

Aplicação *web* para corte de geração eólica na região de Nova Santa Rita - Povo Novo

Matheus N. S. M. de L.¹, Fabrício Y. K. T.², Werik R. de P.³, Thiago P. F.⁴.

¹Aluno do Curso de Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Santa Catarina -
IFSC, Florianópolis, Brasil (matheus.marques_96@hotmail.com)

²Professor do Curso de Engenharia Elétrica pelo Instituto Federal de Santa Catarina -
IFSC, Florianópolis, Brasil (takigawa@ifsc.edu.br)

³Aluno do Curso de Sistemas da Informação pela Universidade Federal de Santa
Catarina - UFSC, Florianópolis, Brasil (werik-1998@hotmail.com)

⁴Aluno do Curso de Engenharia Mecatrônica pelo Instituto Federal de Santa Catarina
- IFSC, Florianópolis, Brasil (thiagoproflorindo@gmail.com)

Resumo: No Brasil, na operação do Sistema Interligado Nacional (SIN) são utilizados os Sistemas Especiais de Proteção (SEPs), que consistem em equipamentos que protegem os ativos da rede. No entanto, na indisponibilidade dos SEPs pode ser necessário um controle manual do operador, expondo o mesmo a tomadas de decisão em tempo real. Neste sentido, foi desenvolvida uma aplicação *web* para o auxílio no controle otimizado de geração, baseado nos procedimentos de rede de uma região específica do SIN.

Palavras-chave: Sistemas especiais de proteção; operação em tempo real, indisponibilidade de lógicas, tomada de decisão, simulador *web*

INTRODUÇÃO

O Sistema Interligado Nacional (SIN) é o sistema de produção e de transmissão de energia elétrica do Brasil, sendo caracterizado como hidro-termo-eólico (ONS, 2020a). Atualmente existe a predominância de usinas hidrelétricas, entretanto nos últimos anos políticas mais sustentáveis estão sendo adotadas para diversificar a matriz energética (BRASIL, 2020).

O responsável pela operação do SIN é o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS). O ONS coordena e controla a operação do SIN, de forma a garantir a segurança do suprimento de energia elétrica de forma contínua em todo o país, atendendo os critérios de confiabilidade estabelecidos nos Procedimentos de Rede (PRs) (ONS, 2020b).

Adicionalmente, o ONS conta com o auxílio dos Sistemas Especiais de Proteção (SEPs) instalados no SIN. Os SEPs são equipamentos de proteção avançados, que além de proteger o equipamento individualmente atuando como proteção tradicional, integram vários equipamentos, com diversas lógicas de funcionamento, desde a abertura de Linhas de Transmissão (LTs) até o controle de geração (ONS, 2016).

Entretanto, em determinadas situações, os SEPs podem se encontrar indisponíveis, expondo o operador a operar manualmente e/ou com auxílio de planilhas simplificadas, para normalizar eventos indesejados ou situações previstas em estudos internos.

Um caso singular e que será abordado neste trabalho é o de indisponibilidade do SEP na região sul do Rio Grande do Sul. Esse caso está previsto nas normativas definidas no PR denominado: Esquemas Especiais da Área 525 kV da região Sul, código: IO-EE.S.5SU, revisão: 66, de 2018 (ONS, 2018).

Essa região possui vários complexos eólicos, uma usina termelétrica e duas conexões com Uruguai, por meio das conversoras Melo e Rivera. E, de acordo com o PR (ONS, 2018), na ocorrência da indisponibilidade do SEP, o operador em tempo real deve controlar a geração dessas usinas e conexões monitorando as diretrizes estabelecidas em estudos prévios de planejamento elétrico da região. Os conjuntos de geração eólica da região são:

- Conjunto Santa Vitória do Palmar (CSVPA)
- Conjunto Marmeleiro 2 (CMRO2)
- Conjunto Quinta 138 kV (CQ138)
- Conjunto Quinta 69 kV (CQU69)
- Conjunto Livramento 2 (CLIV2)

Nesse sentido, foi desenvolvida uma aplicação *web*, para apoio ao operador, específica para o problema mencionado. Adicionalmente, também foi efetuada a modelagem matemática dos procedimentos descritos no PR possibilitando ajustes que podem auxiliar o operador em tempo real (FLORINDO, 2019).

A aplicação proposta tem como objetivo, atendendo o exposto no PR, recomendar os valores de corte de geração dos conjuntos eólicos, em função do limite de fluxo na LT de 525 kV Nova Santa Rita/Povo Novo. A Figura 1 ilustra a LT de estudo em destaque

excluindo as outras linhas de transmissão da região (SINDAT, 2020).



Figura 1. LT 525 kV Nova Santa Rita/Povo Novo.

MATERIAL E MÉTODOS

A aplicação foi desenvolvida usando as linguagens de programação *PHP*, *GNU Octave* e *JavaScript (JS)* na arquitetura *Model View Controller (MVC)* que visa a otimização de uso do servidor e tende a proporcionar um melhor uso simultâneo. De modo geral, a MVC é uma arquitetura que tem como premissa, acionar o servidor apenas em algumas situações e não mantém contato constante. A Figura 2 ilustra a arquitetura.

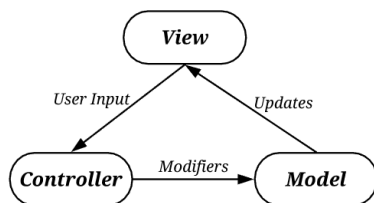


Figura 2. Estrutura MVC.

A *Model* geralmente é a parte responsável pelos processos executados dentro do servidor; a *Views* é a área que ocorre as interações do usuário com a ferramenta e é onde os dados são exibidos; e o *Controller* é quem intermedia esses dois processos e decide qual o momento de solicitar um procedimento, dado ou execução de função (REENSKAUG, 1979).

No intuito de otimizar o desenvolvimento e superar obstáculos encontrados durante o mesmo, foi feito o uso de *frameworks* conceituados em suas respectivas áreas. O *AngularJS* proporcionou a criação da ferramenta em *single page* e embasou a estrutura MVC neste projeto, pois possui uma boa integração com as demais linguagens e é de fácil aplicação, além de possuir uma vasta documentação (DAO, 2016).

Outra ferramenta utilizada na aplicação foi o *Vis JS framework*, para representação das unidades geradoras e das linhas de transmissão. Destaca-se que com o *VisJS* foi possível exibir os elementos na aplicação de

modo dinâmico, já que o mesmo efetua de maneira automática e otimizada a abordagem da posição por escala de pixels. A Figura 3 exibe o resultado do sistema desenvolvido com a *framework*.

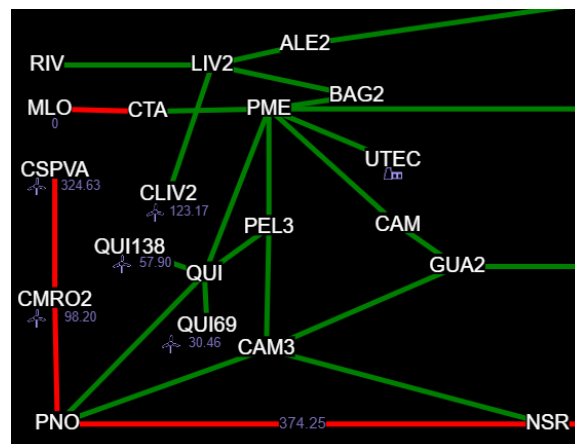


Figura 3. Sistema elétrico da região, criado com o *Vis.js*.

Os demais *frameworks* utilizados são citados a seguir:

- *Bootstrap*, responsável pelo *design* e estilo da ferramenta (CSS)
- *JQuery* e *JQuery UI*, responsáveis por algumas interações com a *View* (JS)
- *Alertifyjs*, responsável pelos alertas das ações (JS)
- *Ionicons*, biblioteca de ícones (HTML)
- *Chartjs*, biblioteca de código aberto para visualização de dados (JS)
- *jsPDF*, responsável por gerar o relatório em pdf (JS)

As identidades visuais dos recursos usados podem ser observadas na Figura 4.



Figura 4. Identidade visual dos recursos utilizados.

O algoritmo de otimização implementado está baseado no PR (ONS, 2018), que define de maneira geral o fluxo limite na LT de 525 kV Nova Santa Rita/Povo Novo na ocorrência da indisponibilidade das lógicas do SEP. O valor de Fluxo Excedente (FE) é a diferença do fluxo real na LT e o limite definido nos PRs. A Figura 5 exibe o fluxograma do algoritmo proposto (FLORINDO, 2019).

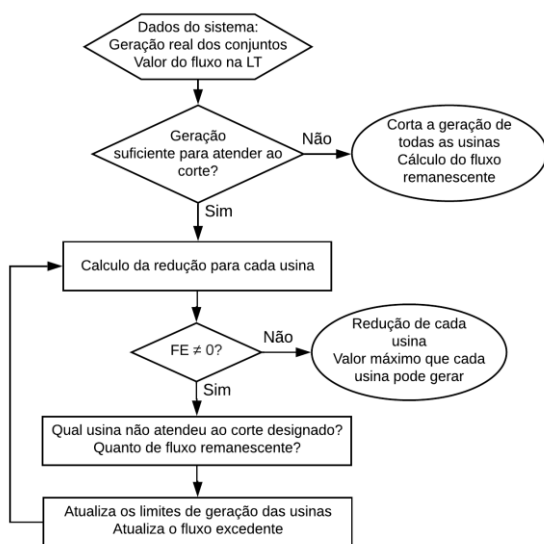


Figura 5. Fluxograma do algoritmo proposto para o controle de geração da região.

Com base nessa lógica foi desenvolvido um *script* usando o *software Octave* com a função *glpk* (GNU Linear Programming Kit). Esse *software* foi instalado no servidor e é responsável pela parte de otimização da aplicação (GNU, 2020).

Tendo definidos os recursos e a modelagem do problema, foi possível desenvolver a lógica do funcionamento da aplicação *web*, ilustrado na Figura 6.

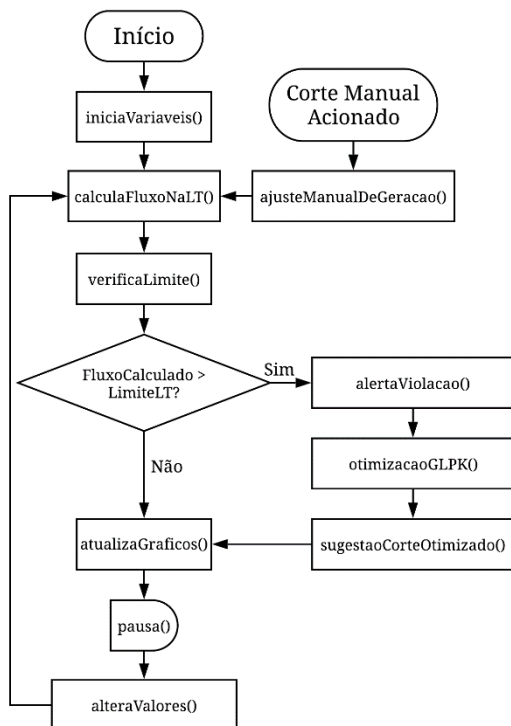


Figura 6. Fluxograma da lógica do funcionamento da aplicação *web*.

Na aplicação *web*, o sistema elétrico já se encontra com a problemática da indisponibilidade das lógicas

definida no PR (ONS, 2018). Os valores de geração dos conjuntos eólicos e do sistema elétrico da região são alterados a cada momento. O valor inicial de geração dos conjuntos é determinado de maneira aleatória respeitando a capacidade instalada de cada conjunto. Então, a cada 10 segundos os valores de geração são atualizados (também de forma aleatória), multiplicando o valor antigo por um valor randômico entre 0.95 e 1.1. Dessa forma os valores de geração tendem a se elevar, o que aumenta o fluxo na LT. Caso a geração alcance o valor da capacidade instalada do conjunto eólico, ocorrerá um decremento aleatório, o valor antigo será multiplicado por um valor randômico entre 0.85 e 0.95, impedindo exceder a capacidade instalada do conjunto.

A indisponibilidade de um equipamento e importação de energia impactam diretamente no limite de fluxo da LT definido no PR (ONS, 2018). Certos períodos foram predeterminados para apresentar indisponibilidade de algum equipamento ou importação de energia. A Figura 7 exhibe os limites na LT dependendo da situação, segundo o PR em questão.

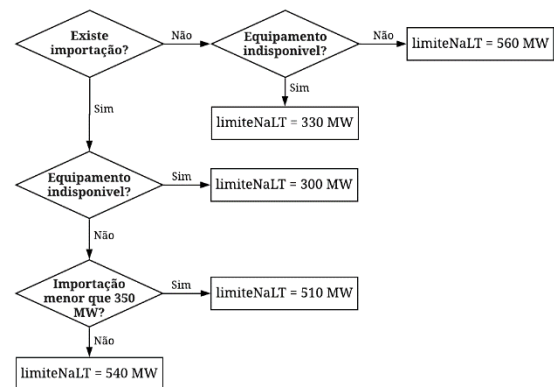


Figura 7. Limite da LT dependendo da situação do PR.

Destaca-se que a aplicação *web* identifica a situação automaticamente e o valor limite é exibido dinamicamente no gráfico juntamente com o fluxo real da LT. Desta forma, a cada amostra do valor, a aplicação verifica se o limite está sendo violado, caso positivo é exibido um alerta e é acionada automaticamente a função otimização para exibir a sugestão de redução de geração ao operador.

A lógica da otimização pode ser modificada usando o botão de configurações no cabeçalho da aplicação, nele, o usuário tem a possibilidade de escolher¹:

- corte de geração em relação a capacidade instalada ou em relação a geração do conjunto
- se o conjunto Marmeleiro 2 é priorizado no corte ou não

Por outro lado, o operador pode reduzir os valores de geração dos conjuntos manualmente usando os *sliders* ou os *inputs* para cada conjunto eólico, de maneira individualizada.

A aplicação *web* foi alocada em um servidor para proporcionar acesso geral para usuários externos e a qualquer momento, para isso foi feito uso da estrutura do Grupo de Estudos em Sistemas de Energia (GESE) do Instituto Federal de Santa Catarina (IFSC) que forneceu uma máquina virtual com servidor *Apache* instalado (GESE, 2020).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O principal resultado obtido foi o ambiente de simulação *web*, nele o usuário pode reproduzir um evento de violação de limite na LT NSR/PNO, conforme normativas do PR (ONS, 2018). A Figura 6 exibe a interface da aplicação *web* desenvolvida.

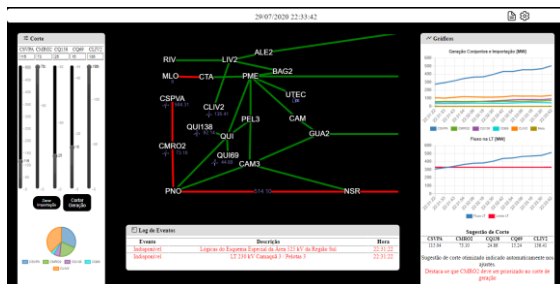


Figura 6. Interface da aplicação *web*.

No lado esquerdo é possível zerar a importação (ação prioritária segundo o PR) e cortar o montante de geração dos conjuntos eólicos conforme desejado. Na parte inferior é ilustrado um gráfico circular em que cada cor corresponde a um conjunto eólico e expressa os valores de corte de geração dos *sliders* ou *inputs*.

Caso o fluxo na LT esteja sendo violado, a aplicação destaca o botão para zerar a importação (caso exista importação) e exibe uma mensagem informando que o CMRO2 deve ser priorizado no corte. Se o operador tentar reduzir a geração dos conjuntos existindo importação de energia, a aplicação impedirá o corte e informará que a importação deve ser zerada prioritariamente.

No lado direito são exibidos os gráficos com os dados atuais de geração e de importação (conversora Melo),

juntamente com o limite da LT e seu fluxo. Esses valores são atualizados constantemente, simulando uma intermitência operativa.

Na região inferior se encontra o *log* de eventos, nele são exibidos eventos relevantes na simulação. Na parte superior está o relógio e dois botões, sendo o primeiro para gerar o relatório da simulação efetuada e o segundo com as configurações possíveis na otimização da aplicação *web*. E, finalmente, no centro é ilustrado o sistema elétrico em questão, com os valores atualizados de 10 em 10 segundos.

Para exemplificar a aplicação *web* desenvolvida, será ilustrado um exemplo didático, ilustrando sua utilização. A Figura 7 e 8 exibem os gráficos do caso apresentado, contendo os valores de geração dos conjuntos e o fluxo na LT, respectivamente. A configuração *default* da aplicação *web* está definida de acordo com o que está estabelecido no PR (ONS, 2018), sendo que o proporcional dos cortes está relacionado à capacidade instalada dos conjuntos eólicos e o CMRO2 é priorizado no corte de geração.

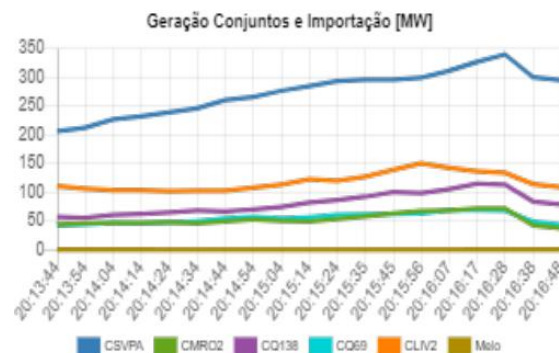


Figura 7. Valores da geração dos conjuntos eólicos e importação de energia.

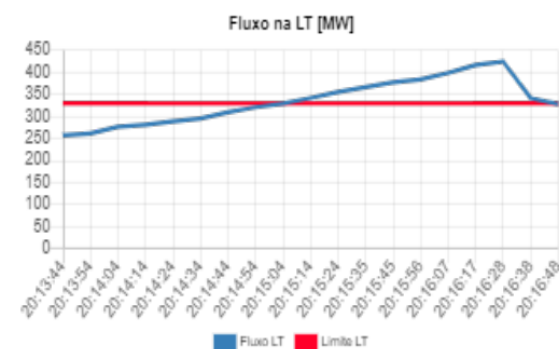


Figura 8. Valores do fluxo real e limite na LT.

Para o caso exemplificado, com a indisponibilidade da lógica do Esquema Especial da Área 525 kV da Região Sul, a aplicação *web* informa ao operador que caso ocorra a violação do fluxo na LT, o mesmo deve efetuar os possíveis ajustes de acordo com o PR. No

¹ Destaca-se que essas opções não estão dispostas no PR e são apenas sugestões dos autores, conforme pode ser observado em Florindo (2019).

exemplo a ser seguido, não estava ocorrendo importação e o limite na LT é de 330 MW durante todo período do caso apresentado.

Como pode ser observado na Figura 8, no instante 20:15:14 o limite da LT foi violado, então a aplicação *web* passou a exibir um alerta de violação juntamente com a sugestão de corte de geração para limitar o fluxo na LT.

No instante 20:16:34 ocorreu o corte de geração dos conjuntos eólicos proposto pelo usuário e foi reduzido um total de 140 MW. Na Tabela 1 estão ilustrados os valores sugeridos pelo otimizador da aplicação *web* e os valores operados pelo usuário nesta operação.

Tabela 1. Comparativo entre valor sugerido e a operação efetuada do primeiro corte.

	Sugestão da otimização (MW)	Primeiro corte realizado pelo usuário (MW)
Instante	20:16:34	20:16:34
CSVPA	37,83	40,00
CMRO2	72,19	30,00
CQ138	8,18	30,00
CQ69	5,01	20,00
CLIV2	46,93	20,00
Corte Total	170,14	140,00
Fluxo LT	330,00	341,88

Pode-se observar na Figura 8, no instante 20:16:34 o fluxo na LT foi reduzido significativamente, entretanto não foi suficiente para reduzir ao limite estabelecido do PR. Como pode ser observado faltou reduzir 11,88 MW na LT para que o fluxo ficasse no valor limite estabelecido no PR.

Desta forma, como o primeiro corte não foi suficiente, o usuário teve que efetuar o segundo corte (instante 20:16:45). Na Tabela 2 estão ilustrados os valores sugeridos pelo otimizador da aplicação *web* e os valores operados nesta segunda ação.

Tabela 2. Comparativo entre valor sugerido e a operação efetuada do segundo corte.

	Sugestão da otimização (MW)	Segundo corte realizado pelo usuário (MW)
Instante	20:16:45	20:16:45
CSVPA	0	5,00
CMRO2	16,97	5,00
CQ138	0	5,00
CQ69	0	5,00
CLIV2	0	5,00
Corte Total	16,97	25,00
Fluxo LT	330,00	327,93

Idealmente, seguindo a sugestão dos valores otimizados da aplicação *web*, o fluxo na LT iria ser igual ao limite estabelecido no PR, ou seja, o fluxo ficaria no limite de 330 MW. Entretanto, o intuito

neste artigo é ilustrar a flexibilidade operativa do simulador.

Analisando de maneira geral, somando os dois cortes realizados, foi reduzido um total de 165 MW de geração nos conjuntos. Por outro lado, a aplicação *web* havia indicado um corte que totalizava 170,14 MW, respeitando o PR.

Na operação efetuada, mesmo tendo ocorrido uma redução de 5,14 MW no montante total cortado, afirma-se que o PR não foi plenamente acatado. Primeiro, pois o CMRO2 deveria ser reduzido prioritariamente frente aos outros conjuntos e o restante do corte deveria ser distribuído entre os outros conjuntos proporcionalmente à capacidade instalada.

Por outro lado, o principal motivo que levou o corte ser inferior ao sugerido pela aplicação *web* refere-se aos valores de sensibilidade dos conjuntos, sendo que os conjuntos que apresentam maior impacto no fluxo da LT são CSVPA, CMRO2 e CQ138, de acordo com o PR. E observando a escolha do usuário, observa-se que a maior parte do corte está concentrado nos conjuntos CSVPA, CMRO2 e CQ138.

Destaca-se que a aplicação *web* possui ajustes distintos que poderiam ser utilizados, variando algumas condições estabelecidas no PR (ONS, 2018). Essas condições foram definidas pelos autores e pode auxiliar a reduzir o corte de geração dos conjuntos eólicos, nesta situação específica, atendendo o limite de fluxo estabelecido no PR e sendo mais equânime na redução.

Adicionalmente, caso o usuário deseje, a aplicação *web* possibilita ao usuário baixar o relatório no formato de pdf contendo o resumo da sua simulação para fins de estudo e avaliação das ações tomadas.

CONCLUSÃO

O desenvolvimento da ferramenta *web* está disposta para acesso gratuito (GESE, 2020) e possibilita a simulação de diversas situações relacionadas ao problema exposto. O simulador *web* proporciona o estudo da região segundo o PR analisado e que, recentemente, passou por alterações, modificando pontualmente o procedimento. Destaca-se que a região, enquanto não tiver a ampliação das LTs passará por possíveis ajustes manuais devido as suas peculiaridades (intercâmbio, conjuntos eólicos, usina termelétrica, linha de 500 kV, entre outros pontos).

Por outro lado, sob a ótica do operador, é interessante ter uma sugestão rápida e otimizada para o controle de geração respeitando o PR. Essa sugestão poderia diminuir o tempo de esforço do operador em analisar pontualmente tabelas e os documentos normativos para fazer o corte necessário. Ressalta-se que o simulador foi desenhado conforme o interesse dos autores e não se assemelha com as telas da operação em tempo real.

Por fim, destaca-se que é um problema de relevância no setor e que foi estrategicamente abordado, indicando uma proposta de solução, baseada nos PRs e no desenvolvimento *web*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao IFSC e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento do projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS

DAO, Vu. *Development of a front-end application using AngularJS: 1UP Media company case*. 2016 - Curso de Programme In Bit, Laurea University Of Applied Sciences, Leppävaara, 2016. Cap. 6. Disponível em: <<https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/120244/1301725-Thesis.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 12 jul. 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Plano Decenal de Expansão de Energia 2021. 2020. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/36208/461966/07+-+Plano+Decenal+de+Expans%C3%A3o+de+Energia+-+PDE+2021/c6f4d6d5-b358-de37-01cb-0a1d786a5881>>. Acesso em: 16 jul. 2020.

FLORINDO, Thiago Pedro. Estudo De Caso Baseado Nos Esquemas Especiais De Proteção Do Procedimento De Rede. Trabalho de Conclusão de Curso – Instituto Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ifsc.edu.br/bitstream/handle/123456789/1067/TCC_Thiago_Pedro_Florindo.pdf?sequence=1>. Acesso em: 12 jul. 2020.

GESE. Grupo de Estudos em Sistema de Energia. 2020. Disponível em: <<https://gese.florianopolis.ifsc.edu.br/>>. Acesso em: 12 jul. 2020.

GNU. *GLPK (GNU Linear Programming Kit)*. 2020. Disponível em: <<https://www.gnu.org/software/glpk/>>. Acesso em: 12 jul. 2020.

ONS. Submódulo 11.4 - Sistemas especiais de proteção. 2016. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/%2FProcedimentosDeRede%2FM%C3%B3dulo%2011%2FSubm%C3%B3dulo%2011.4%2FSubm%C3%B3dulo%2011.4%202016.12.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2020.

ONS. Procedimentos de rede submódulo 10.9: Operação em Contingência. 2017.

ONS. Esquemas Especiais da Área 525 kV da região Sul. Código: IO-EE.S.5SU. Revisão: 66. Procedimento de Rede. 2018.

ONS. O que é o SIN. 2020a. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/o-que-e-o-sin>>. Acesso em: 12 jul. 2020.

ONS. O que é o ONS. 2020b. Disponível em: <<http://ons.org.br/paginas/sobre-o-ons/o-que-e-ons>>. Acesso em: 12 jul. 2020.

REENSKAUG, Trygve. *THING - MODEL - VIEW - EDITOR an Example from a planning system*. 1979. Disponível em: <<http://heim.ifi.uio.no/~trygver/1979/mvc-1/1979-05-MVC.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2020.

SINDAT. Sistema Interligado Nacional - Rede de Operação - Horizonte 2023. Disponível em: <<http://sindat.ons.org.br/SINDAT/Home/ControleSistema>>. Acesso em: 12 jul. 2020.