

Capítulo VI

Metodologia para planejamento de sistemas de distribuição considerando a previsão de inserção de geração distribuída

Por *Laura Lisiane Callai dos Santos, Luciane Neves Canha, Daniel Pinheiro Bernardon, Roberto André Pressi e Nelson Knak Neto**

Tradicionalmente, a geração de energia elétrica se baseou em usinas de grande porte, normalmente, hidrelétricas, localizadas longe dos centros de carga, interligadas a estes por linhas de transmissão.

A geração de energia elétrica localizada próxima ao consumidor ou na própria instalação consumidora, independentemente da fonte de energia e da tecnologia usada, é conhecida como Geração Distribuída (GD). É uma nova alternativa para geração de energia que visa postergar investimentos em transmissão, reduzir perdas no sistema e melhorar a qualidade do serviço de energia. O crescente aumento da demanda de energia e a preocupação com o meio ambiente impulsionaram investimentos em novas tecnologias em fontes alternativas de energia, com a biomassa, PCH e eólica para média tensão (MT) e a solar e eólica para baixa tensão (BT).

Com a introdução dos geradores no sistema de distribuição em MT, verifica-se uma mudança do sentido de fluxo de energia elétrica, principalmente, quando a geração é maior que a carga, ou seja, o fluxo

poderá trafegar no decorrer de um dia em qualquer sentido, fazendo com que a rede de distribuição passe a ser um elemento “ativo”.

No ano de 2012, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), regulamentou a Resolução Normativa (RN) nº 482, que estabelece as condições gerais para o acesso da microgeração e minigeração distribuída, pequenas centrais geradoras de energia elétrica próximas aos centros consumidores, termo conhecido por Geração Distribuída (GD), que visa a incentivar a inserção de GD também em consumidores de BT.

A GD utiliza fontes com base em energia hidráulica, solar, eólica ou cogeração qualificada. Conectada na rede de distribuição por meio de instalações consumidoras, a microgeração distribuída se caracteriza por ter uma potência instalada menor ou igual a 100 kW, já a minigeração distribuída têm potência instalada superior a 100 kW e menor ou igual a 1 MW.

Essas novas alternativas de geração de energia elétrica proporcionam disponibilidade de energia próxima aos consumidores, reduzindo os impactos

ambientais causados por usinas de grande porte, mas trazem impactos técnicos e econômicos nos sistemas de distribuição de energia elétrica. Devido à inserção da GD nos sistemas de distribuição, é necessário o planejamento do sistema de distribuição considerando os impactos causados por essas pequenas injeções de potência ao longo das redes.

A energia gerada junto ao consumidor reduz as perdas associadas à transmissão e à distribuição de energia elétrica, ocorrendo também reduções dos aquecimentos nos transformadores, com consequente aumento de sua vida útil. Um exemplo de sistema com GD é a utilização de grandes usinas geradoras, fábricas com cogeração de energia, edifícios que geram sua própria energia, e consumidores residências conectados a pequenas GD e a utilização de veículos elétricos, como ilustra a Figura 1.

As principais contribuições do trabalho são as seguintes:

- Mapeamento do potencial energético na região do estudo;
- Estudo das tecnologias de GD e o perfil

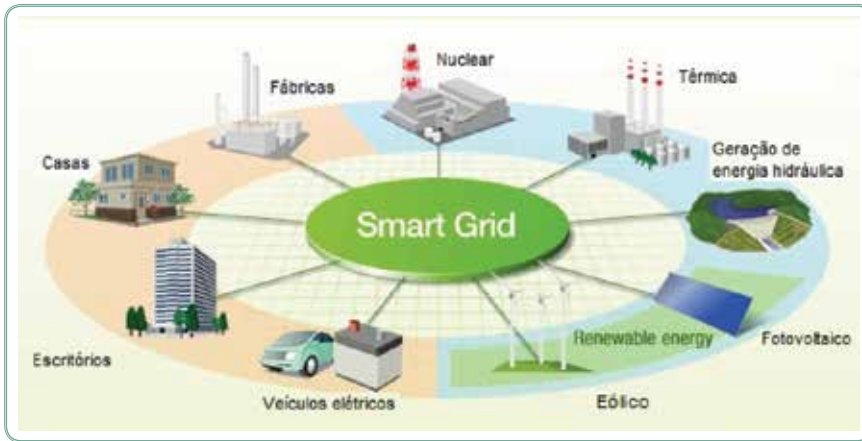


Figura 1 – Estrutura dos sistemas com as redes elétricas inteligentes.

de geração;

- Estudo de inserção de GD nas redes de distribuição de BT e MT;
- Planejamento de redes de distribuição considerando a GD.

MAPEAMENTO DO POTENCIAL ENERGÉTICO

A Geração Distribuída pode ser com-

preendida como a geração de energia elétrica em pequena escala e próxima aos consumidores. A GD pode reduzir os custos, melhorar a confiabilidade do sistema e reduzir o impacto ambiental.

Neste trabalho foi explorado como tecnologias de GD a energia eólica, a solar, a biomassa e as PCHs, sendo a biomassa e a PCH na MT e a eólica e a solar na BT. Para

determinar a quantidade de GD que será inserida na rede de distribuição, primeiramente, é feito o mapeamento do potencial energético na região do estudo. Neste trabalho é analisado o estado do Rio Grande do Sul (RS), após o mapeamento, é feito o cálculo estimativo de quanto desse potencial será inserido na rede para horizontes de médio e longo prazos.

Para fazer o mapeamento do potencial energético no RS foi necessário primeiramente dividir o estado. Para isso, foram utilizadas as sete mesorregiões:

1. Mesorregião do Centro Ocidental Rio-grandense;
2. Mesorregião do Centro Oriental Rio-grandense;
3. Mesorregião Metropolitana de Porto Alegre;
4. Mesorregião do Nordeste Rio-grandense;
5. Mesorregião do Noroeste Rio-grandense;
6. Mesorregião do Sudeste Rio-grandense;
7. Mesorregião do Sudoeste Rio-grandense, como apresentado na Figura 2.



Figura 2 – Mapa do RS dividido geograficamente em sete mesorregiões.

Para cada uma das sete mesorregiões foi determinado o potencial energético para cada fonte: eólica, fotovoltaica, biomassa e PCH.

Energia eólica

O cálculo do potencial de geração de energia eólica adota uma variável taxa de ocupação média, equivalente a 1,5 MW/km², considerando que o potencial é calculado para áreas com ventos de velocidade média anual de 7m/s medidos a 50 metros de altura, equação (1):

$$E = \frac{A * TO * FC * m * dias}{1000000} \quad (1)$$

Em que:

E= energia anual;

A = áreas com ventos de 7 m/s em solo firme;

TO=taxa de ocupação média igual a 1,5 MW/km²;

FC=fator de capacidade igual a 0,29;

m=24 meses;

dias=365 dias.

Na Tabela 1 é apresentada a energia anual disponível de geração eólica para cada uma das sete mesorregiões do RS.

Pela análise da Tabela 1, percebe-se que a mesorregião com maior potencial eólico é a mesorregião 6, seguida da mesorregião 5. O menor potencial é encontrado na mesorregião 2.

Energia fotovoltaica

A estimativa do potencial fotovoltaico é calculada por meio da equação (2):

$$E = \frac{A * FU * FC * R * 0,277 * 365}{1000} \quad (2)$$

Em que:

E: Energia anual;

A: Área de estudo, em km²;

FU: Fator de utilização da área com coletores solares, em relação à área total,

FU=0,0001;

FC: Fator de conversão da energia irradiada para energia elétrica, FC=0,15;

R: Radiação solar diária, em MJ/m².dia.

A Tabela 2 apresenta a energia anual disponível de geração fotovoltaica em cada mesorregião do estado do RS.

Pela análise da Tabela 2, observa-se que a mesorregião com maior energia disponível é a região 5, seguida da região 7; a mesorregião que possui o menor potencial é a 2.

Biomassa

O cálculo do potencial energético a partir da queima da casca do arroz é baseado na quantidade de arroz produzido e considera somente a casca como resíduo aproveitável para a geração de energia, o que representa aproximadamente 30% do peso total do arroz. O poder calorífico da casca do arroz equivale a 3384,09 kcal/kg, considerando que a conversão de kcal/kg para kWh/kg se dá pela divisão por 860, e que o sistema opere 95% das horas anuais. A partir daí aplica-se a equação (3), com a produção de arroz obtida em [8], obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 4.

TABELA 1 – ENERGIA ANUAL DISPONÍVEL PARA GERAÇÃO EÓLICA EM CADA MESORREGIÃO DO RS

Regiões	Área Total (km ²)	Área (km ²)	Potência Instalável (GW)	Energia Anual (TWh/ano)
Mesorregião 1	25594,689	255,94689	0,38	0,97
Mesorregião 2	17192,037	171,192037	0,25	0,65
Mesorregião 3	29734,982	892,04946	1,33	3,39
Mesorregião 4	25749,128	772,47384	1,15	2,94
Mesorregião 5	64930,583	3246,52915	4,86	12,37
Mesorregião 6	42539,655	3403,1724	5,10	12,96
Mesorregião 7	62861,157	1885,83471	2,82	7,18

TABELA 2 – ENERGIA ANUAL DISPONÍVEL PARA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA EM CADA MESORREGIÃO DO RS

Regiões	Área Total (km ²)	Área (km ²)	Potência Instalável (GW)	Energia Anual (TWh/ano)
Mesorregião 1	25594,689	15	1520,79075	0,58
Mesorregião 2	17192,037	14	1419,4047	0,36
Mesorregião 3	29734,982	14	1419,4047	0,63
Mesorregião 4	25734,128	14	1419,4047	0,54
Mesorregião 5	64930,583	15	1520,79075	1,48
Mesorregião 6	42539,655	14	1419,4047	0,90
Mesorregião 7	62861,157	15	1520,79075	1,43

$$P = \frac{t * 0,3 * PCI * n}{860 * 8322} \quad (3)$$

Em que:

t: toneladas de arroz com casca;

PCI: poder calorífico da casca de arroz (kcal/kg);

n: eficiência de conversão das caldeiras, equivalente a 15%.

Para a cana-de-açúcar, o potencial energético é calculado pela equação (4), levando em consideração a eficiência do processo e a quantidade de cana colhida, obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 4.

$$P = \frac{T * 120}{1000 * 8322} \quad (4)$$

Em que:

t: toneladas de cana-de-açúcar.

O potencial a partir de resíduos da silvicultura leva em conta os resíduos gerados na fase de processamento da madeira, os quais representam 50% do peso total. O poder calorífico do resíduo representa 2000 kcal/kg, com o sistema operando 95% das horas anuais. O potencial energético é calculado pela equação (5), obtendo-se os resultados apresentados na Tabela 4.

$$P = \frac{t * 0,5 * PCI * n}{860 * 8322} \quad (5)$$

Em que:

t: toneladas de madeira em tora;

PCI: poder calorífico dos resíduos de madeira (kcal/kg);

n: eficiência de conversão das caldeiras, equivalente a 15%.

Para estimar o potencial energético a partir de dejetos suínos, aves e bovinos utiliza-se como base a quantidade de gás metano (m^3) contida no biogás, resultante da decomposição do esterco gerado diariamente nas propriedades criadoras dos rebanhos. Aplica-se a equação (6) com o efetivo desses rebanhos na área de estudo para se obter o potencial de metano ($t \text{ CH}_4/\text{ano}$) para cada origem de material. É considerado que $1m^3$ de biogás equivale a 1,95 kWh, chegando-se ao potencial da Tabela 4.

$$\text{Metano} \left(\frac{t \text{ CH}_4}{\text{ano}} \right) = 30 \text{ dias} * n^\circ \text{ cabeças} \dots$$

$$\dots * Et * Pb * \text{Conc CH}_4 * VE^{-1} \quad (6)$$

Em que:

Et: Esterco total [kgesterco/(dia.unidade geradora)];

Pb: Produção de biogás [kgbiogás/kgesterco];

Conc. _"#": Concentração de metano no biogás [%];

VE: Volume específico do metano [$kg_"/m^3_"$], sendo este igual a $0,670 \text{ kg_"/m}^3_"$.

Na Tabela 3 são apresentados os valores para conversão energética para diferentes tipos de efluentes.

A Tabela 4 mostra o potencial de biomassa a partir da queima do arroz, da cana-de-açúcar, da silvicultura e de dejetos de animais.

TABELA 3 – VALORES DE CONVERSÃO ENERGÉTICA PARA DIFERENTES TIPOS DE EFLUENTES

Origem do material	Et	Pb	Conc CH ₄
Suínos	2,25	0,062	66%
Bovinos	10	0,037	60%
Equinos	12	0,048	60%
Aves	0,18	0,055	60%

TABELA 4 – ENERGIA ANUAL DISPONÍVEL PARA GERAÇÃO DE BIOMASSA EM CADA MESORREGIÃO DO RS

Regiões	Potencial Arroz (MWh/ano)	Potencial cana-de-açúcar (MWh/ano)	Potencial Silvicultura (MWh/ano)	Potencial Dejetos animais (TWh/ano)	Total (TWh/ano)
Mesorregião 1	15,8118	1,3592	1,9014	17,088	17,08
Mesorregião 2	11,2071	1,7168	38,3527	21,95	21,95
Mesorregião 3	39,0044	2,4565	38,9746	18,61	18,61
Mesorregião 4	0,001	0,2924	24,5944	24,52	24,52
Mesorregião 5	0,6838	9,7449	6,42	58,85	58,85
Mesorregião 6	32,396	0,005	11,2244	23,25	23,25
Mesorregião 7	73,2327	0,6633	0,3808	48,87	48,87

TABELA 5 – POTÊNCIA DISPONÍVEL PARA GERAÇÃO DE HÍDRICA EM CADA MESORREGIÃO DO RS

Regiões	PCH Unidades	PCH Potência (kW)	CGH Unidades	CGH Potência (kW)	Total Potência (MW)
Mesorregião 1	3	40670	3	1974	42,644
Mesorregião 2	1	4861	2	700	5,561
Mesorregião 3	1	1520	1	1032	2,552
Mesorregião 4	16	310759	10	8082,6	318,8416
Mesorregião 5	28	204907,3	30	18429,5	223,3368
Mesorregião 6	0	0	1	700	0,7
Mesorregião 7	0	0	0	0	0

Pela análise da Tabela 4, observa-se que a mesorregião com maior energia disponível é a região 5, seguida da região 7; a mesorregião que possui o menor potencial é a 1.

PCH

O mapeamento do potencial hídrico torna-se um pouco mais complexo devido à quantidade de aproveitamentos hidrológicos já explorados, e da necessidade de avaliações detalhadas das características topográficas e hidrológicas de cada aproveitamento disponível. Para determinar o mapeamento deste potencial energético, foram considerados somente os pequenos aproveitamentos outorgados pela Aneel, como apresenta a Tabela 5.

Pela análise da Tabela 5 observa-se que a mesorregião com maior energia disponível é a região 4, seguida da região 5, a mesorregião que possui o menor potencial é a 7.

TECNOLOGIAS DE GERAÇÃO E PERFIL DE GERAÇÃO

Eólica

Para geração de energia eólica em BT foi considerada uma turbina com potência de 0,6 kW, modelo ista breeze® i-500; para a geração de energia eólica em MT foi considerada uma turbina com potência de 330 kW, enercon E33, sendo apresentadas as suas curvas das turbinas na Figura 3.

O perfil de geração para a fonte eólica depende da velocidade média dos ventos onde vai ser inserida a turbina eólica. Neste trabalho foi analisada a velocidade média dos ventos para as 7 mesorregiões do estado do RS, sendo apresentado na Figura 4 o perfil de geração para a turbina de 0,6 kW e para a turbina de 330 kW na mesorregião 5, para três faixas de geração: baixa, moderada e alta.

Fotovoltaica

Na geração de energia fotovoltaica foi considerado um painel de 0,250 kW Kyocera Solar. O perfil de geração para fonte

fotovoltaica depende da insolação diária onde vai ser inserido o painel solar. Neste trabalho foi analisada a insolação diária para cada uma das sete mesorregiões do RS. A Figura 5 apresenta o perfil de geração para um painel fotovoltaico de 0,250 kW na mesorregião 5, para três faixas de geração: baixa, moderada, e alta.

CENÁRIO DE INSERÇÃO DE GD

O objetivo do presente trabalho é uma metodologia para o planejamento de sistemas de distribuição, considerando a previsão de inserção de GD no sistema. Após ser feito o mapeamento do potencial

energético para cada uma das fontes de geração, é determinada a tecnologia utilizada e analisados os perfis de geração das fontes, além da previsão de inserção de GD para, posteriormente, fazer o planejamento do sistema considerando a GD.

A inserção da projeção de geração distribuída se fundamenta na avaliação da população potencialmente adquirente dessas tecnologias em função do benefício que lhe proporciona expresso retorno do investimento. A potencialidade é restrita pelo nível de renda e pelo consumo específico dos clientes, que passam a ser além de consumidores, produtores de

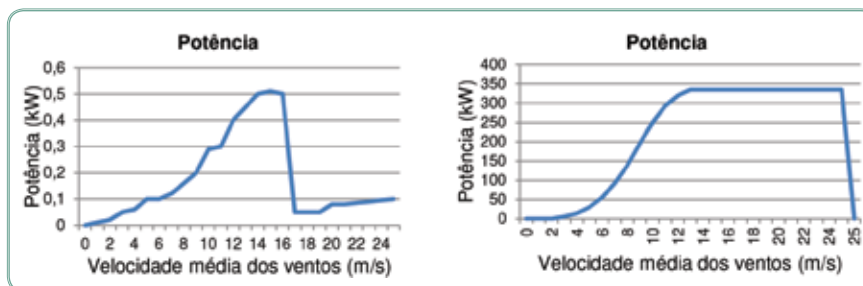


Figura 3 – Curva de geração eólica BT e MT para mesorregião 5.

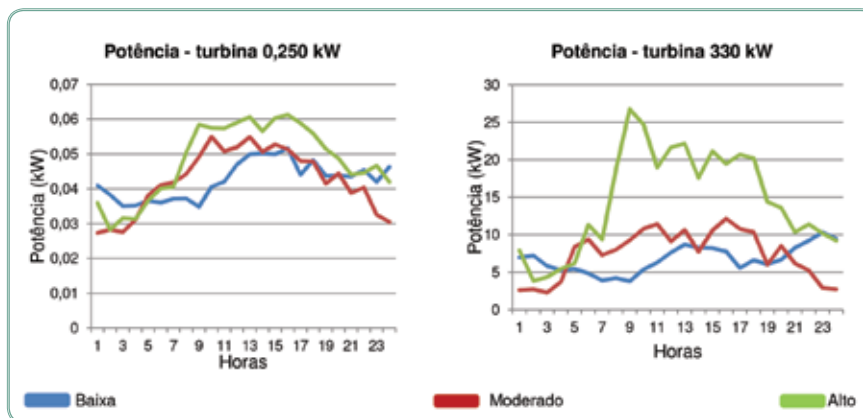


Figura 4 – Perfil de geração para turbina de 0,250 kW e para turbina de 330kW na mesorregião 5.

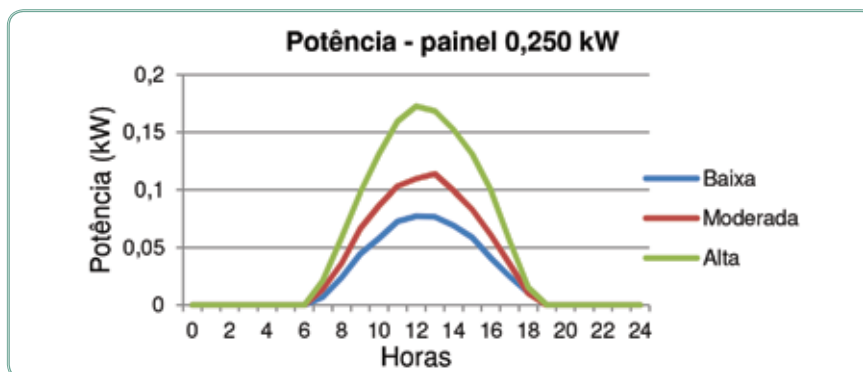


Figura 5 – Perfil de geração para um painel fotovoltaico de 0,250 kW na mesorregião 5.

TABELA 6 – NÚMERO DE CONSUMIDORES POR REGIÃO

Consumidores/Regiões	Residencial	Rural	Comercial	Industrial	Setor Público	Outros	Total
Mesorregião 1	163856	25315	12396	814	1835	20	204236
Mesorregião 2	190656	46812	19427	2065	2646	22	261628
Mesorregião 3	1703307	66305	170507	17336	10397	143	1967995
Mesorregião 4	359226	42066	41435	7716	3569	53	454065
Mesorregião 5	447380	82647	50171	4677	7944	187	593006
Mesorregião 6	304098	44589	25822	3422	2728	35	380694
Mesorregião 7	222544	23859	17095	1122	2343	35	266998

energia elétrica. A Tabela 6 apresenta a quantidade de consumidores por cada classe de consumo para cada uma das sete mesorregiões, considerando um crescimento de 1,87% ao ano.

Neste trabalho serão explorados três cenários de inserção de GD nos sistemas de distribuição: cenário 1: 0% da carga do sistema de distribuição atendida por GD; cenário 2: 5% da carga atendida por GD; e cenário 3: 10% da carga atendida por GD. Nos cenários 2 e 3 a GD será distribuída entre MT e BT, e por tipo de tecnologia de geração, levando em conta o potencial de uso da fonte.

RESULTADOS

As curvas de carga apresentadas na Figura 6 são as curvas propostas para os

consumidores de BT com inserção de GD para cenário 2: 5% da carga atendida por GD e para o cenário 3: 10% da carga atendida por GD.

Pode-se perceber, pela Figura 6, a diferença de perfil quando da utilização da GD; no cenário 2, a curva de carga fica mais uniforme e no cenário 3 há um deslocamento do horário de ponta do sistema.

Está sendo desenvolvido um software para considerar a influência da GD nos estudos de planejamento, sendo a tela do software apresentada na Figura 7.

CONCLUSÃO

Com a inserção da GD nos estudos de planejamento, observa-se uma mudança na curva de carga dos consumidores de

baixa e média tensão, se fazendo necessária uma operação e controle diferenciado nas redes de distribuição por parte das concessionárias, quando comparada à não utilização da GD. O perfil típico da curva de carga sofre mudanças expressivas devido à utilização da GD em algumas horas no decorrer dos dias.

Este trabalho tem como diferencial uma metodologia para o planejamento de sistemas de distribuição considerando a previsão de inserção de geração distribuída. Essa metodologia pode ajudar as concessionárias na hora de fazer o planejamento do sistema.

REFERÊNCIAS

- (1) KAGAN, N., GOUVEA, M., MAIA, F., DUARTE, D., LABRONICI, J., GUIMARÃES, D. S., BARRETO NETO, A., SILVA, J. F. R., PARTICELLI, F., *Redes elétricas inteligentes no Brasil: análise de custos e benefícios de um plano nacional de implantação*. – 1 ed. – Rio de Janeiro: Synergia: iABRADEE; Brasília: ANEEL, 2013.
- (2) OLIVEIRA, B. V., *Incentivos tarifários para conexão de geração distribuída em redes de média tensão*. Dissertação Engenharia Elétrica. UFMG, Belo Horizonte, 2009.
- (3) ANEEL, “Resolução Normativa nº 482 – Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigerção distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica, o sistema de compensação de energia elétrica, e dá outras providências”, 17 de abril de 2012.
- (4) MARTINS, C. C. *Análise do Impacto da Geração Distribuída em Sistemas Elétricos*

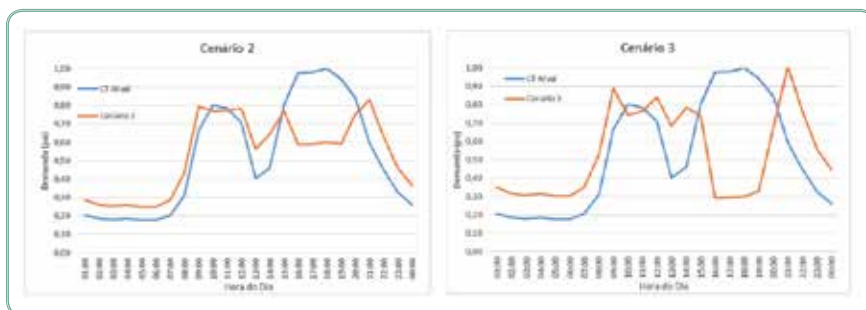


Figura 6 – Nova curva típica para o cenário 2 e para o cenário 3.

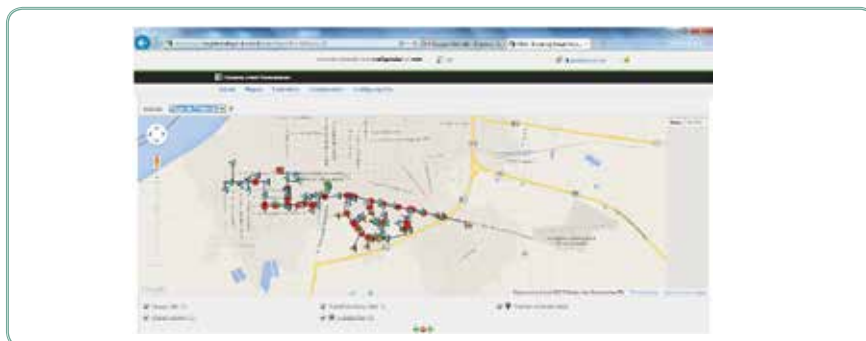


Figura 7 – Tela do software que está sendo desenvolvido.

de Potência Através de Simulação Rápida no Tempo. Trabalho Completo apresentado no Congresso Brasileiro de Automática, 2004.

(5) AMARANTE, O. A. C., SILVA, F. J. L., “Atlas eólico: Rio Grande do Sul”, 1. ed. Porto Alegre: SEMC, 2002.

(6) CAPELETTO, G. J., MOURA, G. H. Z., “Balanço energético do Rio Grande do Sul 2011: ano base 2010”, Porto Alegre: CEEE/SEINFRA, 2011.

(7) COELHO, S. T., MONTEIRO, M. B., KARNIOL, M. R., “Atlas de bioenergia do Brasil”, 2. ed. São Paulo: ENBIO, 2012.

(8) FEE, dados aberto: <http://dados.fee.tche.br/>

(9) AZZOLIN, H. N., CANHA, L.N. *Metodologia para mapeamento e priorização de recursos renováveis com a aplicação no planejamento de distribuição.* IX CBPE, Florianópolis, 2014.

(10) MME, “Plano nacional de energia 2030”, 1. ed. Brasília: MME/EPE, 2007.

**Laura Lisiane Callai dos Santos é engenheira eletricista, com mestrado em engenharia elétrica e doutoranda em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria. É professora na Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul.*

Luciane Neves Canha possui graduação, mestrado e doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria.

Daniel Pinheiro Bernardon possui graduação, mestrado e doutorado em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria. É professor da Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Departamento de Eletromecânica e Sistemas de Potência.

Roberto André Pressi possui graduação em engenharia elétrica pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos e é mestrando em Engenharia de Produção na Universidade Federal do Rio Grande do Sul. É engenheiro da AES Sul

Nelson Knak Neto possui graduação, mestrado e atualmente é doutorando em engenharia elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria.

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

Acompanhe todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br

Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para redacao@atitudeeditorial.com.br