Editora Blucher, 2009. ISBN 978-85-212-0472-5.
- [5] Perfectum Serviços de Engenharia. Diesel ou gás natural? Setembro de 2016. Disponível em: [http://www.joseclaudio.eng.br/geradores/Diesel\\_vs\\_gas.html](http://www.joseclaudio.eng.br/geradores/Diesel_vs_gas.html)
- [6] KAGAN, et. al. Métodos de Otimização Aplicados a Sistemas Elétricos de Potência, 2009.