

Arlei Bichels

Sistemas Elétricos de Potência

Métodos de Análise e Solução



Sistemas Eléctricos de Potência

Métodos de Análise e Solução



UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Reitor Luiz Alberto Pilatti
Vice-Reitora Vanessa Ishikawa Rasoto



EDITORA DA UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Coordenadora-Geral Camila Lopes Ferreira
Coordenadora-Adjunta Emanuelle Torino

CONSELHO EDITORIAL

Titulares Anna Luiza Metidierl Cruz Malthez
Awdry Feisser Miquelin
Douglas Sampaio Henrique
Eduardo Leite kruger
Francis Kanashiro Meneghetti
Ligia Patrícia Torino Guassu
Marcos Antonio Florczak
Rogério Caetano de Almeida
Thomaz Aurélio Pagioro

Suplentes Adriane de Lima Penteado
Alberto Yoshihiro Nakano
Alessandra Dutra
Anderson Catapan
Cintia de Lourdes Nahhas Rodacki
Ricardo Luders
Ricardo Yuji Sado
Rodrigo Alexandre de Carvalho Xavier
Sara Tatiana Moreira

Arlei Bichels

Sistemas Elétricos de Potência

Métodos de Análise e Solução

© 2017 Editora da Universidade Tecnológica Federal do Paraná



4.0 Internacional

Esta licença permite o download e o compartilhamento da obra desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-la ou utilizá-la para fins comerciais.

Disponível em: <<http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/>>.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

B583s

Bichels, Arlei

Sistemas elétricos de potência : métodos de análise e solução [Recurso eletrônico] / Arlei Bichels.– Curitiba: EDUTFPR, 2018.
497 p.: il. ; 23 cm.

ISBN: 978-85-7014-208-5 (E-book)

E-book disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/>

1. Sistemas de energia elétrica. 2. Engenharia elétrica. 3. Circuitos elétricos - Análise. I. Título.

CDD (22. ed.) 621.3191

Bibliotecário: Walison Oliveira CRB-9/1871

Coordenação Editorial Camila Lopes Ferreira
Emanuelle Torino

Diagramação Vanessa Constance Ambrosio

Projeto Gráfico André Hagemeyer Bichels

Ilustração Paulo Ricardo Groxko do Nascimento
Conrado Gabriel Alves de Moraes

Normalização Camila Lopes Ferreira

Revisão Ortográfica e Gramatical Adão de Araújo

Revisão Técnica Alvaro Augusto Waldrigues de Almeida
Andrea Lucia Costa
Annemarien Gehrke Castagna
Elisabete Nakoneczny Moraes

EDUTFPR

Editora da Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Av. Sete de Setembro, 3165

80230-901 Curitiba PR

<http://portal.utfpr.edu.br/editora/>

AGRADECIMENTOS

O autor agradece em especial ao engenheiro Conrado Gabriel Alves de Moraes pelas contribuições técnicas, pela revisão dos exemplos e pelo árduo trabalho na confecção dos desenhos e fórmulas necessárias à formatação deste livro.

Ao engenheiro Ambrosio Melek pelas discussões técnicas sobre Sistemas Elétricos de Potência e pela revisão do texto que muito contribuíram para a elaboração deste livro.

À Companhia Paranaense de Energia (COPEL) pela cessão de fotos, dados, medições e características técnicas do sistema elétrico.

SUMÁRIO

PREFÁCIO	13
APRESENTAÇÃO	15
1 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	17
1.1 HISTÓRICO	19
1.2 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA	24
1.3 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA DO FUTURO	26
REFERÊNCIAS	29
2 CARACTERÍSTICAS DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	31
2.1 COMPONENTES DOS SEP	33
2.2 EQUIPAMENTOS DOS SEP	34
2.3 CONFIGURAÇÃO / TOPOLOGIA DOS SEP	35
2.4 GERAÇÃO DOS SEP	39
2.5 SISTEMA DE TRANSMISSÃO DOS SEP	40
2.6 REDE DE DISTRIBUIÇÃO DOS SEP	43
2.7 CARGA DOS SEP	43
2.8 OPERAÇÃO DOS SEP	46
2.9 PLANEJAMENTO DA OPERAÇÃO E DA EXPANSÃO DOS SEP	48
2.9.1 Fluxo de Potência	49
2.9.2 Curto-Circuito	50
2.9.3 Estabilidade ou Transitório Eletromecânico	50
2.9.4 Sobretensões	50
2.9.5 Confiabilidade	51
2.9.6 Compensação de Reativo	51
2.9.7 Fluxo de Potência Ótimo	51
REFERÊNCIAS	51
3 CONCEITOS BÁSICOS DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	53
3.1 REDES ELÉTRICAS	55
3.1.1 Definições e Convenções	55
3.1.2 Tipos de Ramos	57

3.1.3 Elementos de Ramos	58
3.2 REPRESENTAÇÃO FASORIAL	61
3.2.1 Tensão e Corrente.....	61
3.2.2 Impedância e Admitância	64
3.2.3 Potência	64
3.3 Sistemas Trifásicos	68
3.3.1 Representação Monofásica Unifilar.....	68
3.3.2 Diagrama Unifilar.....	72
3.3.3 Diagrama de Impedâncias	74
3.4 REDES ELÉTRICAS.....	77
REFERÊNCIAS.....	79
4 MODELOS PARA A SIMULAÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	81
4.1 MODELOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	84
4.2 MODELOS DE TRANSFORMADOR.....	98
4.2.1 Transformador de Dois Enrolamentos.....	98
4.2.2 Transformador de Três Enrolamentos	101
4.2.3 Modelo de Transformador com Relação de Transformação Fora da Nominal.....	104
4.2.4 Modelo de Transformador com Relação de Transformação Fora da Nominal Complexa (com Defasamento – Transformador Defasador)	110
4.2.5 Modelo de Autotransformador	114
4.3 MODELOS DE GERADOR SÍNCRONO.....	115
4.3.1 Modelo de Gerador Síncrono para Análise em Regime Permanente de Fluxo de Potência ...	116
4.3.2 Modelo de Gerador Síncrono para Análise em Regime Permanente de Curto-Circuito.....	118
4.3.3 Modelo de Gerador Síncrono para Análise em Regime Transitório de Estabilidade	120
4.3.3.1 Modelo I	125
4.3.3.2 Modelo II	126
4.3.3.3 Modelo III	126
4.4 MODELOS DE REGULADORES DE TENSÃO E DE VELOCIDADE	131
4.4.1 Reguladores de Tensão	132
4.4.2 Reguladores de Velocidade	132
4.5 MODELOS DE CARGA.....	133
4.5.1 Modelo de Carga para Análise em Regime Permanente de Fluxo de Potência.....	137
4.5.2 Modelo de Carga para Análise em Regime Permanente de Curto-Circuito.....	138
4.5.3 Modelo de Carga para Análise em Regime Transitório e Dinâmico de Estabilidade	138
4.6 MODELOS DE RELÉS.....	141
PROBLEMAS	141

REFERÊNCIAS.....	142
ADENDO	143
5 MÉTODOS DE ANÁLISE E SOLUÇÃO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	149
5.1 POR UNIDADE.....	151
5.1.1 Definição	151
5.1.2 Vantagens da Utilização de PU	152
5.1.3 Escolha de Bases.....	153
5.1.4 Mudança de Bases.....	154
5.1.5 Tensão e Potência Bases na Solução de Problemas em PU	156
5.1.6 Impedância de Transformadores em PU	157
5.2 COMPONENTES SIMÉTRICAS.....	162
5.2.1 Operador a	163
5.2.2 Equações Básicas.....	164
5.2.3 Desacoplamento entre Sistemas de Sequência.....	167
5.2.4 Impedâncias e Circuitos de Sequência dos Equipamentos dos SEP	170
5.2.4.1 Máquinas síncronas.....	170
5.2.4.2 Linhas de transmissão	174
5.2.4.3 Transformadores	176
5.2.5 Tensões de Sequência.....	181
5.2.6 Circuitos de Sequência	182
5.2.7 Potência em Termos de Componentes de Sequência	184
5.3 EQUAÇÕES NODAIS	186
5.3.1 Matriz de Admitâncias Nodais.....	187
5.3.2 Matriz de Impedâncias Nodais.....	189
5.3.3 Formação de Matrizes Nodais.....	190
5.3.3.1 Formação da matriz y_{barra}	191
5.3.3.2 Formação da matriz z_{barra}	191
5.3.3.3 Inversão parcial de matrizes nodais.....	196
5.3.3.4 Redução de matrizes nodais.....	197
PROBLEMAS.....	199
REFERÊNCIAS.....	203
6 FLUXO DE POTÊNCIA.....	205
6.1 HISTÓRICO	207
6.2 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA	208
6.3 EQUACIONAMENTO DO PROBLEMA	209

6.4 MÉTODO DE GAUSS.....	215
6.4.1 Primeira Iteração	222
6.4.2 Segunda Iteração	224
6.5 MÉTODO DE GAUSS-SEIDEL.....	224
6.6 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON	225
6.7 MÉTODO DE NEWTON-RAPHSON DESACOPLADO	240
6.8 MÉTODO CC.....	244
6.9 MÉTODO DA MATRIZ Z_{BARRA}	249
6.10 CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA EM LINHAS E EM TRANSFORMADORES DO SISTEMA	250
6.11 CÁLCULO DO FLUXO DE POTÊNCIA COM PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	256
6.12 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE SOLUÇÃO DO FLUXO DE POTÊNCIA	258
PROBLEMAS.....	261
REFERÊNCIAS.....	261
7 CURTO-CIRCUITO	263
7.1 INTRODUÇÃO	265
7.2 CURTO-CIRCUITO SIMÉTRICO (TRIFÁSICO)	268
7.3 CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO NO PERÍODO TRANSITÓRIO.....	269
7.4 REATÂNCIAS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS	272
7.5 CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	275
7.6 CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO TRIFÁSICO.....	277
7.7 EQUIVALENTES DE CURTO-CIRCUITO	281
7.8 CÁLCULO DA CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO ASSIMÉTRICO	284
7.8.1 Curto-Circuito Fase-Terra (Monofásico).....	285
7.8.2 Curto-Circuito Fase-Fase (Bifásico)	288
7.8.3 Curto-Circuito Fase-Fase-Terra (Bifásico à Terra)	290
7.9 CURTO-CIRCUITO ATRAVÉS DE UMA IMPEDÂNCIA DE FALTA	298
7.10 CÁLCULO MATRICIAL DE CURTO-CIRCUITO	302
7.11 CÁLCULO DE CURTO-CIRCUITO COM PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	307
7.12 MEDIÇÕES E REGISTROS DE CORRENTE DE CURTO-CIRCUITO	311
7.13 UTILIZAÇÃO DE CÁLCULOS DE CURTO-CIRCUITO.....	313
7.13.1 Ajuste da Proteção do Sistema	313
7.13.2 Determinação das Características de Malhas de Terra.....	313
7.13.3 Determinação das Características de Disjuntores	314
7.13.4 Redução das Correntes de Curto-Circuito	314
7.13.5 Condições de Aterramento do Sistema	315
7.13.6 Correntes de Curto-Circuito em Cabos Para-Raios de Linhas de Transmissão	316

7.13.7 Cálculo de Sobretensões de Regime Permanente	316
PROBLEMAS.....	317
REFERÊNCIAS.....	318
8 ESTABILIDADE	319
8.1 HISTÓRICO	322
8.2 ESTABILIDADE DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	323
8.3 SINCRONISMO	327
8.4 ESTABILIDADE EM REGIME PERMANENTE.....	333
8.5 ESTABILIDADE TRANSITÓRIA.....	341
8.5.1 Equação de Oscilação	344
8.5.2 Análise de Estabilidade Transitória pelo Método da Igualdade de Áreas.....	352
8.5.3 Análise de Estabilidade Transitória pelo Método Passo a Passo	362
8.5.4 Análise de Estabilidade Transitória pelo Método Clássico em Sistema Multimáquinas	369
8.5.5 Análise de Estabilidade Dinâmica	372
8.6 ANÁLISE DE ESTABILIDADE COM PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	375
8.7 CAUSAS DE PERTURBAÇÃO E FONTES DE AMORTECIMENTO EM SISTEMAS ELÉTRICOS	382
8.7.1 Causas de Perturbações no Sistema e Efeitos sobre a Estabilidade	383
8.7.2 Fontes de Amortecimento no Sistema e Efeitos sobre a Estabilidade	383
8.8 MÉTODOS E AÇÕES CORRETIVAS PARA A ESTABILIDADE DE SISTEMAS DE GRANDE PORTE	384
8.8.1 Reatância dos Geradores.....	387
8.8.2 Constante de Inércia.....	387
8.8.3 Sistemas de Excitação com Resposta Rápida.....	387
8.8.4 Sinais Estabilizadores.....	387
8.8.5 Uso de Disjuntores Rápidos.....	388
8.8.6 Construção de Subestações Seccionadoras.....	388
8.8.7 Aplicação de Compensação Série	388
8.8.8 Uso de Compensação em Derivação	389
8.8.9 Uso de Resistores de Frenagem	389
8.8.10 Abertura Automática de Geradores	389
8.8.11 Corte Automático de Carga	390
8.8.12 Separação do Sistemas em Ilhas.....	390
8.8.13 Religamento Automático.....	390
8.8.14 Proteção <i>Out-of-Step Blocking and Tripping</i>	391
8.9 ESTUDOS DE ESTABILIDADE EM SISTEMAS DE GRANDE PORTE	391
8.10 ANÁLISE FINAL.....	393
PROBLEMAS.....	394

REFERÊNCIAS.....	395
APÊNDICE A – SÍMBOLOS E UNIDADES.....	397
APÊNDICE B – PARÂMETROS TÍPICOS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO	405
APÊNDICE C – TERMOS USUAIS EM INGLÊS.....	411
ANEXO A – PARÂMETROS TÍPICOS DE TRANSFORMADORES	415
ANEXO B – PARÂMETROS TÍPICOS DE MÁQUINAS SÍNCRONAS	421
ANEXO C – CARACTERÍSTICAS TÍPICAS DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	429
ANEXO D – PLANEJAMENTO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA	437
ANEXO E – CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO ELÉTRICO DE SISTEMAS ELÉTRICOS DE POTÊNCIA.....	447

PREFÁCIO

Durante vários anos, o professor Arlei Bichels trabalhou na elaboração deste livro. A partir da digitalização de suas notas de aula, o livro foi sendo construído com o objetivo de fornecer os conceitos fundamentais e a modelagem matemática aplicados ao planejamento e operação dos sistemas elétricos de potência (SEP).

O livro inicia apresentando um histórico do desenvolvimento do setor elétrico e as perspectivas aguardadas para um futuro próximo. No Capítulo 2 são descritas as características, os componentes de geração e transmissão e as topologias dos sistemas de energia elétrica.

Os Capítulos 3 e 4 destinam-se à representação das redes elétricas e modelos utilizados para representar os equipamentos elétricos, aplicando os conceitos de circuitos elétricos e máquinas elétricas, os quais comumente são pré-requisitos das disciplinas de SEP.

No Capítulo 5 são apresentados os principais métodos de análise e solução usados em sistemas de potência, tais como representação em sistemas por unidade, componentes simétricas e matrizes de admitância e impedância, usando uma linguagem simples e direta, mas com o detalhamento matemático necessário aos estudos na área.

O Capítulo 6 descreve o equacionamento dos estudos da operação em regime permanente, apresentando a formulação do fluxo de potência e os principais métodos iterativos desenvolvidos para sua solução, como Gauss, Gauss-Seidel, Newton-Raphson e Desacoplado, e métodos diretos como Método CC e Método da Matriz Z, com exemplos numéricos para cada método exposto. Com sua experiência na utilização de programas computacionais para simulação de sistemas de grande porte, o autor traça um comparativo entre todos os métodos apresentados, descrevendo as vantagens e desvantagens de cada um deles.

O cálculo de curto-circuito é explicado de forma muito eficiente no Capítulo 7, por meio do equacionamento e exemplos numéricos que auxiliam o entendimento das técnicas para tratar correntes elétricas e tensões em situações de faltas trifásicas ou desequilibradas. O Método Z-barras é analisado utilizando um sistema de pequeno porte. Os resultados obtidos nos cálculos são comprovados pelo programa Anafas, usado em concessionárias e empresas do setor elétrico para cálculo de curto-circuito. Além disso, um diferencial do livro é a descrição minuciosa das informações obtidas a partir do cálculo das correntes de falta, informações que são essenciais a um projeto adequado do SEP.

Os conceitos sobre estabilidade dos sistemas de potência em regime permanente e durante perturbações na rede elétrica também são apresentados no livro, que dessa forma engloba os principais tópicos estudados em cursos de graduação. Por sua ampla abordagem, esta obra pode ser indicada como referência principal para um curso de um ano de duração, ou dois cursos semestrais consecutivos.

O aspecto prático dos inúmeros cálculos é enfatizado a cada capítulo, dando ao leitor uma visão da importância dos estudos e aplicabilidade dos resultados a cada etapa do planejamento.

Ademais, o livro contém apêndices com parâmetros típicos de linhas de transmissão aéreas, transformadores e máquinas síncronas, além de fornecer características sobre equipamentos de potência, tais como tensões adequadas de operação, capacidade de interrupção de disjuntores, níveis de isolamento de para-raios, regulação de tensão nos transformadores, entre outros dados coletados na Copel, os quais podem subsidiar estudos e trabalhos de alunos com fornecimento de dados reais.

Andrea Lucia Costa
Professora Titular do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

APRESENTAÇÃO

A utilização crescente da energia elétrica em pouco mais de um século, desde o início da utilização prática para iluminação, levou à construção de usinas geradoras com grandes potências e localizadas a grandes distâncias de outras usinas e dos centros de carga a serem atendidos, demandando grandes linhas de transmissão e subestações, do que resultou a formação de grandes sistemas elétricos interligados que cobrem todo o território dos países e se interligando até mesmo aos sistemas elétricos de países vizinhos.

A interligação de todas as áreas de consumo e usinas do país, formando um grande sistema interligado, possibilita maior confiabilidade e qualidade no atendimento às cargas e viabiliza a integração das fontes de geração deste sistema com a otimização do uso dos reservatórios das hidrelétricas, com a geração em usinas onde existem maiores reservatórios ou maior afluência nos rios, conjuntamente com termelétricas de maior custo resultando, desta forma, no menor custo para a energia gerada.

Grandes sistemas interligados, com grande quantidade de componentes como usinas, linhas de transmissão, subestações e tantos outros equipamentos podem ter grandes problemas com falhas em alguns componentes que podem levar a grandes desligamentos com impactos econômicos e sociais de graves consequências dada a dependência da energia elétrica, permanentemente e em todas as atividades.

O planejamento, a operação e a manutenção têm, assim, fundamental importância para o funcionamento e desempenho dos sistemas elétricos. Dada a dimensão e a complexidade destes sistemas, a única forma prática de efetuar análises completas e efetivas é com a utilização de programas computacionais de grande porte utilizando modelos matemáticos dos diversos equipamentos utilizados nos sistemas elétricos atuais.

O objetivo deste livro é apresentar os conceitos básicos de um assunto, com a teoria fundamental, os modelos matemáticos dos componentes do sistema e alguns exemplos e dados e parâmetros de equipamentos que mais se aproximem da aplicação prática, possibilitando ao leitor complementar a informação teórica.

Além da complementação teórica, o leitor terá uma complementação prática com a utilização dos principais programas computacionais comerciais utilizados na análise de Sistemas Elétricos de Potência, dos quais é apresentado um exemplo simples de arquivo

de entrada de dados e de resultados obtidos nos respectivos capítulos. Desta forma, o leitor terá uma informação mais completa do assunto visualizando o desempenho e os problemas que ocorrem em um sistema elétrico real de grande porte.

Arlei Bichels

SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

A facilidade com que a energia elétrica pode ser transformada em outras formas de energia – luminosa, mecânica, térmica, sonora – rapidamente e sem poluição, levou a humanidade a uma gigantesca utilização desta forma de energia, a tal ponto que atualmente a energia elétrica é considerada vital para o desenvolvimento de qualquer país.

Para levar a energia elétrica a todos os consumidores, grandes usinas, utilizando as mais variadas formas de força motriz – hidráulica, térmica, atômica, eólicas e solares – são interligadas entre si e às subestações dos grandes centros de carga por meio de longas linhas de transmissão em altas e extra-altas tensões, formando gigantescas redes de transmissão que, juntamente com as linhas e subestações de subtransmissão e de distribuição, formam os **sistemas elétricos de potência (SEP)**.

1.1 HISTÓRICO

Já na década de 1880, a transmissão de energia elétrica por meio de corrente contínua era conhecida e utilizada na Alemanha com tensão de 2,4 kV e distância de 59 km. A utilização da eletricidade era basicamente para iluminação, com lâmpadas a arco voltaico, e galvanização.

O desenvolvimento da lâmpada elétrica, simultaneamente na Inglaterra, por Joseph Swan, e nos Estados Unidos, por Thomas Edison, quando então se verificou a grande vantagem da utilização desta forma de energia para a iluminação em relação ao gás até então utilizado, pode ser considerado como o maior impulso à utilização da energia elétrica que levou a uma utilização desta forma de energia cada vez mais ampla e intensa.

Embora já houvesse locais com iluminação pública (com a utilização do arco voltaico), o suprimento a consumidores, como hoje conhecemos, foi iniciado em janeiro de 1882, em Londres, com a Holborn Viaduct Generating Station e, em setembro do mesmo ano, em Nova York, com a Pearl Street Station.

A utilização de corrente contínua implicava na necessidade de gerar, transmitir e distribuir a energia na mesma tensão e, com isso, somente podia ser feita nas imediações da usina, com perdas cada vez maiores conforme desta se afastasse.

Em 1885/86 William Stanley desenvolveu transformadores comerciais e, em 1888, Nikola Tesla demonstrou a viabilidade de motores de CA, bifásicos, e de motores síncronos. Isso viabilizou a construção de linhas de transmissão com tensões mais altas e maiores comprimentos, possibilitando a transmissão de elevados valores de potência necessários ao suprimento dos centros de cargas.

Em 1889 é utilizada a transmissão monofásica, em corrente alternada, nos Estados Unidos, com 4 kV e 21 km e, em 1891, é construída na Alemanha uma linha de transmissão trifásica com a tensão de 12 kV e com 179 km.

A evolução das tensões de transmissão, em corrente alternada, é mostrada na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 – Evolução das tensões dos sistemas elétricos no mundo

Ano	Tensão (kV _{CA})
1882	2,4
1889	4
1891	12
1907	100
1913	150
1923	220
1926	244
1936	287
1953	345
1965	500
1969	765
1985	1150

Fonte: Glover e Sarma (1994).

No Brasil, já em 1883, a cidade de Campos tinha iluminação pública elétrica, tendo sido a primeira cidade do Brasil (e da América do Sul) a ter tal forma de iluminação (a usina geradora era térmica, a carvão); no mesmo ano era construída uma usina hidrelétrica em Diamantina, porém, para a utilização de uma mineradora. Em 1884 a cidade de Rio Claro passa a ser a segunda cidade brasileira com iluminação pública elétrica e, em 1887, Porto Alegre passa a contar com iluminação pública elétrica.

Em 1889, em Juiz de Fora, a usina Salto dos Marmelos iniciou o fornecimento de energia para uma indústria têxtil e também para iluminação pública da cidade, bem como para consumo particular. As cidades seguintes a terem iluminação elétrica no Brasil foram:

São Paulo – SP em 1889, Curitiba – PR em 1895, Belém – PA em 1896, Estância – SE, em 1900, Cachoeira do Itapemirim – ES, em 1903, sendo que o Rio de Janeiro somente veio a ter iluminação elétrica em 1904, sendo a décima segunda cidade do país a contar com tal serviço.

No Rio de Janeiro, entretanto, já em 1879 eram utilizados dínamos Gramme, acionados com máquinas a vapor, para a iluminação da Estação D. Pedro II, com lâmpadas a arco voltaico e, em 1881, o edifício do Ministério da Viação e o Campo da Aclamação eram iluminados com lâmpadas tipo Edison.

No início da utilização da energia elétrica em corrente alternada, a frequência mais comum nos Estados Unidos era a de 133 Hz. Em 1891 foi proposta, nos EUA, a frequência de 60 Hz como padrão, mas durante muitos anos foram utilizadas frequências de 25, 50 e 60 Hz, bem como corrente contínua em alguns locais. Somente em 1954 foi efetuada a unificação da frequência naquele país, o que permitiu então a interligação entre os sistemas até então isolados, facilitando o intercâmbio de energia e a otimização dos custos de geração de energia elétrica. Já na Europa prevaleceu a frequência de 50 Hz.

No Brasil, face ao sistema de concessões, houve influência tanto europeia como norte-americana, de forma que eram utilizadas predominantemente as frequências de 50 Hz e de 60 Hz, embora fossem também utilizadas as frequências de 42 Hz (Curitiba), 40 Hz (Jundiaí) e 125 Hz (Petrópolis).

Com respeito às tensões, também houve uma diversidade muito grande, a exemplo das de 2,3; 6,9; 11; 13,8; 15; 22; 34,5; 44; 69; 88; 138; 230; 345; 440 e 500 kV. Com o Decreto-Lei nº 73.080, de 5 de novembro de 1973, foram padronizadas no Brasil as seguintes tensões para a transmissão: 13,8; 34,5; 69; 138; 230; 500 e 750 kV e as tensões de 13,8 e 34,5 kV para distribuição em alta tensão.

Quanto à frequência, desde a década de 1960 vinha sendo estudado no Brasil o problema da unificação da frequência, a fim de possibilitar a interligação entre todos os sistemas regionais, visando a um aproveitamento mais racional dos recursos hídricos (integração dos sistemas) e também a uma padronização dos equipamentos.

Já a partir de 1930, era efetuada a conversão para a frequência de 60 Hz em várias pequenas empresas de eletricidade do interior de São Paulo, época em que também Curitiba passou a utilizar esta frequência.

A primeira tentativa de padronização da frequência foi feita em 1938, pela antiga Divisão de Águas, do Departamento Nacional de Produção Mineral, do Ministério da Agricultura que, por meio do Decreto nº 852, de 11 de novembro de 1938, fixou a frequência de

50 Hz (valor predominante na época). Este decreto, porém, não foi obedecido, devido às dificuldades de aquisição de equipamentos durante a Segunda Guerra mundial. Em função disso, com o crescimento das cargas, passou a prevalecer a frequência de 60 Hz.

Com a evolução e o crescimento dos sistemas e, na década de 50, com a política do governo de aproveitamento dos grandes potenciais hidrelétricos da Região Sudeste, foram construídas grandes usinas, como Furnas e Três Marias, para operar na frequência de 60 Hz, e surgiu então o problema da interligação dos sistemas para melhor aproveitamento dos recursos hídricos dos diversos sistemas isolados que, já então, representavam uma carga significativa. Nessa época, o sistema Rio, com parte de Minas Gerais e do Espírito Santo e também o Rio Grande do Sul operavam com 50 Hz, enquanto o sistema de São Paulo operava com 60 Hz, juntamente com Belo Horizonte e o sudoeste de Minas Gerais e ainda parte do Rio de Janeiro, o Paraná e Santa Catarina.

Somente em 3 de abril de 1961 é instituída uma Comissão de Uniformização da frequência, a qual recomenda a adoção de 60 Hz para todo o país, mas apenas em 1963 o Ministério das Minas e Energia cria o Comitê Coordenador de Estudos Energéticos da Região Centro-Sul com a finalidade de estudar os potenciais hidráulicos, o mercado de energia elétrica da região e a questão da unificação das frequências. Este comitê propôs, então, um plano de conversão em seis etapas semestrais, o que teve início em primeiro de janeiro de 1965.

Depois de efetuada a unificação da frequência da Região Centro-Sul (agora chamada de Região Sudeste), que era o maior mercado consumidor de energia elétrica do país restava, dos mercados significativos, na Região Sul, apenas o Rio Grande do Sul para ter a frequência convertida para 60 Hz, a fim de uniformizar a frequência dos sistemas elétricos de todo o país em 60 Hz. Iniciada em 1969, a conversão da frequência nesse Estado terminou em 1977, quando passou a ser utilizada apenas a frequência de 60 Hz no Brasil, sendo que no Sul e Sudeste passou a existir um imenso sistema interligado (desde o sul do Rio Grande do Sul até Brasília).

Na Região Nordeste os sistemas de subtransmissão das distribuidoras estaduais foram interligados em um sistema de transmissão de 230 kV saindo da Usina de Paulo Afonso a partir de 1954, unificando-se a frequência de 60Hz em toda a região.

Na Região Norte só existiam gerações locais, em geral a óleo diesel, nas maiores cidades com redes de distribuição local e sem interligações entre elas com linhas de transmissão. Em 1988 foi construída a Usina Hidrelétrica (UHE) Balbina para o suprimento a Manaus por meio de linha de transmissão de 230 kV e em 1982, com a construção da UHE

Tucuruí, a Região Norte passou a ter um sistema de transmissão de 500 kV levando energia ao Pará e se interligando ao Nordeste e Sudeste.

Foi a partir do início da década de 70 que começou a ser efetivamente implantado o sistema interligado brasileiro. De maneira geral, o processo começou pela integração dos diversos sistemas de um mesmo estado, seguida pela interligação dos sistemas de uma mesma região e culminou com a implantação das ligações entre as regiões interligando e integrando as Regiões Sul, Sudeste-Centro Oeste, Norte e Nordeste por uma rede de linhas de transmissão, sempre acompanhado da construção de usinas hidrelétricas cada vez maiores e mais distantes dos centros de carga. Atualmente (2017) o Brasil conta com um colossal sistema elétrico interligado, com mais de 138.965 km de linhas de transmissão com tensões de 230, 345, 440, 500 e 750 kV em corrente alternada e frequência de 60 Hz e linhas de 600 kV em corrente contínua como conexão das UHEs Itaipu, Jirau e Santo Antonio e de 800 kV como conexão da UHE Belo Monte, com a capacidade de transformação superior a 318.000 MVA, estendendo-se do Rio Grande do Sul ao Pará e interligando também os Estados do Amapá e Amazonas e interconectando 4.704 usinas com uma capacidade instalada total de 153.644.053 MW.

O sistema interligado nacional (SIN) mostrado na Figura 1.1 está interligado também aos sistemas elétricos argentino, uruguaio, paraguaio e venezuelano, sendo que nos dois primeiros a interligação se dá por meio de estações conversoras de frequência pois a frequência do sistema destes países é 50 Hz e, no caso do Paraguai, a interligação é por meio da geração em 50 Hz na UHE Itaipu.

Existem ainda, no mundo, outros grandes sistemas interligados como o dos Estados Unidos, da Europa, da Rússia, da Índia e da China.

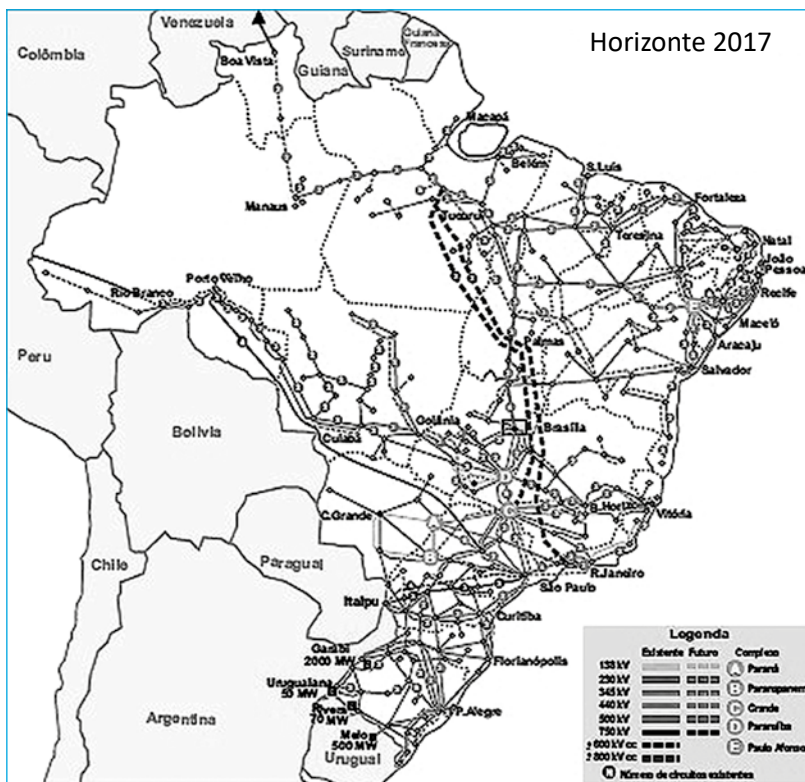


Figura 1.1 – Sistema Interligado Nacional (SIN)

Fonte: Operador Nacional do Sistema Elétrico (2017).

1.2 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA

SEP é o conjunto de todas as instalações e equipamentos destinados à geração, transmissão e distribuição de energia elétrica.

Iniciando com uma linha de transmissão ligando uma usina a uma carga industrial ou de iluminação de uma cidade, tinha-se um projeto específico de linha de transmissão – cabo, tensão e frequência em função da potência da geração e da carga e da distância entre estas, buscando-se otimizar o projeto considerando a tensão, o comprimento e as perdas da linha, de forma a ter o mínimo custo no período de vida útil da linha.

Com o crescimento das cargas e a necessidade de maiores potências de geração, tornou-se necessário desenvolver aproveitamentos de geração hidráulica ou térmica a maiores distâncias e com maior potência, o que implicava em maiores investimentos e custos, levando os potenciais usuários próximos destes aproveitamentos a unirem esforços de

forma a tirar proveito do ganho de escala com um aproveitamento maior e também terem maior confiabilidade no suprimento devido à interligação entre os pontos de consumo e as usinas. Teve-se, assim, o embrião de um sistema elétrico e, já nesta fase, houve necessidade de se unificar a frequência e padronizar as tensões para viabilizar as interconexões e diminuir os custos. O desenvolvimento de grandes projetos de geração a distância ainda maior levou à necessidade de linhas de transmissão de maiores comprimentos e mais altas tensões e causou a interligação dos pequenos sistemas formando, assim, os grandes SEP atualmente existentes, com a unificação da frequência e a padronização das tensões de transmissão, subtransmissão e distribuição e possibilitando uma maior eficiência e mais segurança no suprimento de energia com menores custos por MWh de energia suprida.

A viabilidade de grandes sistemas de potência interligados foi possível com uma série de desenvolvimentos tecnológicos de materiais e equipamentos, em conjunto com a transmissão em CA de altas e extra-altas tensões, dos quais os principais são:

- a) isolador de suspensão;
- b) relé de alta velocidade;
- c) disjuntor de alta velocidade e alta capacidade de interrupção de corrente;
- d) religamento de alta velocidade de linha de transmissão;
- e) para-raios de alta e extra-alta tensão de alta capacidade;
- f) sistema de comunicação para proteção, controle e medição;
- g) princípio de coordenação de isolamento estatístico aplicado ao projeto de equipamentos de extra-alta tensão.

A interligação de todas as áreas de consumo e usinas do país, formando um grande sistema interligado, possibilita maior confiabilidade e qualidade no atendimento às cargas e viabiliza a integração das fontes de geração deste sistema com a otimização do uso dos reservatórios das hidrelétricas, com a geração em usinas onde existem maiores reservatórios ou maior afluência nos rios, conjuntamente com termelétricas de menor custo obtendo, desta forma, o menor custo para a energia gerada.

Grandes sistemas interligados, com grande quantidade de componentes como usinas, linhas de transmissão, subestações e tantos outros equipamentos (transformadores, para-raios, transformadores de corrente, transformadores de potencial, relés, etc.) podem ter, também, grandes problemas com falhas em alguns componentes que podem levar a grandes desligamentos com impactos econômicos e sociais de graves consequências.

Um SEP bem planejado deve atender três aspectos básicos: primeiramente deve ter uma adequada operação em condição normal, de forma que não ocorram interrupções do fornecimento, curtos-circuitos ou desligamentos. Em segundo lugar está a prevenção de falhas, o que implica em haver uma boa manutenção de equipamentos e instalações e a reposição de equipamentos deteriorados e desgastados. Em terceiro vem a mitigação dos

efeitos de falhas de forma que as consequências sejam nulas ou mínimas, evitando que se alastrem por todo o sistema levando a grandes interrupções (*blackouts*) com graves consequências.

A garantia de bom funcionamento de um SEP se tem com planejamento, construção, operação e manutenção adequados de forma a se ter a melhor relação custo-benefício de atendimento às cargas, consumidores considerando um critério de atendimento predeterminado, pois, confiabilidade total (garantia absoluta de que não haverá desligamentos) não há, dentro de um custo razoável para a energia, já que para aumentar a confiabilidade do suprimento há necessidade de mais e maiores instalações e equipamentos com, conseqüentemente, maiores investimentos e custos.

1.3 SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA DO FUTURO

O papel crucial dos SEP na transmissão e distribuição da energia elétrica e na implementação das políticas energéticas dos países levou à formação dos grandes sistemas elétricos atuais, em que os elementos básicos foram grandes usinas, hidrelétricas, termelétricas e nucleares, e grandes centros de carga distantes das gerações. Nesta fase foi necessário identificar e solucionar as principais barreiras ao aumento da capacidade de transmissão a grandes distâncias e ao desenvolvimento e aplicação de novos métodos e ferramentas de análise e solução dos problemas inerentes ao planejamento, operação e manutenção destes sistemas.

Nesta primeira década do século XXI, descortina-se uma série de mudanças na geração e no consumo de energia elétrica, com novas formas de geração, como a eólica e a solar, e também em menor escala e distribuída, e com o consumo focado em maior eficiência e controle, com a evolução e implantação das redes inteligentes (*smart grids*).

Todas estas mudanças estão levando à modificação de paradigmas no desenvolvimento dos sistemas elétricos, que exigirá o planejamento para a expansão destes sistemas visando:

- a) possibilitar a evolução dos sistemas elétricos, garantindo a segurança do suprimento de energia elétrica aos consumidores;
- b) promover a eficiência e a economia de energia;
- c) permitir o desenvolvimento e a implantação de novas formas de energia renováveis e de pequeno porte;
- d) otimizar a expansão da transmissão para possibilitar a transferência de grandes blocos de energia entre regiões e entre países vizinhos, com eficiência máxima e custo mínimo.

A operação do sistema, normalmente feita por uma entidade independente e em nível nacional – como o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) no Brasil – deve estar

adequada e preparada para atender a esta evolução de tecnologias e ao crescimento constante dos sistemas de forma a:

- a) garantir a segurança da operação;
- b) garantir a eficiência da operação, com a adequada seleção das fontes de geração e a consideração e a otimização do carregamento do sistema de transmissão;
- c) garantir a confiabilidade do sistema de transmissão no atendimento às cargas;
- d) coordenar as ações de manutenção.

Para a adequada gerência destas ações de operação e manutenção, torna-se necessária a utilização de ferramentas de análise, controles e acompanhamento analíticos que possibilitem o monitoramento e simulações confiáveis do comportamento do sistema como um todo e com alto grau de precisão. São também necessários sistemas de comunicação de alta capacidade, velocidade e confiabilidade.

Como consequência da crescente integração em larga escala das fontes de energia renováveis e variáveis e da geração distribuída, como a eólica e a solar, levando as fontes convencionais, hidrelétrica e termelétrica, a operar na ponta de carga, haverá necessidade de mudanças no desenvolvimento do sistema de transmissão e na forma como os SEP serão supervisionados, protegidos e controlados.

São antevistas possibilidades para tirar proveito das diferentes formas de geração de energia e da diversidade de fontes de geração com a completa interligação dos sistemas no mundo todo. Tais projetos já estão sendo gradualmente implantados, como na América Central, na América do Norte e entre o Norte da África e a Europa.

Haverá necessidade de maior capacidade de transmissão para possibilitar a transferência de grandes blocos de energia entre grandes parques geradores de diferentes formas de geração, como grandes parques de geração eólica *off shore*, e os principais e maiores centros de carga.

Tanto no planejamento como na operação, a utilização de troncos de transmissão para a transferência de grandes blocos de energia entre subsistemas distantes constituirá um desafio aos atuais critérios de confiabilidade, como é o critério N-1 (segundo o qual o sistema deverá operar normalmente atendendo todas as cargas mesmo com a falha de um componente do sistema).

O desenvolvimento dos sistemas de potência necessários para atender às necessidades de consumo de energia elétrica e às grandes usinas e parques geradores ou geração distribuída para os anos futuros exigirá diferentes enfoques, tanto no planejamento como na operação dos sistemas, sendo necessário avaliar os métodos e ferramentas disponíveis para o planejamento da expansão da transmissão e o planejamento da operação e identificar a necessidade de novas ferramentas capazes de integrar a modelagem do mercado, a análise da rede e a análise da segurança e confiabilidade, incluindo também a

possível contribuição das tecnologias de transmissão emergentes. Os principais aspectos são mostrados a seguir.

Os métodos atuais de análise, para o planejamento e operação com o objetivo de atender o consumo dentro de um critério de confiabilidade e qualidade e com o mínimo custo e com base determinística, deverão ser substituídos por métodos probabilísticos em virtude de se ter as diversas variáveis envolvidas com características estatísticas e não determinísticas, como curva de carga, disponibilidade de geração – no caso de hidrelétricas, eólicas e solares – e falha de componentes do sistema.

A análise custo/benefício deverá avaliar os investimentos no sistema necessários para possibilitar o máximo desempenho com o mínimo custo, considerando a expansão, a operação e a manutenção do sistema, baseando-se nas necessidades do mercado de curto e de longo prazo e atendendo a segurança do suprimento. Há que considerar ainda vários outros fatores como políticas de emissões, impactos socioambientais e, ainda, fatores subjetivos como impactos visuais.

Alterações das características do mercado, como o controle da carga em função de políticas de preço ou de geração distribuída no local do consumo, necessitarão ser avaliadas por modelos de simulação que integrem modelos de sistema de transmissão com modelos de mercado dentro de uma abordagem probabilística.

O gerenciamento do risco na operação do sistema visando à segurança operativa necessitará de supervisão e controle que permitam monitorar continuamente o estado do sistema e estabelecer ações corretivas rápidas para manter o suprimento contínuo das cargas. Estes dispositivos, equipamentos e sistemas deverão ser continuamente atualizados de forma a atender aos novos desenvolvimentos dos sistemas de potência.

Há ainda que considerar a evolução das redes de distribuição dentro do conceito de redes inteligentes (*smart grid*) com possibilidade de geração nas instalações dos consumidores com maior gerenciamento pelo lado da demanda.

Assim, os mecanismos de mercado devem ser integrados às ferramentas de simulação dos sistemas, sendo também necessária a utilização de técnicas probabilísticas para avaliar e comparar as alternativas para o desenvolvimento do sistema de potência e a determinação dos investimentos a serem feitos. Estes estudos devem considerar uma ampla gama de alternativas e cenários de expansão e de operação para a determinação da condição ótima de expansão do sistema de potência com a melhor relação custo/benefício.

REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, M. M. **História da energia elétrica no Brasil**. São Paulo: Atual, 1982.
- ELETROBRAS. **A energia elétrica no Brasil: da primeira lâmpada à ELETROBRAS**. Rio de Janeiro: Biblioteca do Exército, 1977.
- ENERGIA ELÉTRICA, ano 5, n. 51, p. 14-15, jun. 1982.
- FRANCO, N. The superelectrification of Brasil. **IEEE Spectrum**, May 1982.
- GLOVER, J. D.; SARMA, M. S. **Power system analysis and design**. 2nd ed. Boston: PWS Publishing Company, 1994.
- IEEE. **The electrostatic and electromagnetic effects of transmission lines**. Boston, 1987.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). **Mapa do sistema elétrico de transmissão do Brasil**. Disponível em: <<http://www.ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-sin/mapas>>. Acesso em: 30 ago. 2017.
- RUSTERBAKKE, H. M. **Electric utility systems and practice**. New York: Wiley-Interscience, 1978.
- UHLEN, K. et al. Quais os desafios e como serão os sistemas de transmissão do futuro? **Eletricidade Moderna**, p. 10-16, mar. 2011. Disponível em: <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/305889/1/pub_2122.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2017.
- WEEDY, B. M. **Sistemas elétricos de potência**. São Paulo: Polígono, 1973.
- WISE, G. Swan's way: a study in style. **IEEE Spectrum**, v. 19, n. 4, p. 66-71, Apr. 1982. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6366860/>>. Acesso em: 17 jun. 2017.

Informações sobre a aquisição deste
livro podem ser obtidas pelo e-mail:
livraria@utfpr.edu.br

A UTFPR Editora tem por finalidade principal viabilizar a publicação de obras resultantes de atividades de ensino, pesquisa e extensão, além de documentos institucionais produzidos pela UTFPR. Visa ainda a publicação de obras originais ou traduzidas, de valor técnico, científico, artístico e literário de autores nacionais e internacionais.

Saiba mais em <http://portal.utfpr.edu.br/editora>



Av. Sete de Setembro, 3165
Rebouças - CEP 80230-901
Curitiba - PR - Brasil

Telefone Geral
+55 (41) 3310-4545