



# Automatização de Estudos de Fluxo de Potência para Apoio à Tomada de Decisão na Contratação do Montante de Uso do Sistema de Transmissão (MUST)

**Tema:** Planejamento da Expansão

**Autores:** Aline Pontes, Fernanda Decothé

**Co-Autores:** Beatriz Abdalla, Débora Microni, Iago Rocha

**Empresa:** Light Serviços de Eletricidade S.A

---

## Resumo

O planejamento da expansão de sistemas elétricos de potência se baseia em diversos estudos, inclusive, estudos de fluxo de potência. Comumente, estes são realizados por meio de *softwares*, que simulam um único caso, ou um pequeno grupo de casos, por vez. Com o objetivo de incrementar a segurança do estudo contemplando diversos cenários, e minimizar o tempo dedicado para esta empreitada, este trabalho apresenta uma ferramenta desenvolvida em linguagem de programação Python, em conjunto com o *software* ANAREDE, que automatiza a execução de estudos de fluxo de potência, contemplando diversos cenários que os engenheiros responsáveis pelo estudo definirem. Esta ferramenta exporta os resultados em forma de tabela personalizável pelo usuário. Assim, além de ser possível a contemplação de grande número de cenários, é poupado tempo dos especialistas para executar as simulações, permitindo que haja mais tempo para avaliação dos resultados e tomada de decisões. Nesta aplicação, foram analisadas mais de 2.430 combinações de cenários, tendo sido executadas por um computador em menos de 24 horas.

## 1. Introdução

Estudos de fluxo de potência são cálculos que determinam a magnitude e o ângulo da tensão nas barras de um sistema elétrico de potência, assim como a potência ativa e reativa que circulam em cada ramo do sistema (STEVENSON JR., 1978, p. 206-207). Esses ramos são compostos por linhas de transmissão, transformadores de potência e outros equipamentos, enquanto isso, as barras representam as subestações. As equações que envolvem este cálculo não são lineares e existem diversos métodos numéricos para resolver este problema (GRAINGER & STEVENSON JR., 1994, p. 329-356). Comumente, são empregadas ferramentas computacionais, que executam as simulações. Os *softwares* que realizam estes cálculos são importantes aliados na condução dos estudos de sistemas elétricos de locais populosos e industrializados, que possuem uma grande quantidade de barras e circuitos.

Para efetuar o planejamento da expansão destes sistemas a curto, médio e longo prazo, é necessário avaliar diversos cenários, que englobam condições de carregamento, estação do ano, dia da semana, horário, diferentes cenários de despacho das usinas geradoras de energia, entrada de novas cargas, contingências e demais possibilidades que os engenheiros responsáveis pelo estudo considerarem relevantes.

Considerando a quantidade expressiva de casos a serem avaliados, neste trabalho, foi desenvolvida uma ferramenta computacional que automatiza estes estudos, reduzindo o tempo gasto com as simulações, e deixando mais tempo para as análises críticas dos especialistas.

Na introdução, foi apresentada a motivação do trabalho, apresentando uma visão geral do que se trata o estudo de fluxo de potência. Nos tópicos a seguir, é descrita a metodologia implementada para a automatização dos estudos de fluxo de potência. São apresentadas as ferramentas computacionais utilizadas para possibilitar o uso desta metodologia, e, na sequência, há uma exposição do processo para o qual foi feita a aplicação. São citadas algumas especificidades do sistema elétrico da Light e, na sequência, são detalhadas etapas da execução do estudo. Dentre as conclusões obtidas, está o ganho confiança, dada a maior quantidade de cenários, e redução do tempo do estudo.

## 2. Desenvolvimento

Para automatizar os estudos de fluxo de potência, foi desenvolvido um programa em linguagem de programação Python (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2024), em conjunto com o *software* ANAREDE (CEPEL, 2024). Esta linguagem foi escolhida para este projeto por ser amplamente usada em desenvolvimento de *software*, se mostrando eficiente, fácil de aprender, aplicável à diferentes plataformas e gratuita. O *software* Análise de Sistemas Elétricos de Potência em Regime Permanente, ou ANAREDE, é um programa computacional desenvolvido pelo CEPEL (Centro de Pesquisas de Energia Elétrica).

O ANAREDE possibilita a realização de estudos para operação e planejamento de sistemas elétricos de potência. Além de ser o *software* mais popular para estudos desse tipo no Brasil, as bases de dados para estudos elétricos publicadas pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) e pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) são produzidas em seu formato de dados. Este programa recorre a algoritmos com métodos iterativos para resolução de sistemas com equações algébricas não lineares de forma a obter a solução da rede operando em regime permanente. O estudo do fluxo de potência é imprescindível à obtenção do estado operativo da rede elétrica para condições definidas de carga, geração, topologia, e determinadas restrições operacionais.

Por possuir a função de utilização de portas lógicas, o ANAREDE pode ser inicializado por um *prompt* de comando, o qual necessita de um arquivo com extensão *.pwf* ou *.txt* para ser executado. Esse arquivo ou algoritmo de execução pode ser criado através de um simples bloco de notas desde que siga o modelo de leitura do programa. Através da própria interface gráfica do programa, é possível executar estes comandos carregando os arquivos produzidos, ou, pode-se abrir o ANAREDE por outro programa externo e realizar a execução. Esta possibilidade facilita a utilização do programa desenvolvido em Python, tendo o ANAREDE como motor de cálculo, uma vez que se torna viável a execução em massa do programa.

Primeiro, são definidos os cenários a serem estudados, depois, são executadas as simulações, com a aplicação de cada cenário definido, e, por fim, os resultados das simulações são exportados para uma tabela, que pode ser personalizada a gosto do especialista que está analisando os resultados. A Figura 1 representa esquematicamente as etapas da metodologia que foi empregada para realizar os estudos de fluxo de potência para apoiar a tomada de decisão no processo de contratação do Montante de Uso do Sistema de Transmissão (MUST).

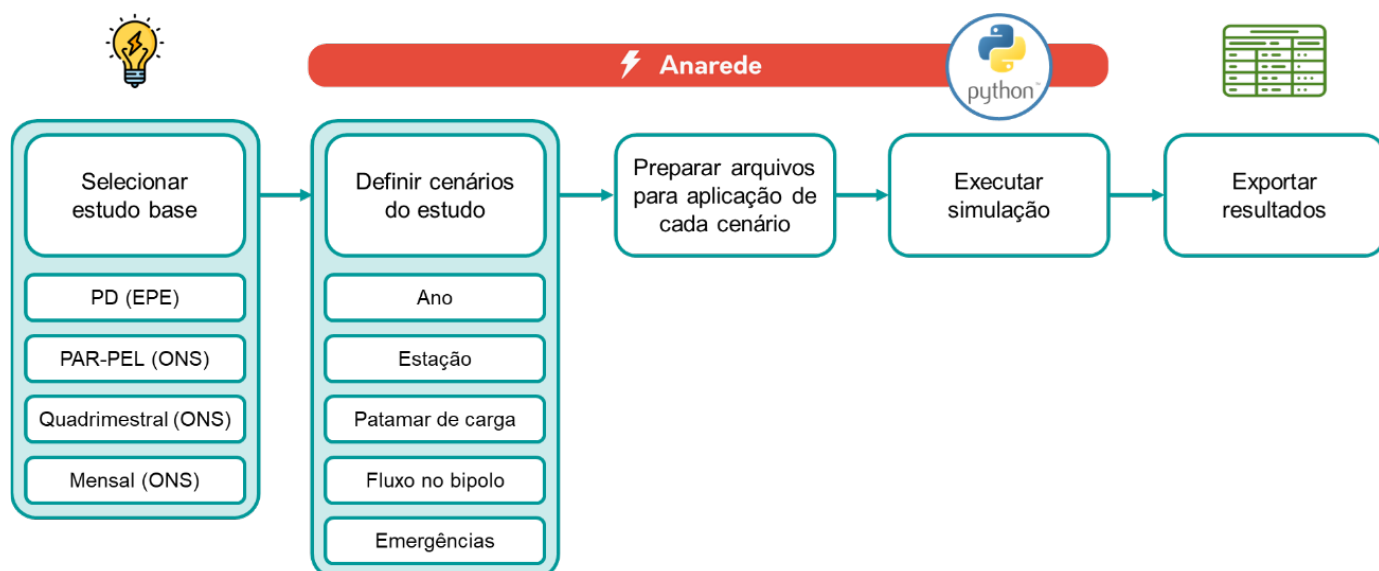


Figura 1 - Esquemático da metodologia implementada nos estudos para apoiar o processo de contratação do MUST

No Brasil, anualmente, as distribuidoras de energia devem determinar o MUST. A regra desta contratação é definida no documento intitulado Regras dos Serviços de Transmissão de Energia Elétrica, em seu módulo 5 (ANEEL, 2022), aprovado pela Resolução Normativa (REN) número 1.001 de janeiro de 2022 (ANEEL, 2022; ANEEL, 2022; ANEEL, 2022; ANEEL, 2020).

Os valores de MUST estão associados à máxima potência elétrica injetável no sistema, e são definidos para cada ponto de conexão e regime tarifário (ponta e fora de ponta), para os quatro anos civis seguintes e especificado em contrato. Na vigência do MUST contratado, caso haja ultrapassagem de demanda, caracterizada pela medição em valor superior a 110% do contrato, ou sobre contratação, caracterizada pela medição em valor inferior a 90% do contrato, a eficiência da contratação de uso do sistema de transmissão é apurada pelo ONS, podendo levar ao pagamento de encargos por parte da distribuidora (ANEEL, 2022). Neste processo, a distribuidora de energia elétrica deve contratar junto ao ONS o montante de potência elétrica que será absorvido pela rede da distribuidora, no próximo ano, em cada ponto de conexão com a rede básica. Assim, a distribuidora deve prever a potência elétrica máxima que será suprida proveniente da transformação de níveis acima de 230 kV (rede básica), para o nível de alta tensão da distribuidora em sua área de concessão (ANEEL, 2022). Nesse contexto, há necessidade de uma análise robusta para estimar o melhor valor a ser contratado para cada ponto de conexão e cada posto tarifário da distribuidora, com o intuito de evitar o pagamento de eventuais encargos por penalidades, os quais, dependendo da demanda do ponto de conexão, podem ser elevados.

A Rede de Distribuição da Light, atualmente, se conecta ao sistema interligado em 10 pontos de conexão, que podem ser observados nas Figuras 2 e 3. O sistema no nível de tensão 138 kV da Light apresenta uma configuração particular devido aos paralelos existentes entre esses pontos de conexão, o que torna a rede malhada, e a quantidade de fontes geradores de energia na região, tornando a avaliação do MUST mais complexa do ponto de vista elétrico.

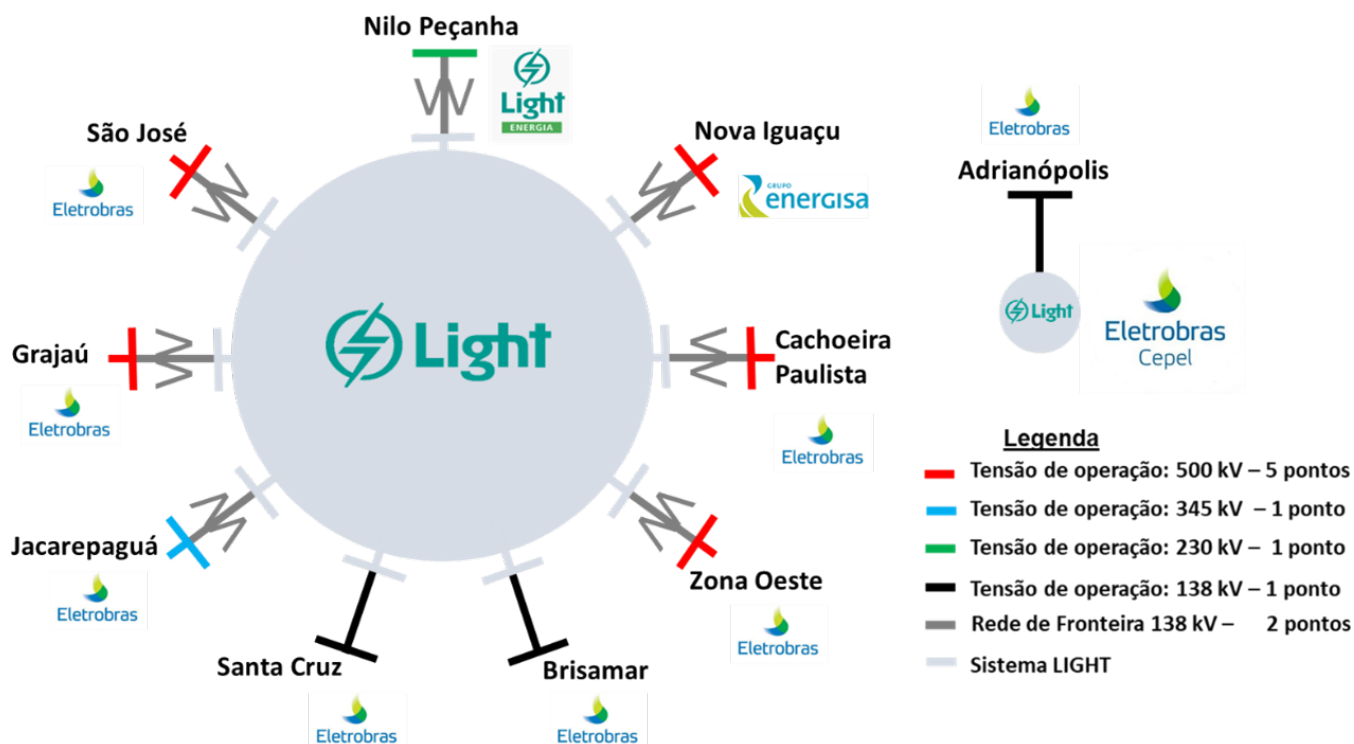


Figura 2 - Pontos de conexão Light

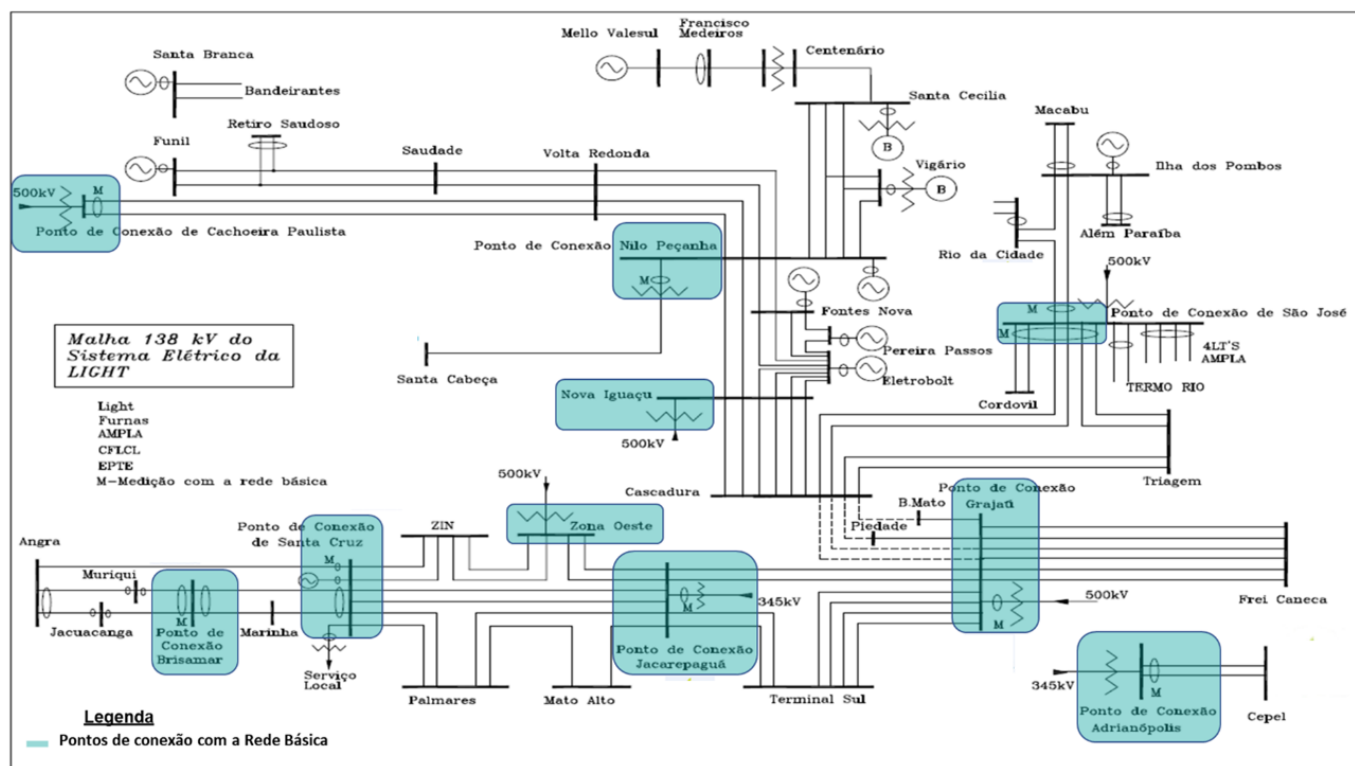


Figura 3 - Diagrama unifilar dos pontos de conexão Light

Para estas previsões, foram utilizadas duas principais fontes de informação: dados históricos e estudos de fluxo de potência. É feita uma análise do passado, para entender quais são os eventos mais recorrentes, que devem ser considerados nas simulações, além de outras possibilidades.

Os dados históricos são obtidos por meio de medidores localizados nos pontos de conexão. Nesse sentido, quanto maior for a quantidade de dados históricos, melhor se torna a previsibilidade de ocorrência de eventos na rede e possíveis violações do valor contratado, mediante a análise técnica da equipe. Com isso, é possível utilizar esses valores de medição para estimar o valor a ser contratado, ou seja, aumenta a assertividade decisão de modo a evitar possíveis ultrapassagens e pagamentos de encargos.

Os estudos de fluxo de potência são realizados de forma a englobar as modificações futuras na rede elétrica, os cenários possíveis, e as emergências que podem ocorrer em equipamentos, considerando diversas outras variáveis. Neste estudo, os cenários considerados foram:

1. Variações dos patamares de carga;
2. Variações dos cenários de Despacho de usinas da região;
3. Cenários possíveis do fluxo no Bipolo  $\pm 800$  kV Xingu - Terminal Rio;
4. Cenários de emergência em equipamentos do Sistema Light e da Rede Básica.

O programa desenvolvido em Python executa na prática as mesmas tarefas que o engenheiro executaria ao realizar o estudo. A grande vantagem oferecida pelo programa reside no fato de estas tarefas serem executadas de forma automatizada, de maneira que o trabalho dos especialistas consiste em preparar as premissas do estudo e conduzir as análises críticas após a simulação, evitando a dedicação de tempo para trabalhos mecânicos e repetitivos. A Figura 4 contém o fluxograma simplificado das etapas realizadas pela ferramenta.

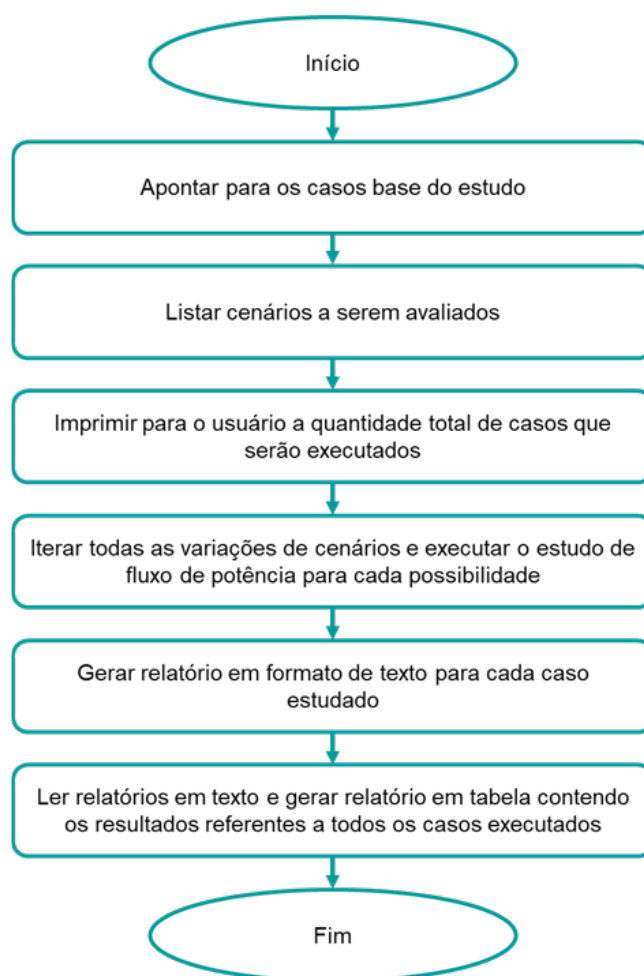


Figura 4 - Fluxograma simplificado da ferramenta desenvolvida

Considerando as possibilidades de cenários, foram executados 135 casos multiplicados pela quantidade de emergências analisadas mais uma unidade (caso com o sistema íntegro). Foram simuladas 17 emergências, totalizando 2.430 casos, além de simulações adicionais, feitas posteriormente, de forma manual, para análises específicas.

Com os resultados gerados pelo programa desenvolvido em Python, que são exportados em um formato de tabela, os engenheiros personalizam a visualização, de maneira a avaliar cada ponto de conexão da melhor forma, e tomam a decisão. A tabela resultado foi organizada por ponto de conexão, detalhando os casos e valores de potência ativa fluindo por cada um. Para a tomada de decisão, observou-se o histórico verificado de fluxo nas fronteiras e comparou-se este valor com o resultado tabelado. A Tabela 1 exemplifica o formato de tabela utilizado para as análises feitas individualmente por fronteira. Na decisão, também é importante considerar a probabilidade de determinada combinação de cenários acontecer. As emergências consideradas nos estudos são desde simples até muito severas. A decisão sobre qual valor de potência contratar depende da estratégia adotada pela distribuidora, considerando os riscos de haver sub ou sobre contratação.

Tabela 1 - Formato da tabela utilizada para avaliação dos resultados

Ano	Patamar de Carga	Fluxo no Bipolo (MW)	Despacho de Usinas	Emergência	MUST (MW)
2025	Máxima Noturna	4000	Caso Base	Emergência de um transformador 500/138 kV da Subestação Resende	XXXX

Para alguns pontos, foi necessário executar mais casos, devido à influência de outras variáveis além das já citadas. Um destes pontos é a fronteira em Jacarepaguá, cuja potência absorvida pelo sistema elétrico Light é influenciada pela configuração no transformador defasador da subestação da rede básica em Angra. Para avaliar este ponto, foi simulado o dobro de casos, ou seja, 4.860 casos, proporcionando maior conforto na decisão.

Esse processo permitiu que a parte braçal do estudo demandasse menos tempo, deixando mais tempo para as análises críticas que basearam a decisão na contratação do MUST. Sendo assim, existem muitas aplicações que podem ser desenvolvidas a partir deste ponto. Podem ser produzidos painéis interativos que utilizam os dados tabelados como entrada. Podem ser criados visuais que facilitam a interpretação dos resultados. Esta metodologia pode ser utilizada não só para apoiar a contratação do MUST como também para diversos outros estudos.

### 3. Conclusão

A partir deste trabalho, foi possível evitar que a equipe de especialistas precisasse realizar muitas etapas repetitivas no computador, tomando tempo que poderia estar sendo utilizado para a análise dos resultados e tomada de decisão. Dessa forma, além do trabalho apresentado neste artigo, muitos outros estudos de fluxo de potência foram automatizados, trazendo eficiência para a equipe e permitindo que mais cenários fossem analisados. Se os estudos de fluxo de potência fossem realizados manualmente, seria inviável contemplar tamanha quantidade de casos. Esta metodologia pode ser utilizada por qualquer distribuidora e há liberdade para que cada especialista utilize as ferramentas que julgar melhor.



Como sequência deste desenvolvimento, vêm sendo feitas melhorias no programa em Python para que a execução das simulações seja mais veloz, assim como a exportação dos resultados. Um trabalho futuro consiste em aprimorar a visualização dos resultados, mantendo a liberdade para personalização do usuário, mas mostrando telas que facilitem a tomada de decisão por parte dos especialistas.

#### 4. Referências bibliográficas

- ANEEL. *RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 905, DE 8 DE DEZEMBRO DE 2020*. Acesso em 16 de Janeiro de 2025, disponível em <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2020905.html>
- ANEEL. *Módulo 5 - Regras dos Serviços de Transmissão - Agência Nacional de Energia Elétrica*. Acesso em 16 de Janeiro de 2025, disponível em [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020905\\_2\\_4.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020905_2_4.pdf)
- ANEEL. *Módulo 6 - Regras dos Serviços de Transmissão - Agência Nacional de Energia Elétrica*. Acesso em 14 de Janeiro de 2025, disponível em [https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020905\\_2\\_5.pdf](https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2020905_2_5.pdf)
- ANEEL. *RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.001, DE 18 DE JANEIRO DE 2022*. Acesso em 16 de Janeiro de 2025, disponível em <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20221001.pdf>
- ANEEL. *RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.005, DE 15 DE FEVEREIRO DE 2022*. Acesso em 16 de Janeiro de 2025, disponível em <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20221005.pdf>
- CEPEL. *ANAREDE-CEPEL, 2024*. Acesso em 14 de Janeiro de 2025, disponível em <https://www.cepel.br/produtos/anared-2/anarede/>
- GRAINGER, J. J., & STEVENSON JR., W. D. *Power System Analysis*, Singapura, McGraw-Hill, 1994, p. 329-356.
- PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Welcome to Python, 2024*. Acesso em 14 de Janeiro de 2025, disponível em <https://www.python.org/>
- STEVENSON JR., W. D. *Elementos de Análise de Sistemas de Potência*, São Paulo, McGraw-Hill, 1978, p. 206-207.