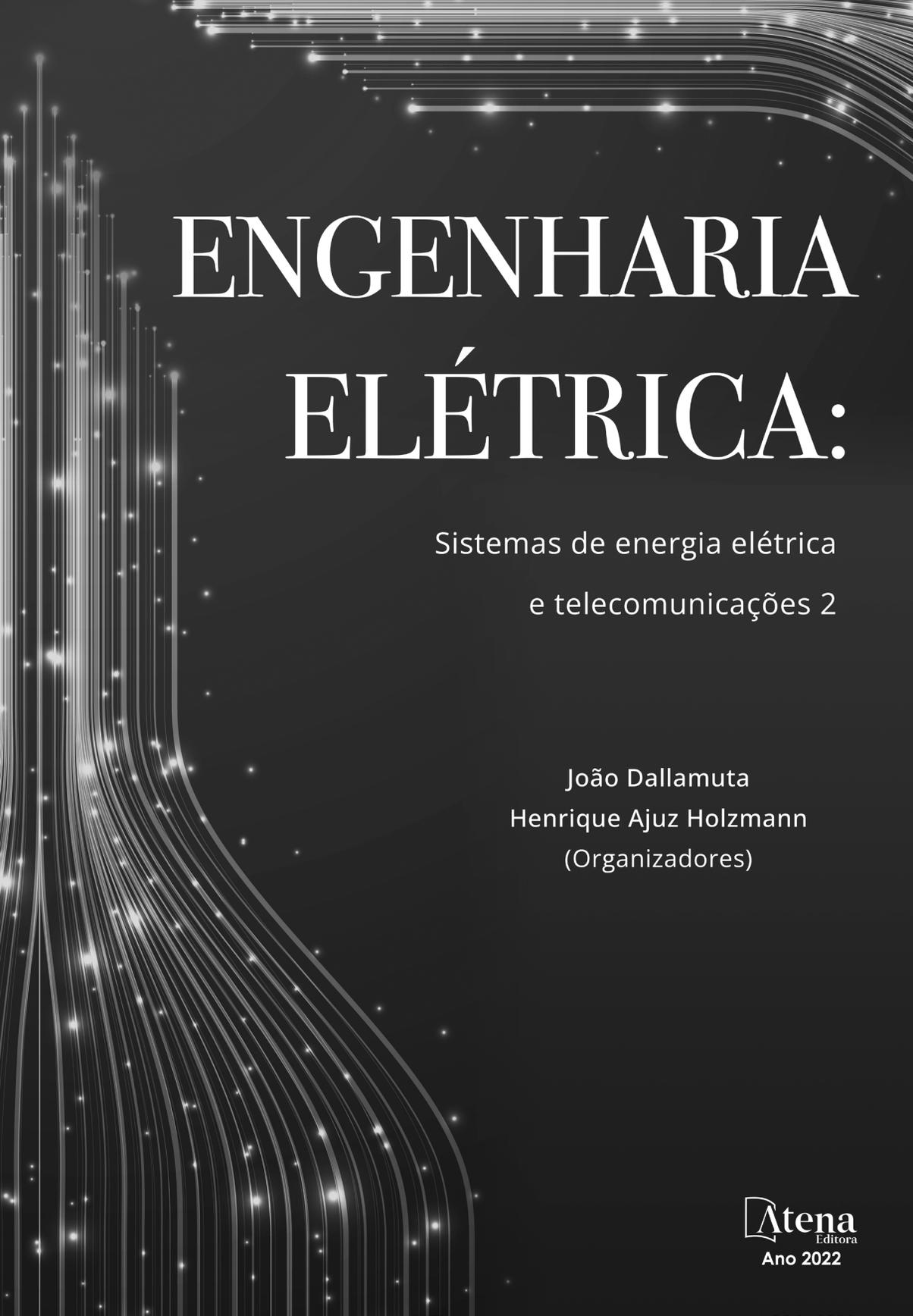


ENGENHARIA ELÉTRICA:

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**

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

Data de aceite: 01/11/2022

Berthiê de Castro Furtado

Instituto Federal de Educação Ciência e
Tecnologia de Goiás
Goiânia, Brasil

Aylton José Alves

Instituto Federal de Educação Ciência e
Tecnologia de Goiás
Goiânia, Brasil

André Mendes Martins

Centro Universitário Araguaia Goiânia,
Brasil

José Luis Domingos

Instituto Federal de Educação Ciência e
Tecnologia de Goiás
Goiânia, Brasil

RESUMO: Este trabalho apresenta a análise da qualidade de energia elétrica antes e após a eficiência de um sistema de iluminação. Neste estudo de caso é utilizado o método para análise dos parâmetros de qualidade de energia em consonância com os Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica (PRODIST) e a Norma IEC 61.000-4-30. Para realizar as medições utilizou-se um analisador de energia, instalado no

primário dos transformadores, na coleta de dados antes da eficiência do sistema de iluminação. Após o *retrofit* da iluminação o instrumento foi instalado no secundário dos transformadores. Nas medições realizadas antes da implantação do projeto de eficiência energética, os parâmetros de Qualidade de Energia Elétrica (QEE) mostraram-se dentro dos limites estabelecidos. Nas medições realizadas após a eficiência do sistema de iluminação, observa-se que o comportamento do nível da tensão em regime permanente apresenta algumas oscilações, porém os valores mantiveram dentro da faixa de tensão adequada. Com relação ao fator de potência, identifica-se que os resultados estão dentro dos limites estabelecidos. Todavia, nota-se que algumas amostras apresentam valores abaixo do estabelecidos, porém não comprometendo. Quanto à frequência, identifica-se pouca variação durante o período da medição, porém com valores sempre na faixa permitida para as condições normais de operação. As amostras das distorções harmônicas total e individuais de tensão apresentam valores dentro dos limites estabelecidos e quanto

ao desequilíbrio de tensão, as medições apresentam abaixo do limite máximo permitido, que é igual a 3%. Portanto constata-se que os resultados atendem aos critérios estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST e a Norma IEC 61.000-4-30, e serve de referência para outros estudos que avaliam os efeitos da inserção de cargas não lineares nas instalações elétricas, em consumidores com características similares ao IFG.

PALAVRAS-CHAVE: Qualidade de energia. Retrofit de iluminação. Distorções harmônicas.

1 | INTRODUÇÃO

A energia elétrica é um produto primordial para o desenvolvimento socioeconômico de um país e sua demanda é crescente e acelerada em todo o mundo. Esse crescimento é provocado principalmente pelo aumento populacional e pela dependência de tecnologias que necessitam de energia elétrica. Essa dependência gera uma necessidade cada vez maior por energia disponível, sobretudo a partir de fontes renováveis.

A necessidade de diminuir a dependência de combustíveis fósseis e a preferência por fontes de energia que não poluem têm levado à busca de novas fontes de energia para a geração de eletricidade [1].

Por outro lado, os sistemas de energias renováveis, como sistema fotovoltaico (SFV) e geração eólica, além de sistemas de iluminação através de lâmpadas fluorescentes compactas (CFL) e de lâmpadas com tecnologia de diodos emissores de luz (LED), dentre outras cargas, utilizam muitos dispositivos eletrônicos, que caracterizam por injetarem uma quantidade elevada de harmônicos na rede elétrica. Estes aspectos têm sido uma grande preocupação para consumidores e as concessionárias de energia elétrica, com relação à qualidade de energia [2] e [3].

Nesse contexto, é notória a preocupação com os aspectos da qualidade de energia elétrica, pois é um assunto importante no cenário energético nacional e internacional. Desse modo, motivado em identificar e mitigar os problemas causados pela má qualidade de energia, vários estudos mostram que os principais fenômenos que afetam a qualidade no sistema elétrico são: distorções harmônicas, desequilíbrio de cargas, baixo fator de potência, variação de frequência, dentre outros [4], [5] e [6].

Diante do exposto, esse estudo propõe realizar análise de qualidade de energia elétrica no IFG – Campus Goiânia, antes e após a eficiência do sistema de iluminação, o qual contempla a primeira fase do projeto de eficiência energética. Tais análises visam verificar se os resultados atendem aos critérios estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST e a Norma IEC 61.000-4-30.

2 | PARÂMETROS ELÉTRICOS PARA ANÁLISE

Para a análise da qualidade de energia serão observados os parâmetros elétricos descritos a seguir.

A. Tensão em regime permanente

Cargas operando em uma tensão fora de limites aceitáveis, poderão afetar o seu funcionamento, reduzir a vida útil, dentre outros aspectos. Por esses motivos, a tensão deve ser mantida dentro dos limites aceitáveis e desta forma não comprometer o funcionamento correto dessas cargas [7].

Os valores de tensão obtidos por medições devem ser comparados a tensão de referência, a qual deve ser a tensão nominal ou a contratada, de acordo com o nível de tensão do ponto de conexão [8].

Para análise da tensão de atendimento em relação a faixa de tensão adequada, precária e crítica, utiliza-se a Tabela 1, onde estabelece os pontos de conexão em tensão nominal superior a 1 kV e inferior a 69 kV e a Tabela 2 para pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220 V).

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura (TL) em Relação à Tensão de Referência (TR)
Adequada	$0,93TR \leq TL \leq 1,05TR$
Adequada	$0,90TR \leq TL < 0,93TR$
Crítica	$TL < 0,90TR$ ou $TL > 1,05TR$

Tabela 1 – Pontos de conexão em tensão nom. sup. a 1 kV e infer. a 69 kV

Tensão de Atendimento (TA)	Faixa de Variação da Tensão de Leitura TL (Volts)
Adequada	$(350 \leq TL \leq 399) / (202 \leq TL \leq 231)$
Precária	$(331 \leq TL < 350$ ou $399 < TL \leq 403)$ $(191 \leq TL < 202$ ou $231 < TL \leq 233)$
Crítica	$(TL < 331$ ou $TL > 403) / (TL < 191$ ou $TL > 233)$

Tabela 2 – Pontos de conexão em tensão nominal igual ou inferior a 1 kV (380/220 V)

B. Fator de Potência

O fator de potência pode ser definido como um indicador determinado pela relação entre a potência ativa e a potência aparente, consumidas por um equipamento, máquina, dentre outras cargas, desde que as formas de ondas de tensão e corrente sejam periódicas. Para a maioria dos sistemas elétricos, onde há presença de harmônicos, o fator de potência é expresso através da Equação (1), conforme segue [9] e [10]:

$$FP = \frac{\cos\phi_1}{\sqrt{1 + TDH_1^2}} \quad (1)$$

onde

FP é o fator de potência;

$\cos\phi_1$ é a relação entre potência ativa e a potência aparente da harmônica fundamental;

TDH_i é a taxa de distorção harmônica de corrente.

O valor do fator de potência no ponto de conexão deve estar compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo, para conexão entre distribuidora ou unidade consumidora que apresente tensão inferior a 230 kV [8].

C. Distorção harmônica de tensão

As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental e a qualidade de energia pode ser afetada quando o sistema elétrico apresenta as referidas deformações [8].

O gerenciamento de harmônicos em um sistema de energia é considerado uma responsabilidade conjunta envolvendo tanto os usuários finais quanto os proprietários ou operadores do sistema e os limites harmônicos são recomendados para ambas as tensões e correntes [11].

Na análise da distorção harmônica de tensão são utilizados para quantificar a qualidade dos sinais: a distorção harmônica individual (DITh) e a distorção total de tensão (DTT). A distorção harmônica individual de tensão é obtida através da Equação (2) e utilizando a Equação (3) obtêm-se a distorção harmônica total de tensão [8], [11] e [12]:

$$DIT_h\% = \frac{V_h}{V_1} \cdot 100 \quad (2)$$

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{\text{máx}}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (3)$$

onde

h é a ordem harmônica individual;

h_{max} é a ordem harmônica máxima;

V_h é a tensão harmônica de ordem h ;

V_1 é a tensão fundamental medida

Os limites das distorções harmônicas de tensão, são apresentados na Tabela 3, onde é especificado o percentil de conformidade de 95%, isto é, admite-se que os limites sejam ultrapassados em 5% das 1008 amostras coletadas ou 95% das amostras estão em conformidade.

Indicador	Tensão nominal (kV)		
	$V_N \leq 1$	$1 < V_N < 69$	$69 \leq V_N < 230$
Distorção harmônica total de tensão (DTT _{95%})	10,0%	8,0%	5,0%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes pares não múltiplas de 3 (DTT _{p95%})	2,5%	2,0%	1,0%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3 (DTT _{i95%})	7,5%	6,0%	4,0%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3 (DTT _{395%})	6,5%	5,0%	3,0%

Tabela 3 – Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

D. Desequilíbrio de tensão

O desequilíbrio de tensão em um sistema elétrico trifásico define-se como uma condição na qual as três fases apresentam diferentes valores de tensão em módulo ou defasagem angular entre fases diferente de 120° elétricos ou, ainda, as duas condições [8].

O desequilíbrio de tensão é obtido através das Equações (4) e (5):

$$FD\% = 100 \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (4)$$

sendo

$$\beta = \frac{V_{ab}^4 + V_{bc}^4 + V_{ca}^4}{(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)^2} \quad (5)$$

onde

FD é o fator de desequilíbrio de tensão;

V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} são as magnitudes das tensões eficazes de linha – frequência fundamental.

A Tabela 4 apresenta os limites para os desequilíbrios de tensão.

Indicador	Tensão nominal	
	$V_n \leq 1,0$ kV	1 kV $< V_n < 230$ kV
FD _{95%}	3,0 %	2,0 %

Tabela 4 – Limites para os desequilíbrios de tensão

E. Variação de Frequência

A variação de frequência é justificada pelos frequentes desequilíbrios temporários que ocorre entre a geração e a demanda, implicando assim nas variações da velocidade de geradores e turbinas, que por princípio funcionam em sincronismo [9].

Em condições normais de operação e em regime permanente, as instalações de geração conectadas junto ao sistema de distribuição devem apresentar valores de frequência entre 59,9 Hz e 60,1 Hz. Com relação a questão da presença de distúrbio no sistema de distribuição, o tempo tolerável para que a geração retorne para a faixa de 59,5 Hz a 60,5 Hz deverá ser 30 (trinta) segundos [8].

3 | METODOLOGIA

Para a realização desse estudo foi escolhido o IFG Campus Goiânia haja vista ser um consumidor contemplado no Programa de Eficiência Energética - PEE da ENEL DISTRIBUIÇÃO GOIÁS. Em consonância com as Leis nº 9.991/2000, nº 13.203/2015 e nº 13.280/2016, esse programa é realizado anualmente e determina que as concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica devem aplicar, anualmente, a partir de abril 2016, o valor equivalente a 0,4% de sua receita operacional líquida anual no desenvolvimento de programas para o incremento da eficiência energética no uso final de energia elétrica, através de projetos executados em instalações de clientes e consumidores [13].

A primeira fase desse projeto contemplou parte do sistema de iluminação do IFG – Campus Goiânia, onde a antiga iluminação, composta por mais de 90% de lâmpadas fluorescentes tubulares, foram substituídas por lâmpadas LED tubulares. Para a realização da efficientização da iluminação, foi necessário instalar 5575 lâmpadas LED, conforme apresentado na Tabela 5 [14].

Descrição	Quantidade
Lâmpada LED tubular T8, 18 W	5258
Lâmpada LED tubular T8, 9 W	166
Lâmpada Bulbo, 10 W	107
Lâmpadas LED (3000 K) Dicroica 6 W	44
Total	5575

Tabela 5 – Descrição das lâmpadas instaladas.

Para analisar o comportamento dos indicadores de qualidade de energia nas instalações em qualquer ambiente em estudo, é necessário definir alguns parâmetros, conforme apresentados nas subseções A e B.

A. Fenômenos da qualidade do produto analisados e pontos monitorados

Os fenômenos da qualidade do produto analisados são: tensão em regime permanente, fator de potência, harmônicos, desequilíbrio de tensão e variação de frequência.

Os pontos de monitoramento selecionados são os secundários dos transformadores, que por sua vez, alimentam os quadros de distribuição das cargas. Recomenda-se também pontos de monitoramento no primário dos transformadores, especificamente do lado dos secundários do transformador de corrente – TC e transformador de potencial – TP, pois a alimentação no primário dos transformadores apresenta uma tensão de 13,8 kV ou 34,5 kV, inviabilizando a conexão do instrumento.

B. Instrumentos e critério de medição

Nas medições são utilizados instrumentos e critério de medição em conformidade com as recomendações do Módulo 8 do PRODIST e a Norma IEC 61000-4-30, descritos a seguir [8] e [15]:

- os instrumentos devem operar de acordo com o princípio da amostragem digital;
- na medição de todos os fenômenos da qualidade do produto, utilizar um único instrumento;
- o conjunto de medições para gerar os indicadores da qualidade do produto deve apresentar um total de 1008 (mil e oito) leituras válidas em intervalos consecutivos de 10 minutos cada. As leituras eventualmente expurgadas são substituídas;
- o método de medição utilizado é de Classe A ou S, conforme norma vigente da IEC 61000-4-30.

A Figura 1 apresenta a instalação do instrumento de medição no secundário do transformador, com topologia de medição em estrela com neutro aterrado, abrangendo medições entre todas as fases, o neutro e o aterramento (proteção) fornecidos no ponto de conexão [8] e [16].

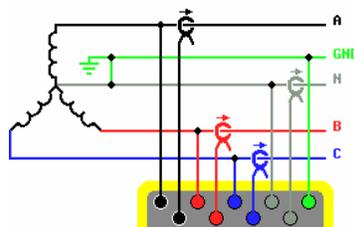


Figura 1 – Topologia de medição em estrela com neutro aterrado

Além da topologia em estrela com neutro aterrado, outras configurações poderão ser adotadas, conforme disposição do circuito.

4 | RESULTADOS

Nesta seção são apresentados os resultados das medições realizadas nos transformadores 1 e 2, com potência de 500 kVA e 225 kVA respectivamente, antes e após a efficientização do sistema de iluminação do IFG Campus Goiânia.

Antes da implementação do projeto de eficiência energética foi realizada a medição no PAC (Ponto de Acoplamento Comum) dos transformadores, isto é, no primário, especificamente junto a medição de faturamento, onde o analisador de energia foi conectado junto ao Transformador de Corrente – TC e ao Transformador de Potencial – TP.

As medições após a efficientização do sistema de iluminação foram realizadas nos secundários dos transformadores 1 e 2. Estava previsto a instalação do analisador de energia no ponto comum que alimenta os transformadores, junto a medição de faturamento, porém o local proposto apresentava lacre. Solicitou-se junto a ENEL DISTRIBUIÇÃO GOIÁS a liberação para efetuar as medições, entretanto o pedido foi negado, impossibilitando assim o monitoramento nesse ponto.

A. Tensão em regime permanente

A partir das medições realizadas foram avaliados os níveis de tensão em regime permanente das tensões entre fase e fase (V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}) no primário dos transformadores 1 e 2. Observa-se na Figura 2, que os valores de tensão durante o período de medição atingiram picos de até 14,159 kV e decréscimo de tensão igual a 13,520 kV, porém esses valores variaram dentro da faixa de tensão adequada, isto é, entre 12,834 kV a 14,490 kV, conforme a Tabela 1.

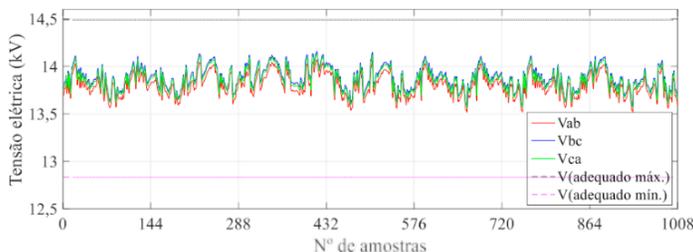


Fig. 2 – Tensão em regime permanente (transformadores 1 e 2)

As Figuras 3 e 4 mostram as medições realizadas após a efficientização do sistema de iluminação. Observa-se na Figura 3, que os valores de tensão durante o período de medição no transformador 1, atingiram picos de até 389,46 V e decréscimo de tensão

igual a 369,60 V, porém esses valores variaram dentro da faixa de tensão adequada estabelecidos na Tabela 2, isto é, entre 350 V a 399 V.

Na Figura 4, são exibidos os resultados obtidos do transformador 2 e constata-se que os valores variaram dentro da faixa de tensão adequada, mesmo apresentando valor máximo de 390,06 V e valor mínimo de 370,80 V. Nenhuma amostra apresentou valor dentro da faixa precária e crítica.

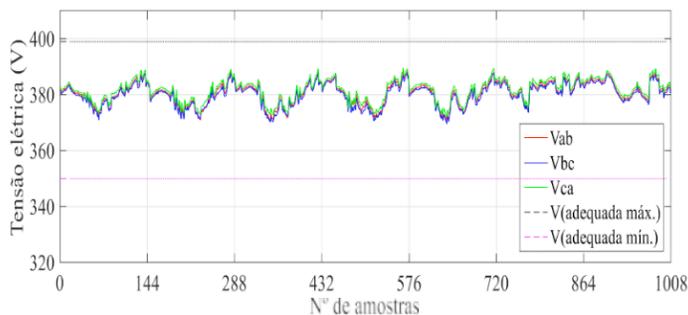


Fig. 3 – Tensão em regime permanente (transformador 1)

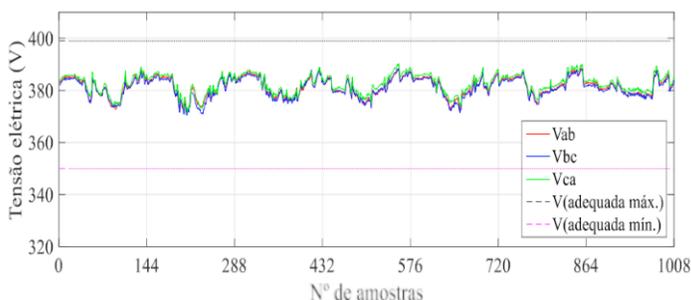


Fig. 4 – Tensão em regime permanente (transformador 2).

B. Fator de potência

A Tabela 6 apresenta os resultados referente as medições de fator de potência antes e após o *retrofit* da iluminação. Observa-se que os resultados antes, apresenta valores dentro dos limites estabelecidos, inclusive nenhuma amostra menor que 0,92.

Quanto aos resultados após o *retrofit* de iluminação, constata-se no transformador 1 que os resultados estão dentro dos limites estabelecidos, compreendido entre 0,92 e 1,00 indutivo ou 1,00 e 0,92 capacitivo. Todavia, nota-se que a partir das medições na fase C, mesmo apresentando o valor médio do fator de potência igual a 0,96, apresenta um índice de 5,75% das amostras com valores abaixo de 0,92, em um total de 1008 amostras válidas. Tais resultados foram oriundos de um final de semana, onde ocorreu um consumo mínimo de energia elétrica.

No transformador 2 constatou-se que dentre as 1008 amostras válidas, apenas

3,27% das amostras apresentaram valores abaixo de 0,92 com relação ao fator de potência total. Na fase A observou-se um índice igual a 0,09%, na fase B igual a 0,00% e na fase C igual a 0,39%.

Transformadores 1 e 2 (antes do retrofit da iluminação)		
Fases	Fator de potência	
	Valor médio	Número de amostras menores que 0,92 (%)
Total	0,98	0,00
Transformador 1 (após o retrofit da iluminação)		
Fases	Fator de potência	
	Valor médio	Número de amostras menores que 0,92 (%)
A	0,99	0,00
B	0,98	0,00
C	0,96	5,75
Total	0,97	0,00
Transformador 2 (após o retrofit da iluminação)		
Fases	Fator de potência	
	Valor médio	Número de amostras menores que 0,92 (%)
A	0,98	0,09
B	0,99	0,00
C	0,99	0,39
Total	0,97	3,27

Tabela 6 – Valores dos indicadores do fator de potência (transf. 1 e 2).

C. Distorção harmônica de tensão

As distorções harmônicas totais de tensões (DTT) nas fases A, B e C, dos transformadores 1 e 2 antes do *retrofit* da iluminação, é apresentada na Figura 5 e pode ser verificado que o número de medições encontram-se com valor máximo igual a 1,55%. Assim está em consonância com os limites estabelecidos na Tabela 3, que permite taxa de distorção de até 8%. Nesse monitoramento não foram realizadas medições referente as distorções harmônicas individuais das tensões.

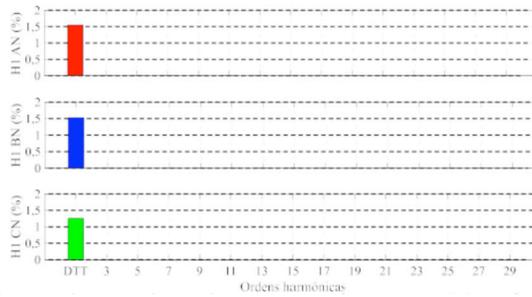


Fig. 5 – Distorções harm. das tensões nas fases A, B e C (transf. 1 e 2)

Quanto aos resultados após o *retrofit*, pode ser verificado nas Figuras 6 e 7 que as distorções harmônicas totais de tensões (DTT) encontram-se com valores máximos de até 2,0%. Assim está em consonância com os limites estabelecidos na Tabela 3, que permite taxa de distorção de até 10%.

Com relação aos perfis das distorções harmônicas individuais das tensões nas fases A, B e C nos transformadores 1 e 2, as Figuras 6 e 7 mostram, que os resultados estão em conformidade com a Tabela 3. Os limites estabelecidos para as componentes ímpares não múltiplas de 3 e as componentes múltiplas de 3, isto é, as DTT_i e DTT₃ são iguais a 7,50% e 6,50% respectivamente. Todavia as medições apresentaram valores inferiores a 2,0%.

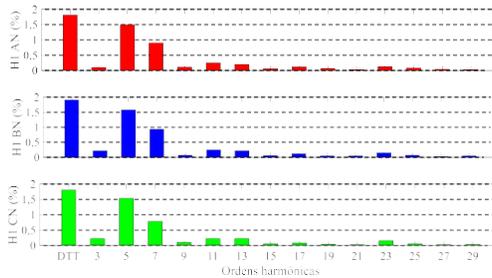


Fig. 6 – Distorções harmônicas das tensões nas fases A, B e C (transf. 1)

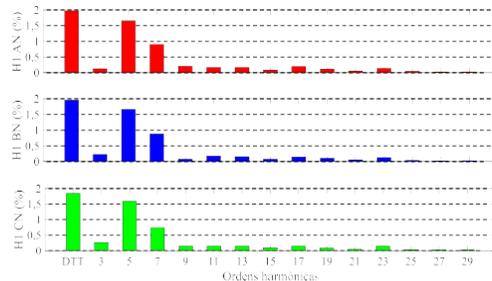


Fig. 7 – Distorções harmônicas das tensões nas fases A, B e C (transf. 2)

D. Desequilíbrio de tensão

O comportamento do desequilíbrio de tensão nos transformadores 1 e 2, antes do *retrofit* da iluminação é mostrado na Figura 8 e constata-se que as medições apresentam valores dentro do intervalo de 0,2% a 0,6%, quanto o limite máximo permitido é igual a 2%.

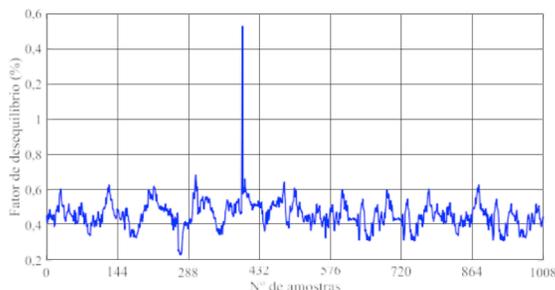


Fig. 8 – Desequilíbrio de tensão (transformadores 1 e 2)

Com relação a curva do desequilíbrio de tensão nos transformadores 1 e 2, a Figura 9 mostra que as medições apresentam valores dentro do intervalo de 0,0% a 0,4%. Esses valores atendem os limites estabelecidos na Tabela 4, que permite até 3% de desequilíbrio de tensão em relação a 5% das 1008 amostras válidas, ou seja, valores que podem ser ultrapassados por 5% de um total de 1008 leituras válidas.

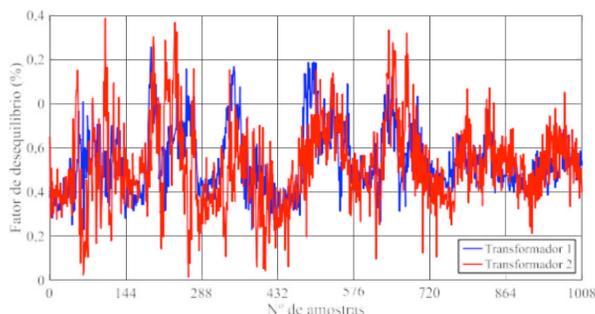


Fig. 9 – Desequilíbrio de tensão (transformadores 1 e 2)

E. Variação de frequência

O comportamento da variação da frequência nos transformadores 1 e 2, antes do *retrofit* da iluminação é mostrado na Figura 10 e observa-se que os valores medidos encontram-se no intervalo de 59,9 a 60,1 Hz para as condições normais de operação.

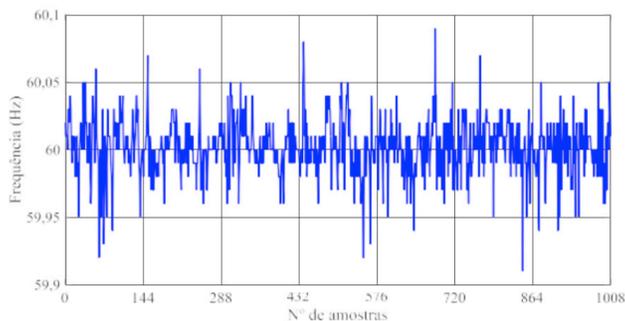


Fig. 10 – Variação de frequência (transformadores 1 e 2)

A Figura 11 apresenta a variação de frequência registrada nos transformadores 1 e 2 após o *retrofit* da iluminação. Consta-se que os valores medidos no período encontram-se no intervalo de 59,9 a 60,1 Hz para as condições normais de operação, desta forma apresentando um comportamento estável.

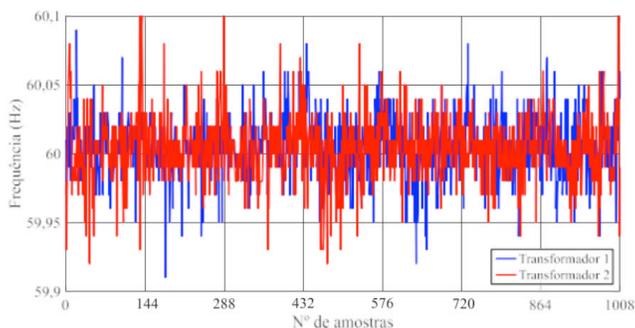


Fig. 11 – Variação de frequência (transformadores 1 e 2)

5 | CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou os resultados das medições de parâmetros de qualidade de energia realizadas nas instalações do IFG Campus Goiânia antes e após a eficiência do sistema de iluminação.

Na eficiência do sistema de iluminação, onde substituiu as lâmpadas incandescentes, fluorescentes compactas, fluorescentes tubulares, mista e vapor de mercúrio por lâmpadas com diodo emissor de luz (LED), os resultados indicam que não ocorreram transgressões com relação aos indicadores de qualidade de energia. Da mesma forma, que os parâmetros de QEE mostraram-se dentro dos limites estabelecidos, nas medições realizadas antes da implantação do projeto de eficiência energética.

A análise realizada é importante neste momento, pois os resultados atendem aos critérios estabelecidos pelo Módulo 8 do PRODIST e a Norma IEC 61.000-4-30, e serve de

referência para outros estudos, que apresentam características similares ao IFG – Campus Goiânia.

Ainda que o presente trabalho permita uma boa avaliação com relação aos indicadores de QEE, vislumbra-se para trabalho futuro a continuação desse estudo, onde será realizada análise após a adição de sistema fotovoltaico no IFG – Campus Goiânia, que faz parte da segunda fase do projeto e terá como objetivo possibilitar a autossuficiência energética do Campus.

REFERÊNCIAS

- [1] VILLALVA, M. G.; GAZOLI, J. R. **Energia solar fotovoltaica: Conceitos e aplicações - Sistemas isolados e conectados à rede**. 1ª. ed. São Paulo: Érica, 2012.
- [2] WANG, Y.; YAZDANPANAHI, H.; XU, W. **Harmonic impact of LED lamps and PV panels**. In: CANADIAN CONFERENCE OF ELECTRICAL AND COMPUTER ENGINEERING (CCECE), IEEE 26º, 2013, Canadá. **Anais...**Regina, SK: IEEE Canadá, 2013. p.1-4.
- [3] N. INDRA, D. ISMAIL, M. SYAFRUDIN, R. CHAN BAHAUDIN, H. SURYA. **Harmonic Monitoring at UniMAP Distributed Campus**. In: The 5th International Power Engineering and Optimization Conference (PEOCO2011), Shah Alam, Selangor, Malaysia : 6-7 June 2011
- [4] IRFAN I. MUJAWAR, KOMAL S. DUBAS, SUCHITRA V. ITTAM, SNEHA N. NAVGIRE, ISAK I. MUJAWAR. **Power Quality Audit of NKO CET-A Case Study**. In: IEEE International Conference on Energy Systems and Applications (ICESA 2015), Pune, India 30 Oct - 01 Nov, 2015.
- [5] ABDULLAHI L. AMOO ; USMAN O. ALIYU ; GANIYU A. BAKARE ; DALILA M. SAID ; MOHAMMAD Y. HASSAN. **Harmonic Measurements and Analyses in Distribution Infrastructure Feeding Selected Institutions in Malaysia and Nigeria**. In: IEEE, Clemson University Power Systems Conference (PSC), Clemson, SC, USA, 2015.
- [6] BOGILA, A; PINTO, J.R.; FRANCHI, T.P.; GONÇALVES, M.R. **Análise harmônica nos inversores fotovoltaicos de uma microgeração fotovoltaica**. In: VII Congresso Brasileiro de Energia Solar , 2018, Gramado, Brasil, p.1-10.
- [7] ROCHA, J. E. **Qualidade da energia elétrica. 2016**. Paraná, UTFPR, 2016. Disp.em<http://paginapessoal.utfpr.edu.br/joaquimrocha/qualidade-da-energia-eletrica/Qualidade%20da%20Energia%20Elétrica%20_%20Apostila.pdf/view> Acesso em: 28 de fev. 2021.
- [8] ANEEL – Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST- **Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica**, 2018, Revisão 10. Resolução Normativa nº 794/2017.
- [9] DECKMANN, S. M., POMILIO, J. A. **Avaliação da Qualidade da Energia Elétrica**. 2018. UNICAMP/FEEC/DSE. Disponível em <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/it012.html> > Acesso em: 28 de fev. de 2021.
- [10] DUGAN, R.C.; MCGRANAGHAN, M.F.; SANTOSO,S.; BEATY,H.W. **Electrical Power Systems Quality**. 2ª edição, EUA: Editora McGraw-Hill, 2004.

- [11] IEEE Std. 519 – **Recommend Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems**, 2014.
- [12] LEÃO, R. P. S.; SAMPAIO, R. F.; ANTUNES, F. L. M. **Harmônicos em sistemas elétricos**. 1^a. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2014.
- [13] ENEL. **CHAMADA PÚBLICA DE PROJETOS DA ENEL DISTRIBUIÇÃO GOIÁS CPP 002/2019**. Versão 4.1, Goiânia, 2019. Disponível em < <https://enel-go.chamadapublica.com.br/> > Acesso em: 01 de mar. 2021.
- [14] TECNIA. **Relatório 3 - Projeto executivo – Ações de Eficiência Energética IFG**. Goiânia, p. 49. 2016.
- [15] IEC. Internacional Standard IEC 61.000-4-30, **Electromagnetic Compatibility (EMC) – Part 4-30: Testing and measurement techniques – Power quality measurement methods**, 2015.
- [16] FLUKE. **Fluke 434-II/435-II/437-II Analisadores de Qualidade de Potência e Energia Trifásicos**. Manual do Usuário. 180p. 2012. Disponível em < [https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/F430- II_umpor0100.pdf](https://dam-assets.fluke.com/s3fs-public/F430-II_umpor0100.pdf) > Acesso em: 05 de mar. 2021.

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 