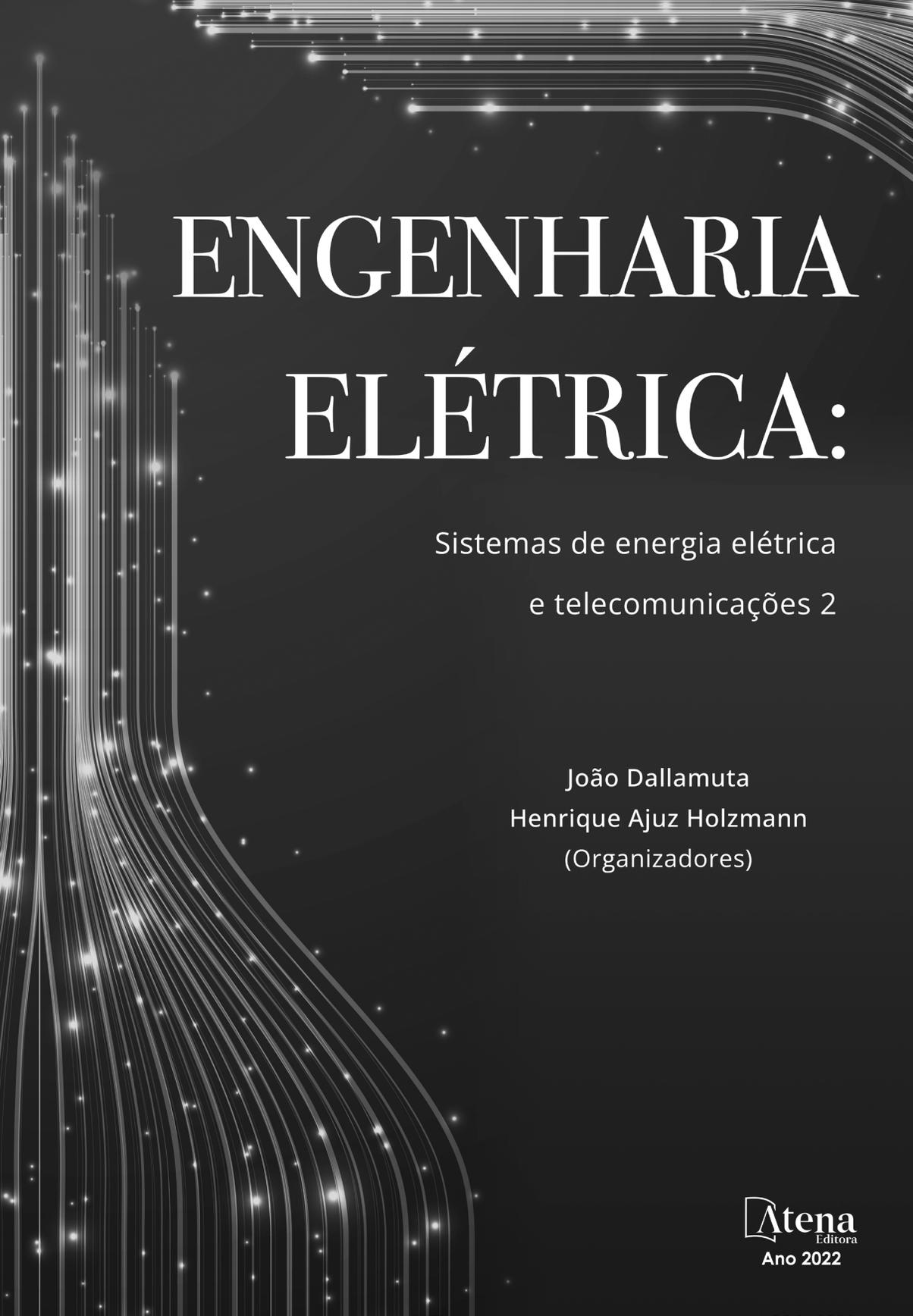


ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações 2

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)



ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações 2

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann
(Organizadores)

Editora chefe

Profª Drª Antonella Carvalho de Oliveira

Editora executiva

Natalia Oliveira

Assistente editorial

Flávia Roberta Barão

Bibliotecária

Janaina Ramos

Projeto gráfico

Bruno Oliveira

Camila Alves de Cremo

Luiza Alves Batista

Natália Sandrini de Azevedo

Imagens da capa

iStock

Edição de arte

Luiza Alves Batista

2022 by Atena Editora

Copyright © Atena Editora

Copyright do texto © 2022 Os autores

Copyright da edição © 2022 Atena

Editora

Direitos para esta edição cedidos à Atena Editora pelos autores.

Open access publication by Atena

Editora



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de Atribuição *Creative Commons*. Atribuição-Não-Comercial-NãoDerivativos 4.0 Internacional (CC BY-NC-ND 4.0).

O conteúdo dos artigos e seus dados em sua forma, correção e confiabilidade são de responsabilidade exclusiva dos autores, inclusive não representam necessariamente a posição oficial da Atena Editora. Permitido o *download* da obra e o compartilhamento desde que sejam atribuídos créditos aos autores, mas sem a possibilidade de alterá-la de nenhuma forma ou utilizá-la para fins comerciais.

Todos os manuscritos foram previamente submetidos à avaliação cega pelos pares, membros do Conselho Editorial desta Editora, tendo sido aprovados para a publicação com base em critérios de neutralidade e imparcialidade acadêmica.

A Atena Editora é comprometida em garantir a integridade editorial em todas as etapas do processo de publicação, evitando plágio, dados ou resultados fraudulentos e impedindo que interesses financeiros comprometam os padrões éticos da publicação. Situações suspeitas de má conduta científica serão investigadas sob o mais alto padrão de rigor acadêmico e ético.

Conselho Editorial**Ciências Exatas e da Terra e Engenharias**

Prof. Dr. Adélio Alcino Sampaio Castro Machado – Universidade do Porto

Profª Drª Alana Maria Cerqueira de Oliveira – Instituto Federal do Acre

Profª Drª Ana Grasielle Dionísio Corrêa – Universidade Presbiteriana Mackenzie

Profª Drª Ana Paula Florêncio Aires – Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro

Prof. Dr. Carlos Eduardo Sanches de Andrade – Universidade Federal de Goiás

Profª Drª Carmen Lúcia Voigt – Universidade Norte do Paraná

Prof. Dr. Cleiseano Emanuel da Silva Paniagua – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

Prof. Dr. Douglas Gonçalves da Silva – Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia

Prof. Dr. Eloi Rufato Junior – Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof^o Dr^a Érica de Melo Azevedo – Instituto Federal do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Fabrício Menezes Ramos – Instituto Federal do Pará

Prof^o Dra. Jéssica Verger Nardeli – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho

Prof. Dr. Juliano Bitencourt Campos – Universidade do Extremo Sul Catarinense

Prof. Dr. Juliano Carlo Rufino de Freitas – Universidade Federal de Campina Grande

Prof^o Dr^a Luciana do Nascimento Mendes – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte

Prof. Dr. Marcelo Marques – Universidade Estadual de Maringá

Prof. Dr. Marco Aurélio Kistemann Junior – Universidade Federal de Juiz de Fora

Prof. Dr. Miguel Adriano Inácio – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

Prof^o Dr^a Neiva Maria de Almeida – Universidade Federal da Paraíba

Prof^o Dr^a Natiéli Piovesan – Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Prof^o Dr^a Priscila Tessmer Scaglioni – Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Sidney Gonçalo de Lima – Universidade Federal do Piauí

Prof. Dr. Takeshy Tachizawa – Faculdade de Campo Limpo Paulista

Diagramação: Camila Alves de Cremo
Correção: Soellen de Britto
Indexação: Amanda Kelly da Costa Veiga
Revisão: Os autores
Organizadores: João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)	
E57	<p>Engenharia elétrica: sistemas de energia elétrica e telecomunicações 2 / Organizadores João Dallamuta, Henrique Ajuz Holzmann. – Ponta Grossa - PR: Atena, 2022.</p> <p>Formato: PDF Requisitos de sistema: Adobe Acrobat Reader Modo de acesso: World Wide Web Inclui bibliografia ISBN 978-65-258-0727-0 DOI: https://doi.org/10.22533/at.ed.270221111</p> <p>1. Engenharia elétrica. 2. Telecomunicações. I. Dallamuta, João (Organizador). II. Holzmann, Henrique Ajuz (Organizador). III. Título.</p> <p style="text-align: right;">CDD 621.3</p>
Elaborado por Bibliotecária Janaina Ramos – CRB-8/9166	

Atena Editora
Ponta Grossa – Paraná – Brasil
Telefone: +55 (42) 3323-5493
www.atenaeditora.com.br
contato@atenaeditora.com.br

DECLARAÇÃO DOS AUTORES

Os autores desta obra: 1. Atestam não possuir qualquer interesse comercial que constitua um conflito de interesses em relação ao artigo científico publicado; 2. Declaram que participaram ativamente da construção dos respectivos manuscritos, preferencialmente na: a) Concepção do estudo, e/ou aquisição de dados, e/ou análise e interpretação de dados; b) Elaboração do artigo ou revisão com vistas a tornar o material intelectualmente relevante; c) Aprovação final do manuscrito para submissão.; 3. Certificam que os artigos científicos publicados estão completamente isentos de dados e/ou resultados fraudulentos; 4. Confirmam a citação e a referência correta de todos os dados e de interpretações de dados de outras pesquisas; 5. Reconhecem terem informado todas as fontes de financiamento recebidas para a consecução da pesquisa; 6. Autorizam a edição da obra, que incluem os registros de ficha catalográfica, ISBN, DOI e demais indexadores, projeto visual e criação de capa, diagramação de miolo, assim como lançamento e divulgação da mesma conforme critérios da Atena Editora.

DECLARAÇÃO DA EDITORA

A Atena Editora declara, para os devidos fins de direito, que: 1. A presente publicação constitui apenas transferência temporária dos direitos autorais, direito sobre a publicação, inclusive não constitui responsabilidade solidária na criação dos manuscritos publicados, nos termos previstos na Lei sobre direitos autorais (Lei 9610/98), no art. 184 do Código Penal e no art. 927 do Código Civil; 2. Autoriza e incentiva os autores a assinarem contratos com repositórios institucionais, com fins exclusivos de divulgação da obra, desde que com o devido reconhecimento de autoria e edição e sem qualquer finalidade comercial; 3. Todos os e-book são *open access*, *desta forma* não os comercializa em seu site, sites parceiros, plataformas de *e-commerce*, ou qualquer outro meio virtual ou físico, portanto, está isenta de repasses de direitos autorais aos autores; 4. Todos os membros do conselho editorial são doutores e vinculados a instituições de ensino superior públicas, conforme recomendação da CAPES para obtenção do Qualis livro; 5. Não cede, comercializa ou autoriza a utilização dos nomes e e-mails dos autores, bem como nenhum outro dado dos mesmos, para qualquer finalidade que não o escopo da divulgação desta obra.

A engenharia elétrica tornou-se uma profissão há cerca de 130 anos, com o início da distribuição de eletricidade em caráter comercial e com a difusão acelerada do telégrafo em escala global no final do século XIX.

Na primeira metade do século XX a difusão da telefonia e da radiodifusão além do crescimento vigoroso dos sistemas elétricos de produção, transmissão e distribuição de eletricidade, deu os contornos definitivos para a carreira de engenheiro eletricitista que na segunda metade do século, com a difusão dos semicondutores e da computação gerou variações de ênfase de formação como engenheiros eletrônicos, de telecomunicações, de controle e automação ou de computação.

Não há padrões de desempenho em engenharia elétrica e da computação que sejam duradouros. Desde que Gordon E. Moore fez a sua clássica profecia tecnológica, em meados dos anos 60, a qual o número de transistores em um chip dobraria a cada 18 meses - padrão este válido até hoje – muita coisa mudou. Permanece porém a certeza de que não há tecnologia na neste campo do conhecimento que não possa ser substituída a qualquer momento por uma nova, oriunda de pesquisa científica nesta área.

Produzir conhecimento em engenharia elétrica é, portanto, atuar em fronteiras de padrões e técnicas de engenharia. Também se trata de uma área de conhecimento com uma grande amplitude de sub áreas e especializações, algo desafiador para pesquisadores e engenheiros.

Neste livro temos uma diversidade de temas nas áreas níveis de profundidade e abordagens de pesquisa, envolvendo aspectos técnicos e científicos. Aos autores e editores, agradecemos pela confiança e espírito de parceria.

Boa leitura

João Dallamuta
Henrique Ajuz Holzmann

CAPÍTULO 1	1
ESTRATÉGIA TÉCNICA À IMPLANTAÇÃO FUNCIONAL DE COMPENSAÇÃO REATIVA SÉRIE MODULAR	
Cíntia Veiga Claudio	
Fernanda Trindade	
Guilherme Ferretti Rissi	
Mateus Teixeira Duarte	
Massayuki Suzuki	
Nelson C. Jesus	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211111	
CAPÍTULO 2	14
PROJETO, SIMULAÇÃO E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE CONTROLE POR MODO DESLIZANTE APLICADO AO CONVERSOR CC-CC BUCK: ESTUDO DE CASO	
Rafael Angelini Donda	
Flávio Luiz Rossini	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211112	
CAPÍTULO 3	25
USO DE MICRORREDES FOTOVOLTAICAS. CASO DE ESTUDIO EXTENSIÓN LODANA, UNIVERSIDAD TÉCNICA DE MANABÍ	
María Rodríguez Gámez	
Antonio Vázquez Pérez	
Guillermo Antonio Loor Castillo	
Wilber Manuel Saltos Arauz	
Italo Humberto Navarrete García	
Marcos Lenin Davila Cedeño	
Lucio Alfredo Valarezo Molina	
Julio Cesar Mera Macias	
Julio Cesar Guamán Segarra	
Lenin Agustín Cuenca Álava	
Washington Colon Castillo Jurado	
José Ricardo Núñez Álvarez	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211113	
CAPÍTULO 4	47
ANÁLISE DE ALGORITMOS DE ESTIMAÇÃO PARAMÉTRICA APLICADOS AO PROJETO DE CONTROLADOR ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA	
Henrique Coldebella	
Leandro Castilho Brolin	
Flávio Luiz Rossini	
 https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211114	
CAPÍTULO 5	59
A INFLUÊNCIA DA TENSÃO ELÉTRICA NA QUALIDADE DA SOLDA A ARCO	

SUBMERSO EM CHAPAS FINAS

Júlio Cezar Pedrosa da Silva
 Gustavo de Castro Lopes
 Matheus Abrão Abdala
 Aldemi Coelho de Lima
 Ildeu Lúcio Siqueira

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211115>

CAPÍTULO 672**ANÁLISE DA QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA NO IFG - CAMPUS GOIÂNIA, A PARTIR DE *RETROFIT* DE ILUMINAÇÃO**

Berthiê de Castro Furtado
 Aylton José Alves
 André Mendes Martins
 José Luis Domingos

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211116>

CAPÍTULO 787**DESCUBRIENDO LAS CÓNICAS A PARTIR DE SU ECUACIÓN GENERAL**

Esperanza Georgina Valdés y Medina
 Miguel Ángel Chávez García
 Leilani Medina Valdés

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211117>

CAPÍTULO 8 91**APLICAÇÃO DO MÉTODO DO GRADIENTE E DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS RECURSIVO PARA ANÁLISE DE DESEMPENHO DO CONTROLE ADAPTATIVO POR MODELO DE REFERÊNCIA**

Diego Carrião Canhan
 Leandro Castilho Brolin
 Flávio Luiz Rossini

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211118>

CAPÍTULO 9101**ANÁLISE DA GESTÃO DE RESÍDUOS EM EMPRESAS DE CONSTRUÇÃO CIVIL NO MUNICÍPIO DE SÃO LUÍS-MA**

Camila Pinho Tavares Coimbra
 Jessica Moraes Dos Santos
 Janyeid Karla Castro Sousa

 <https://doi.org/10.22533/at.ed.2702211119>

SOBRE OS ORGANIZADORES 111**ÍNDICE REMISSIVO112**

ESTRATÉGIA TÉCNICA À IMPLANTAÇÃO FUNCIONAL DE COMPENSAÇÃO REATIVA SÉRIE MODULAR

Data de aceite: 01/11/2022

Cíntia Veiga Claudio

CPFL Energia
Campinas, SP, Brasil

Fernanda Trindade

UNICAMP
Campinas, SP, Brasil

Guilherme Ferretti Rissi

CPFL Energia
Campinas, SP, Brasil

Mateus Teixeira Duarte

BREE
Quatro Barras, PR, Brasil

Massayuki Suzuki

Appitec
Jundiaí, SP, Brasil

Nelson C. Jesus

GSI – Engenharia e Consultoria LTDA
Taubaté, SP, Brasil

RESUMO: O Presente trabalho apresenta a metodologia desenvolvida para implantação da utilização de banco de capacitor série de modo expedita, sem envolver estudos técnicos exaustivos. O BCS projetado tem a flexibilidade de locação entre os alimentadores, bem como pode ser reproduzida em larga escala. A pesquisa apresenta uma mudança de paradigma na utilização do BCS, no lugar de atender uma demanda específica, pesquisou-se os alimentadores que poderiam ser candidatos a instalação, e projetou-se um BCS padrão que atende a maioria, em pontos específicos. Esta metodologia é uma contribuição técnica para implantação e inovação da utilização do BCS, e está sendo desenvolvido em um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). No momento a CPFL concluiu os estudos e está na fase de aquisição dos materiais e equipamentos para 3 BCS a serem instalados em 2021.

PALAVRAS-CHAVE: Compensação Reativa Série, Planejamento, Compensação Reativa Série, Ressonância Subsíncrona, Potência de Curto Circuito, Qualidade de Energia.

Trabalho vinculado ao Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D), financiado pela CPFL: PA3052 – Aplicação Sistemática de Compensação Reativa Série em Redes de Distribuição com Controle e Proteção.

1 | INTRODUÇÃO

O principal fator que desencadeou o estudo e o uso dos Banco de Capacitores em Série (BCS) em redes de distribuição de energia elétrica foi a compensação reativa que permite manter os níveis de qualidade adequada no sistema de distribuição, em situações não convencionais.

A instalação do Banco de Capacitores em Série na rede de distribuição é uma alternativa, que em alguns casos, se mostra mais eficaz, rápida e econômica que alguns equipamentos já comumente utilizados para regular o nível de tensão, como banco de capacitores em paralelo e/ou regulares de tensão. Estes, em algumas situações, não proporcionam os níveis adequados de qualidade de fornecimento estabelecidos pelo Módulo 8 do Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST), principalmente pela rapidez na operação (Índices de Fator de Impacto) [1]. Além disso a instalação de BCS pode adiar a realização de obras no sistema elétrico, como as obras de construções de novas subestações, de ramais de transmissão e de novos alimentadores. Estas obras possuem um custo elevado e podem ser postergadas inviabilizando a expansão de cargas novas ou existentes.

Um dos fatores que determinou a necessidade de utilização do banco série foi o aumento na demanda de energia elétrica, devido ao crescimento de cargas principalmente de indústrias e agronegócios em locais longe da fonte. Os principais causadores destes problemas são motores de indução (MIT), pontes retificadoras, sistemas de irrigação, entre outros que exigem uma compensação de reativo mais eficaz e não estática e um rápido ajuste de tensão da rede, algo que não é possível de ser feito com os reguladores de tensão. A utilização de BCS permite a regulação de tensão instantânea e fornece um reativo proporcional à corrente da carga que está a jusante do equipamento, possibilitando o acionamento de motores e melhorando os níveis de tensão.

A CPFL é uma empresa pioneira na instalação de banco de capacitores série em sistemas de distribuição, possuindo um histórico de implantações, que será abordado neste trabalho. Atualmente a CPFL possui um projeto P&D, que desenvolve uma metodologia de aplicação e a elaboração de um banco série modular, de modo expedita.

O trabalho de desenvolvimento da pesquisa engloba as seguintes características principais: rápida implantação e bem como realocação; Mitigação de VTCD nos clientes devido a operação das cargas, Fator de Impacto; Compensação instantânea; Menor Investimento comparados ao nova Subestação, recondutoramento; Custo equivalente a RTs.

Portanto a proposta deste projeto de P&D é uma mudança de paradigma de aplicação do BCS utilizados até presente dias, para uma Estratégia Técnica Funcional de selecionar os alimentadores que sejam candidatos e identificar os pontos favoráveis a instalação.

2 | COMPENSAÇÃO REATIVA SÉRIE (CRS)

A compensação série na rede de distribuição é realizada através da instalação de capacitores conectados em série com o objetivo de reduzir a impedância reativa do sistema no ponto de instalação. A compensação de impedância reativa poderá ser realizada de forma parcial, total ou até mesmo com sobre compensação, devido à inserção de uma reatância negativa no circuito. Dessa forma o capacitor série fornece potência reativa proporcional à carga que está a jusante, propiciando uma redução da queda de tensão ao longo do alimentador. Porém deve ser considerado que o reativo injetado pelo BCS depende da demanda de potência reativa oriunda das cargas. Assim, a elevação da tensão dependerá do fator de compensação e da demanda do fluxo reativo proveniente da carga a jusante ao banco.

O efeito do capacitor em série sobre a queda de tensão em uma linha pode ser melhor compreendido considerando-se a equação abaixo:

$$V = I \cdot R \cdot \cos Y + I \cdot X_L \cdot \sin Y \quad (1)$$

Onde: V – queda da tensão na linha

I – corrente na linha

R – resistência indutiva da linha

X_L - reatância indutiva da linha

Y – ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente

Levando-se em consideração a reatância capacitiva do capacitor em série, X_C , a equação acima fica:

$$V = I \cdot R \cdot \cos Y + I \cdot (X_L - X_C) \cdot \sin Y \quad (2)$$

Em função do valor de X_C , o segundo termo desta última equação pode tornar-se igual a zero ou mesmo negativo, ou seja, o capacitor em série pode compensar a queda de tensão devido à resistência indutiva da linha e ainda a queda de tensão devido à resistência da mesma.

O capacitor em série é particularmente útil em redes extensas com flutuações de tensão elevadas devido às características de funcionamento de cargas como as máquinas de solda elétrica, fornos a arco, motores partindo, cargas variáveis, entre outros. Com a aplicação do capacitor em série é possível reduzir quase instantaneamente a queda de tensão transitória causada pela flutuação de tensão, da mesma forma reduz a queda de tensão causada pelo crescimento vegetativo de cargas.

Entretanto, a operação de capacitores em série, dependendo do grau de compensação, pode causar fenômenos indesejáveis, tais como ressonância subsíncrona de motores durante o período de partida e ferro ressonância de transformadores. Disposto

a evitar tal ressonância pode-se reduzir o grau de compensação do banco de capacitor ou ainda, podem ser utilizadas resistências ligadas em paralelo com o banco de capacitores.

A ferro ressonância que se refere ao aparecimento repentino de uma tensão autossustentada com altos níveis de distorção harmônica, ocorre quando é criado um circuito ressonante pelo BCS e por um transformador ligado em série durante o momento da energização. Porém este fenômeno é relativamente raro, visto que, qualquer carga no lado secundário do transformador tem tendência de amortecer a ferro ressonância.

3 | HISTÓRICO DE CRS

Inicialmente a CPFL fez a utilização de capacitores em série como forma de regulação de tensão em casos específicos. No decorrer das experiências e do conhecimento adquirido sobre a sua aplicação, a empresa buscou inovar e desenvolveu o Compensador Série Modular (CSM) através do projeto de Pesquisa e Desenvolvimento 96 (P&D-96) [2] e [3]. Atualmente, a CPFL também está elaborando um novo projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D-3052), que abordará o assunto de Bancos de Capacitores em Série novamente, porém com uma nova vertente.

A seguir serão apresentadas, resumidamente, as instalações de capacitores série em SDMT realizadas pela CPFL e um panorama sobre o novo projeto.

A. Instalação do BCS na cidade de Guaira –SP

Foi realizada uma instalação em caráter experimental na rede de 13,8 kV visando obter subsídios para situações similares e oferecer melhores condições de fornecimento de energia.

Esta rede a princípio foi escolhida tendo em vista a configuração do sistema, uma rede extensa, com condutores de baixa capacidade, carregamento significativo e uma queda de tensão elevada, mesmo com a utilização de banco de regulador de tensão. Considerando que outras cargas estavam em vias de serem conectadas em Guaira, foi necessário o estudo de melhorias na região, no qual foi definida a utilização de banco de capacitores em série por apresentar de imediato o benefício esperado.

O banco de capacitores em série, como demonstra Fig. 1, foi instalado a aproximadamente 7 km da localidade de Guaira e energizado no ano de 1967. Foram utilizadas 14 unidades de capacitores por fase, de 50 kVAr, 6,7 kV e 60 Hz cada, apresentando assim 64 Ohms por fase e grau de compensação $K= 3,44$. O valor do fator K foi assumido conforme os estudos publicados pela Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget (ASEA) – Suécia e a estrutura para o banco foi feita de maneira semelhante a utilizada para um banco de capacitor em série na linha de 12 kV da Cia Pacific Gas and Electric Co. S.Francisco, Cal, USA.

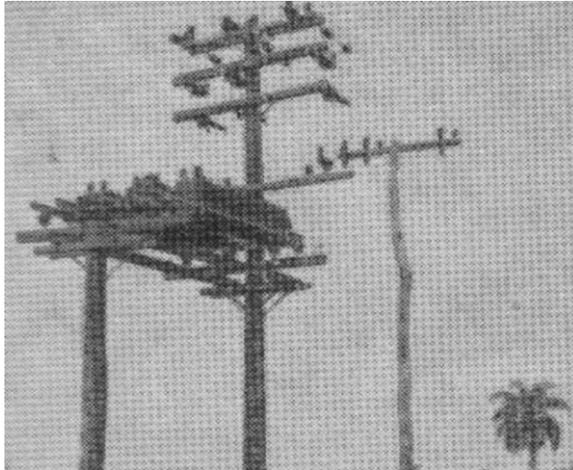


Fig. 1 – Banco de Capacitor em Série de Guaira.

A CPFL apresentou um artigo no IV SENDI sob o tema “Considerações sobre aplicações de Banco de Capacitores em série” em JAN/1969 [4].

Este BCS operou satisfatoriamente durante aproximadamente 3 anos, quando foi construída uma subestação no local, não sendo mais necessária sua utilização.

B. Instalação do BCS na cidade de Sabino –SP

Em meados dos anos 80 havia um desafio de adequar os níveis de tensão na localidade de Sabino, que era suprida pelo alimentador da Subestação (SE) Lins, a uma distância de 35 km em condutor 6 AWG.

Dentre as soluções avaliadas estudou-se a instalação do BCS, de forma experimental com uma compensação de 200% da reatância indutiva da linha, com 7 unidades capacitivas em paralelo por fase. O BCS de Sabino operou por 28 anos, proporcionando uma solução para a região com um benefício técnico e econômico mais elevado, em comparação a instalação de Bancos Reguladores de Tensão. O BCS foi desativado após a energização da SE Sabino 34,5 kV, energizada em 2017.

C. Instalação do BCS na cidade de Colômbia –SP

No ano de 2006, em atendimento a uma fazenda de plantação de laranjas que possuía sistema de irrigação no município de Colômbia-SP, onde havia a necessidade de acionamento de 61 motores de indução (MIT), com potências entre 150 CV e 250 CV. A instalação do cliente ficava a 24 km da SE Colômbia 1, atendido com alimentador com 477 MCM CA, com dois bancos reguladores de tensão fechados em delta (15% de regulação) e quatro bancos de capacitores em derivação.

A fazenda em questão conseguia colocar em operação apenas 40 motores de indução, dos 61 que possuía, pois o acionamento de qualquer outro MIT provocava o

desligamento dos outros motores.

As soluções comumente utilizadas para resolver problemas de tensão, como os reguladores de tensão, não seriam suficientes pois estes equipamentos possuem um tempo de atuação superior ao tempo de partida dos MIT. Este tipo de carga exige das Distribuidoras investimentos elevados em construção de nova subestação. CPFL avistou a oportunidade de uma nova aplicação de BCS, uma vez que o projeto P&D- 96 [5] estava em curso. Neste projeto a CPFL buscou o desenvolvimento de um novo modelo de capacitor série, o Compensador Série Modular (CSM), que permitia a aplicação em qualquer ponto da distribuição e que pudesse ser reutilizado em outros atendimentos através de um rearranjo simples e seguro das células. A Fig. 2 apresenta um diagrama esquemático do CSM.

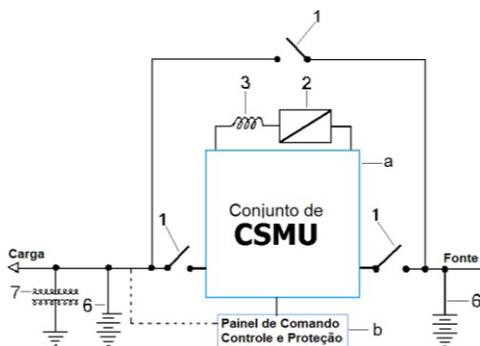


Fig. 2 – Compensador Série Modular – CSM

O CSM foi constituído pelos seguintes equipamentos:

- RACK para 16 capacitores por fase;
- Conjunto de 15 Capacitores por fase com fusível externo. Esta parcela de equipamentos pode variar de um para outro ponto do sistema, cuja configuração define a reatância capacitiva do CSM (a);
- Painel de Comando, Controle e Proteção (b);
- Transformador trifásico para alimentação do painel de controle e da bobina de abertura da chave a vácuo (7);
- Chave de by-pass (1);
- Chave a vácuo: 03 chaves monofásicas (2);
- Reator com núcleo de ar (3);
- Para-raios (6).

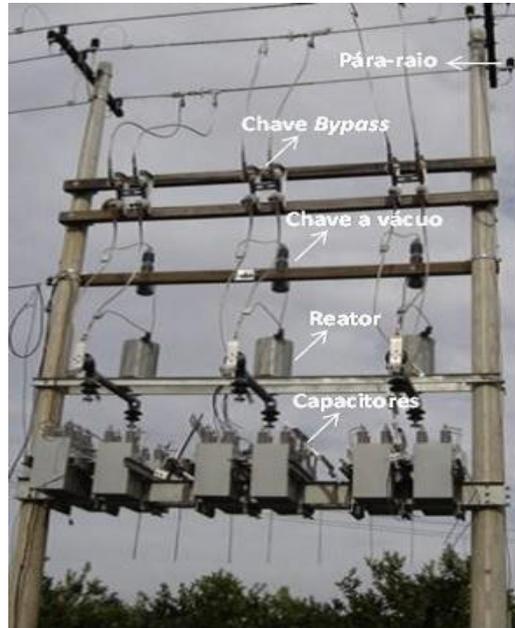


Fig. 3. – CSM-01 Instalado em Campo.

Com o objetivo de eliminar o problema de acionamento dos motores, foi definido que o CSM-01 seria então instalado no alimentador que atendia a fazenda. Assim, seria possível atender as cargas da fazenda dentro do menor tempo possível, até a conclusão da nova subestação Colômbia 2 – Rio Grande. Deste modo foi escolhido um ponto a 20,2 km da SE Colômbia 1, onde o valor da reatância indutiva era de 8,8 Ohms e o valor da reatância capacitiva do CSM era 14,4 Ohms, ou seja, com uma sobre compensação de 164%.

Após diversos testes in loco foram constatados fenômenos de ressonância subsíncrona quando do acionamento do 21º motor, indicando a necessidade de realização de novas simulações e estudos. À vista disso, com a redução da reatância capacitiva do CSM para 10,3 Ohms, através da inserção de mais células capacitivas, uma sobre compensação de 117%, foram acionados os 61 motores com sucesso e satisfação do cliente.

Este banco ficou em operação até o final de 2008, quando foi energizada a SE Colômbia 2.

D. Instalação do BCS na cidade de Ibiúna –SP

Através de simulações foi verificado que o alimentador que atendia parte da área rural do município de Ibiúna, em 23,1 KV, apresentava pontos com tensão de 20,64 kV. Com isso a tensão de fornecimento representava 93% de 22 kV, que é a tensão de operação, conforme apresentado na Fig. 4. Como este é o limite inferior da faixa considerada como

tensão adequada, conforme Módulo 8 do PRODIST, o alimentador estava em seu limite. Visando ampliar a capacidade de atendimento a novas cargas, foi definido que o CSM-02, o segundo protótipo do P&D-96, seria instalado neste alimentador, o qual atendia também uma grande empresa, localizada a 11 km da SE Ibiúna.

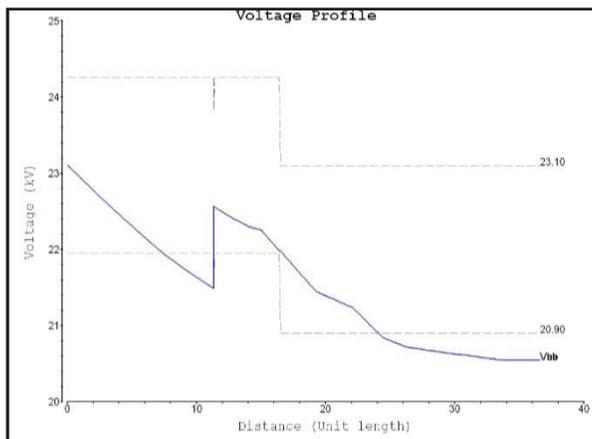


Fig. 4. – Perfil da Tensão no Alimentador – Carga Pesada.

O CSM-02, Fig. 5 foi projetado utilizando varistores de óxido de zinco como dispositivo de proteção contra sobretensão, o que permitiu a utilização de capacitores menores do que o do CSM-01.

Após simulações considerando as características do alimentador, foi definido que o local para instalação do equipamento ficaria a 29,5 km da subestação, onde a reatância indutiva era 17,1 Ohms, e a reatância capacitiva do CSM deveria ser de 20,52 Ohms (sobrecaptação de 120%).

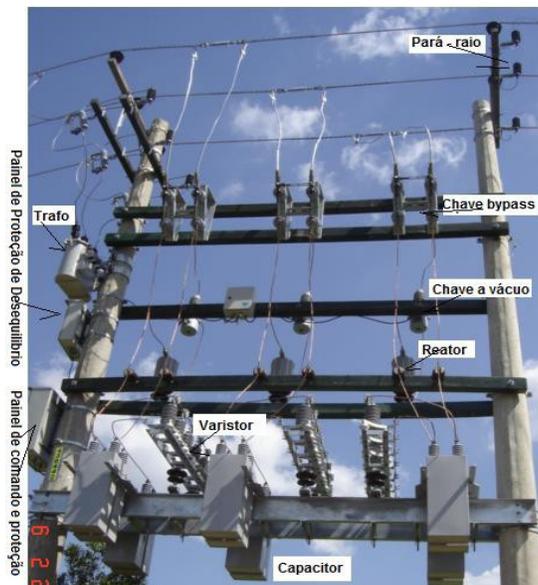


Fig. 5 – Banco Capacitor em Série de Ibiúna – CSM-02.

A Fig. 6 mostra o resultado do monitoramento da tensão na saída do CSM-02 em dois momentos, um com o banco desligado e outro com o banco ligado. O gráfico permite constatar o ganho de tensão alcançado com a aplicação do CSM-02.

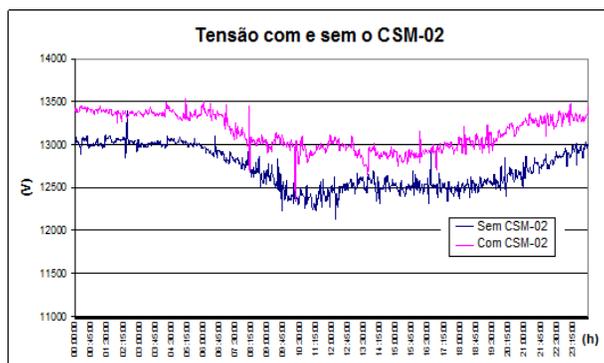


Fig. 6 –Gráfico de Tensão (com e sem o CSM-02)

A partir de 2012 houve a redução de carga do alimentador atual com a transferência de uma grande empresa para o alimentador ao lado, com isto, a tensão de fornecimento retornou aos seus limites normais, não sendo mais necessário a utilização do CSM-2.

E. Instalação do BCS na cidade de Santa Maria da Serra –SP

A cidade de Santa Maria da Serra é atendida pelo alimentador que se origina da

subestação da cidade de Brotas, em tensão 13,2 kV, com 40km de extensão. Até o ano de 2011, a cidade possuía uma demanda de 2,1 MVA e a configuração da rede até ela era constituída de 22 km em condutor de seção 336,4 MCM CA e 18 km em 4/0 AWG CAA, 2 bancos reguladores de tensão fechados em delta e 4 bancos de capacitores paralelos.

Em 2011 um cliente industrial da cidade solicitou aumento de demanda de 450 kW. O valor não é expressivo se considerado um sistema mais robusto ou se a carga estiver próximo da fonte, no entanto, devido à grande distância que se encontrava da subestação e do baixo valor de corrente de curto-circuito trifásico no local, em torno de 360 A, as simulações indicaram flutuações acima de 10% quando do acionamento do motor de 150 CV do cliente [6].

A CPFL concebeu a oportunidade para aplicação de um BCS, e desta vez, a ideia era a reutilização do CSM-01 originalmente instalado em Colômbia, que estava fora de serviço desde a conclusão da obra de construção da SE Colômbia 2- Rio Grande.

No ano de 2012 a mesma indústria solicitou novo aumento de carga, de 565 kW, o qual foi permitido após readequação da reatância capacitiva do CSM-01 de 14,4 para 16 Ohms (aumento da compensação para 97%) e recondutoramento de aproximadamente 5 km de rede.

Neste caso o CSM-01 viabilizou o aumento de carga solicitado dentro do prazo requerido e a partida do motor de 150 CV apresentou uma flutuação de tensão abaixo de 5%. Deste modo, foi evitada a necessidade de construção de alimentador expresso de aproximadamente 40 km até o município de Santa Maria da Serra, possibilitando viabilizar o atendimento ao cliente com o menor custo global.

Até o presente momento o CSM-01 continua em operação, possibilitando a indústria permanecer em operação.

Na Fig. 7 apresenta a simulação realizada através da utilização do software Cyme, com as configurações e medições da rede atual, demonstrando que o BCS é primordial para o atendimento da localidade até os dias de hoje.

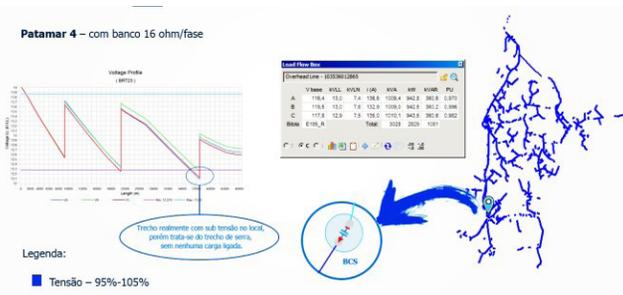


Fig. 7 – Simulação Bancos de Capacitor em Série na Cidade de Santa Maria da Serra nos dias atuais.

4 I ESTRATÉGIA TÉCNICA FUNCIONAL PARA IMPLANTAÇÃO DO CRS.

Através das instalações do BCS, citadas anteriormente, realizadas no Estado de São Paulo, a CPFL teve um resultado bastante positivo, pois, todos os casos de capacitores em série instalados no SDMT tiveram êxito, principalmente o modelo do CSM, que se mostrou como um equipamento de fácil adaptação ao sistema e realocável. Além disso o custo é relativamente baixo, se comparado com os custos de outros equipamentos já utilizados na rede, com a vantagem de regular a tensão instantaneamente, elevar o nível de curto-circuito, fornece potência reativa proporcional à demanda das cargas a jusante e melhorar a estabilidade de tensão.

Porém apesar do resultado positivo, foi verificado alguns pontos de atenção sobre o local de instalação de um capacitor série e a característica da carga a ser atendida. As experiências mostraram que quando essas cargas não são predominantemente indutivas variáveis, como no acionamento de motores, poderá ser utilizada uma compensação maior no BCS, a exemplo do instalado em Sabino, onde se aplicou uma sobre compensação de 150%. Em Colômbia foi necessária a redução da compensação de 164% para 117%, devido à predominância de motores. Assim sendo, em casos de regiões que possuam áreas com grande concentração de MIT's, poderá ocorrer o fenômeno de ressonância subsíncrona, havendo assim a necessidade de análises de transitórios.

PROJETO P&D - PA3052 - APLICAÇÃO SISTEMÁTICA PARA COMPENSAÇÃO REATIVA SÉRIE EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO

O projeto de P&D-3052 irá elaborar uma metodologia de aplicação sistemática de BCS nas redes de distribuição pertencentes as distribuidoras do Grupo CPFL Energia, fundamentada em simulações assertivas e resultados obtidos através de medições realizadas em campo. Este irá prospectar e testar as inovações tecnológicas associadas às práticas de controle e proteção vinculadas a Banco Capacitores em Série, e implantação da melhor destas, no padrão técnico de sua montagem [7].

Este projeto, diferentemente dos projetos anteriores, pretende desenvolver um padrão técnico de montagem com dimensionamento do conjunto Compensador Reativo Série (CRS) Modular Padrão, com sistema de controle e proteção testados, definido pela metodologia e aprovado pela CPFL. De forma global os principais parâmetros a serem considerados na definição dos alimentadores para estabelecimento de uma metodologia expedida de aplicação para os sistemas com compensação série estão relacionados a seguir:

- Alimentador Rural com longa extensão; e baixa potência de curto-circuito;
- Pelo menos dois (2) reguladores de tensão em cascata;
- Cargas urbanas/distritos a mais de 20 km da SE;

- Motores de indução na ponta dos alimentadores e que tenha dificuldade de liberação devido à partida destes;
- Existência de cargas potencialmente perturbadoras na ponta dos alimentadores;
- Localidades pequenas e demandas reduzidas, com restrição de construir Subestação, e problema de estabilidade de tensão.

O P&D-3052 definirá alternativas técnicas para mitigar as perturbações pertencentes ao sistema de distribuição, quando provocadas por variações de carga não lineares e/ou geração distribuída e os distúrbios no sistema elétrico prévia e posterior a instalação da BCS.

Nesta Estratégia Técnica para implantação de Banco de Capacitor Série, após exaustivos estudos e simulações, chegou-se à conclusão de limitar a máxima capacidade em 1200 ampères pela razão de atender a maior parte dos alimentadores, bem como apresenta um custo atrativo eliminando a utilização de varistores de amortecimento, que é um dos componentes de maior custo e dificuldade de aquisição por necessitarem das compras no exterior.

Para estes estudos iniciais foram selecionados 14 alimentadores de 15 KV, para a modelagem no programa ATPDraw, e paralelamente as pesquisas para definir a corrente de curto circuito máximo que o BCS deveria suportar, considerando a quantidade máxima de vasos e a simplicidade de não utilizar varistores. Concluiu-se, através das simulações, que o valor máximo de 1200 A de I_{cc} é adequada. Portanto, as simulações foram direcionadas aos alimentadores e na escolha dos pontos estratégicos que após a instalação de BCS não ultrapassassem o I_{cc} adotado. E após as simulações exaustivas, com alternativas técnicas de não ultrapassar os limites de qualidade do fornecimento, foram escolhidos 5 alimentadores, dos quais 2 selecionados para instalação de BCS. Para concluir foram contemplados com uma carga fictícia de um motor de grande porte (Motor de Indução Trifásico (MIT) - 250 CV), no final da extensão do alimentador, verificando o desempenho e eficácia do BCS, sem ultrapassar os limites de qualidade do alimentador e verificando ganhos consideráveis.

Portanto tem-se um CRS Modular padrão, que poderá ser instalado em qualquer um dos alimentadores pesquisados, de custo menor e com os critérios de contorno para aplicações futuras.

Atualmente a CPFL concluiu os estudos necessários e está na Etapa de aquisição de equipamentos e materiais para montagem de 3 BCS.

5 | CONCLUSÃO

Através do histórico apresentado, comprovou-se a eficácia da aplicação do Banco de Capacitores em Série no Sistema de Distribuição em Média Tensão (SDMT), melhorando

a estabilidade da tensão destes sistemas, proporcionando fornecimento de potência reativa e elevação do nível de curto circuito, conforme verificado nos casos retratados.

Tendo como base as diversas vantagens técnicas e econômicas do banco de capacitor série, a CPFL entende que o mesmo pode ser utilizado como recurso confiável, rentável e de rápida implementação em soluções da empresa, como o atendimento a grandes cargas distantes das fontes, acionamento de motores, regulação de tensão, dentre outros que requerem um estudo específico mais apurado. Um destaque é a fácil adaptação do BCS ao sistema, através de uma mudança na combinação das células capacitivas.

O novo projeto P&D pretende estabelecer o BCS como um modelo padrão para soluções de problemas em SDMT, tal como sua metodologia de aplicação para estudos na rede.

REFERÊNCIAS

[1] ANEEL. PRODIST Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica. [S. l.], 2018. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-8>;

[2] M, Suzuki, D. J. Ferreira, W. M. Borges, J. Camargo, G. P. Caixeta "Relatório técnico CPFL – Novo Sistema de Compensação Reativa Série Modular– PD96", outubro, 2007;

[3] F. P. Marafão, J. Camargo, E.R. Zanetti Jr, R.A. Souza R.A. "Capacitor Série como Alternativa de Investimentos para a Expansão da Distribuição" - XVI SENDI - Brasília – 2004;

[4] N. Oranges, R.R. Stefano., V.A. Hionin, "Considerações sobre a Aplicação de Capacitores em Série".- IV SENDI, 1969;

[5] M, Suzuki, D. J. Ferreira, W. M. Borges, J. Camargo, G. P. Caixeta. "Compensador Série Modularizado para Sistemas de Distribuição até 23 KV"- XIX SENDI - São Paulo - novembro, 2010;

[6] A.L. Lemes, M. Suzuki., D.J. Ferreira. "Análise das Aplicações de Capacitores em Série nos Sistemas de Média Tensão realizadas pela CPFL" – XXI SENDI - Santos–novembro, 2014;

[7] ANEEL. PRODIST Módulo 2 – Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição. [S. l.], 2016. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/modulo-2>. Acesso em: 5 jan. 2020;

[8] Cogo, J. Roberto e Filho, J. Batista Siqueira. Capacitores de Potência e Filtros de Harmônicos: Editora Cm - Ciência Moderna, 2018. 338 p;

[9] Asea Brown Boveri Ltda. (ABB): Capacitores de Potência em Baixa Tensão, Departamento de Sistemas de Potência, Catálogo start-BR 101, 1991;

[10] The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE): IEEE Standard for Shunt Power Capacitors, IEEE Std 18-2012 (Revision of IEEE Std 18-2002);

[11] Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT): Capacitores de Potência – Especificação, NBR – 5282, Julho de 1977;

[12] Cogo, J. Roberto: Correção de Fator de Potência, Apostila do Curso da Qualidade da Tensão em Sistemas Elétricos, pós-graduação da EFEI, Itajubá, 1995.

A

Arco submerso 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 71

C

Chapas finas 59, 61

Comparação 5, 23, 47, 91, 98

Comparação de desempenho 91

Compensação reativa série 1, 3, 11, 13

Construção civil 101, 102, 103, 104, 105, 109, 110

Controle Adaptativo por Modelo de Referência (CAMR) 49, 91, 93, 100

Controle por modo deslizante 14, 16, 23

Conversor CC-CC buck 14, 16, 17

Curto circuito 1, 12, 13

D

Demanda energética 26

Desarrollo local 26

Destinação 101, 102, 103, 107, 108

Distorções harmônicas 72, 73, 75, 76, 81, 82

E

Energía fotovoltaica 26, 29, 41, 42, 45

G

Generación distribuida 26, 30, 39, 40, 42, 43, 45, 46

GeoGebra 87, 88, 89, 90

Geração 12, 73, 77, 101, 102, 103, 104, 106, 107, 109

Gerenciamento 75, 101, 102, 103, 104, 106, 107, 108, 109, 110

I

Impactos ambientais 101, 102

Interpretación 87, 89

M

Método do Gradiente (MG) 47, 49, 50, 91, 96

Método dos Mínimos Quadrados Recursivo (MMQR) 47, 49, 51, 91, 97

MG 47, 48, 49, 50, 51, 53, 54, 55, 56, 57, 91, 92, 96, 97, 98, 99

MMQR 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 56, 57, 91, 92, 97, 98, 99

P

Partícula magnética 59, 62, 63, 68, 69, 70

Planejamento 1, 13, 107, 108, 109

Potência de 1, 11, 79

Q

Qualidade da solda 59, 60, 61, 62

Qualidade de energia 1, 72, 73, 75, 77, 84

R

Resíduos 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110

Ressonância subsíncrona 1, 3, 7, 11

Resultados simulados 47, 48

Retrofit de iluminação 72, 73, 80

S

Secciones cónicas 87, 88, 89

Sistema não linear 14

Sostenibilidad 26, 27, 28, 45

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações 2

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 

ENGENHARIA ELÉTRICA:

Sistemas de energia elétrica
e telecomunicações 2

www.atenaeditora.com.br 

contato@atenaeditora.com.br 

[@atenaeditora](https://www.instagram.com/atenaeditora) 

www.facebook.com/atenaeditora.com.br 