



**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES.
(GTM)**

SISTEMA INTELIGENTE PARA LOCALIZAÇÃO DE DESCARGAS PARCIAIS EM TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

COSTA, P. I. (*)
CTEEP

FLAUZINO, R. A.
USP/EESS/SEL

RESUMO

O crescente aumento na demanda de energia elétrica nacional, associada às alterações regulamentares do setor, em que o tempo que um equipamento permanece indisponível para o sistema, aguardando manutenção significa perda de receita para as companhias de energia, motivou a busca por diagnósticos precisos e utilização de técnicas não invasivas que possam ser aplicadas em transformadores em serviço. Assim, o foco desta pesquisa foi o desenvolvimento de uma arquitetura de sistema inteligente baseado em Redes Neurais Artificiais, que a partir de características extraídas de sinais de emissão acústicas provenientes de sensores distribuídos espacialmente no tanque de transformadores de potência, possa identificar internamente o local de ocorrência das descargas parciais e fornecer as distâncias estimadas entre os sensores e o ponto dessa descarga, e com essas distâncias, utilizando técnicas numéricas de triangulação, o sistema fornece também a coordenada espacial da falha auxiliando no diagnóstico de defeito do transformador e no processo de tomada de decisões.

PALAVRA-CHAVE

Palavra-Chave; Transformadores de Potência, Sistemas Inteligentes, Descargas Parciais, Redes Neurais Artificiais.

1.0 - INTRODUÇÃO

Devido ao crescente aumento da demanda energética nacional, a qual está diretamente associada às alterações regulamentares do setor elétrico, despertou o interesse e a preocupação com a confiabilidade e a qualidade do fornecimento de energia elétrica. Dentro deste contexto, destaca-se o desenvolvimento de metodologias dedicadas à identificação, localização e predição de falhas referentes a todos os segmentos do sistema elétrico, abrangendo desde o setor da geração, passando pelo setor da transmissão e chegando até o setor da distribuição da energia elétrica.

Em geral, a ocorrência de falhas dentro de cada um destes setores acarreta em efeitos indesejados, tais como a interrupção do fornecimento de energia elétrica e o desencadeamento de perturbações transitórias, que podem danificar equipamentos dos circuitos consumidores, imporem prejuízos econômicos ao sistema produtivo, inutilizar equipamentos do sistema elétrico, afetar quesitos de qualidade de fornecimentos, etc.

Dentre os diversos equipamentos instalados junto ao sistema elétrico, os transformadores de potência destacam-se pela sua importância operacional e por constituírem um ponto crítico do sistema, uma vez que, além de serem responsáveis pela adequação dos níveis de tensão entre a transmissão, ou sub-transmissão, aos níveis de tensão da rede de distribuição primária, são também responsáveis pela transferência de toda energia entre dois circuitos de acoplamento.

Os transformadores de potência são um dos equipamentos mais importantes de um sistema de transmissão de energia elétrica, tanto devido a sua finalidade quanto ao elevado custo. Em função da natureza construtiva dos transformadores, quando da ocorrência de um fenômeno eletromagnético, tal equipamento se encontra sujeito a

condições extremas que podem resultar em incidência de pontos quentes e movimentação de suas partes ativas. Somando-se a essa possibilidade, têm-se ainda as sobretensões que são observáveis em muitos fenômenos que ocorrem no setor elétrico. Esses efeitos combinados nas suas diferentes formas desencadeiam um grande número de modos de falhas em transformadores. Quando em operação essas falhas evoluem gradativamente ou intempestivamente, podendo resultar na perda do transformador e indisponibilidade do sistema de transmissão. Além da perda do equipamento, podem ocorrer outros prejuízos de grande gravidade, destacando-se aqueles que atentam para vida humana e outros que decorrem de danos ambientais.

2.0 - PRINCIPAIS ASPECTOS RELACIONADOS AOS ENSAIOS DE TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA VISANDO A DETECÇÃO DE FALHAS.

Diversas pesquisas têm sido realizadas com o intuito de buscar por novas metodologias que sejam eficientes na detecção de falhas em transformadores de transmissão, sendo que um dos principais motivos é o alto custo associado tanto à aquisição de um novo transformador como à manutenção do mesmo.

As abordagens de detecção de falhas em transformadores por meio da análise da concentração dos gases dissolvidos no óleo isolante do equipamento baseiam-se na constatação de que as falhas, tais como as descargas parciais, as descargas de alta energia, os efeitos corona, os sobreaquecimentos, dentre outros, interagem com o óleo isolante do transformador, e a partir desta interação, o óleo sofre alterações na sua composição química e nas suas propriedades físicas. Em geral, estas alterações são acompanhadas do desprendimento de gases que por apresentarem volumes ínfimos acabam por se dissolverem no óleo isolante. Através de ensaios cromatográficos realizados no óleo isolante, obtêm-se então os valores volumétricos dos principais gases que estão dissolvidos no óleo.

Além dos ensaios cromatográficos realizados com o óleo isolante, destacam-se também os ensaios físico-químicos feitos no mesmo. Através destes ensaios, diversas características físico-químicas do óleo isolante são levantadas. Dentre as propriedades físico-químicas de maior interesse (dentro do contexto de análise do óleo isolante) destacam-se o exame de cor, da densidade, da rigidez dielétrica, da tensão interfacial, do teor de água, do índice de neutralização e do fator de potência do óleo. Todos os ensaios físico-químicos mencionados podem ser realizados no próprio local de instalação do transformador, sendo que grande parte dos ensaios pode também ser realizado com o equipamento em funcionamento.

Ademais, podem ser destacados outros dois tipos de ensaios, os quais se fazem extremamente importantes no que diz respeito ao diagnóstico de transformadores de transmissão de energia elétrica. Estes ensaios são conhecidos como: ensaio de relação de espiras e ensaio de tensão induzida. Os ensaios de relação de espiras têm por objetivo diagnosticar o transformador em relação ao seu enrolamento (primário e/ou secundário), onde é verificada a relação entre as espiras do lado de alta e baixa tensão do transformador sob análise. Já os ensaios de tensão induzida, são empregados quando da necessidade de se realizar testes dielétricos (em campo) nos transformadores de potência. Entretanto, deve-se destacar que os ensaios de tensão induzida podem ser distintos dependendo da classe do transformador ao qual deseja aplicar o ensaio.

Por fim, é importante comentar que os ensaios em transformadores de potência (com óleo isolante) devem respeitar as recomendações do (IEEEStd. C57.12.00-2006), as quais são apresentadas por meio da Tabela 1.

Tabela 1 – Recomendações para ensaios em transformadores de potência com isolamento a óleo.

Ensaio	500 kV ou menor			501 kV ou maior		
	Rotina	Projeto	Outros	Rotina	Projeto	Outros
Medidas de resistência de todos os enrolamentos sobre a tensão nominal do <i>tap</i> e até os limites do <i>tap</i>		X		X		
Resistência de isolamento dos enrolamentos			X	X		X
Resistência de isolamento do núcleo			X	X		X
Teste de relação	X			X		
Polaridade e relação de fase	X			X		
Fator de potência			X	X		X
Controle de perdas			X			X
Excitação monofásica			X			X
Perdas sem carga e excitação de corrente a 100% e 110% da tensão nominal e também para a frequência	X		X	X		X

nominal						
Tensão sobre impedância e perda de carga em corrente nominal e frequência nominal		X	X	X		
Tensão sobre impedância de sequência zero						X
Aumento de temperatura		X	X		X	X
Testes dielétricos de baixa frequência	X			X		
Testes dielétricos ao impulso de descargas atmosféricas		X	X		X	X
Testes dielétricos do chaveamento do impulso, fase-terra						X
Teste dielétrico de descargas parciais			X	X		X
Som audível		X	X		X	X
Capacidade de curto-circuito		X				X
Análise de gases dissolvidos no óleo				X		X
Testes mecânicos		X			X	

Devido aos diversos tipos de ensaios que podem ser realizados e também pela complexidade relacionada ao diagnóstico do transformador, esta se torna uma área potencial para a aplicação de sistemas inteligentes, os quais, neste caso, são empregados na forma de ferramenta de apoio à decisão.

3.0 - ASPECTOS DE PRÉ-PROCESSAMENTO REALIZADOS NOS ENSAIOS DE DESCARGAS PARCIAIS.

As tarefas de identificação e localização de falhas internas em transformadores de potência são extremamente importantes, visto que o equipamento possui um alto custo agregado tanto para compra como para manutenção.

As análises de gases dissolvidos e a análise das descargas parciais por meio de sensores de emissão acústica são também cruciais para a manutenção do equipamento, pois podem trazer muitas vantagens, tais como a redução do risco de falhas inesperadas, contribuindo-se então para prolongar a vida útil do transformador, diminuindo seus custos de manutenção e reduzindo também o seu período de manutenção (devido à localização precisa da falha). Além disso, com o processamento destes dados por meio de sistemas especialistas inteligentes, torna-se possível fornecer respostas que auxiliam no processo de tomada de decisão sobre o potencial do transformador analisado.

O aparato experimental responsável pelo monitoramento do equipamento pode variar de acordo com o tipo de defeito a ser analisado. Em termos gerais, este sistema de monitoramento pode ser mais bem compreendido por meio da Figura 1.

Já a Figura 2, ilustra a fixação de sensores de emissão acústica montados nas paredes externas do tanque experimental, o qual foi especialmente confeccionado para os propósitos deste projeto de pesquisa, cujos sinais são transmitidos através de um cabo para o sistema de aquisição. A Figura 3 ilustra o layout que direcionou o posicionamento dos sensores de emissão acústica junto ao tanque experimental, tendo-se aqui, o propósito de que os mesmos pudessem cobri-lo de maneira bem distribuída.

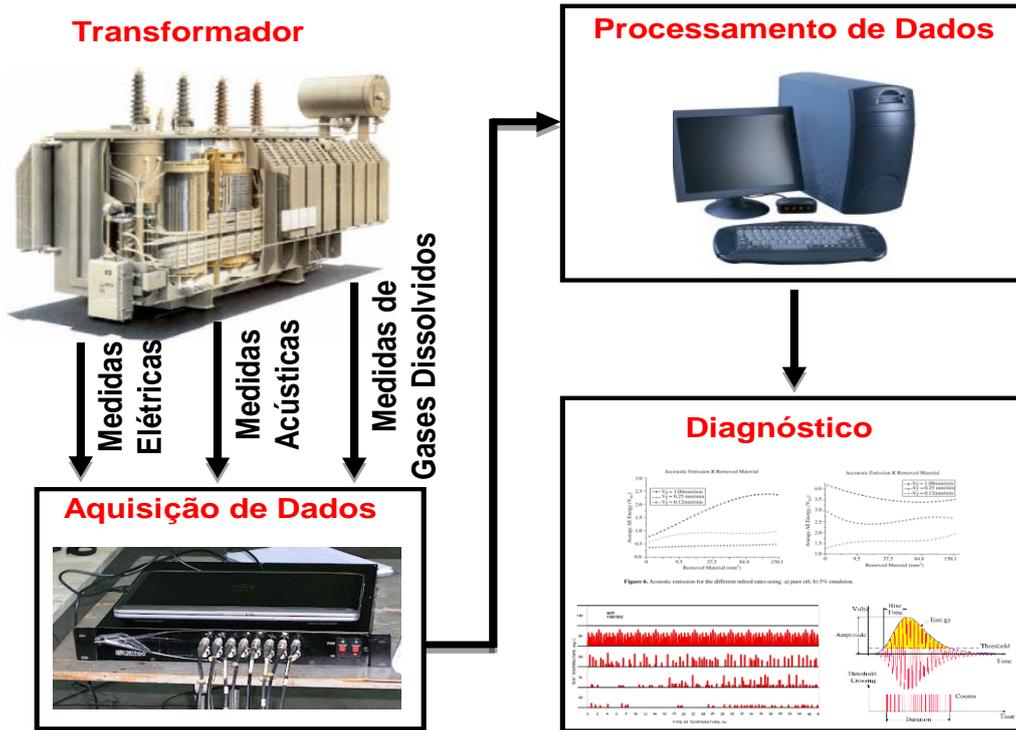


Figura 1 – Diagrama de blocos do sistema de monitoramento de sinais acústicos.



Figura 2 – Disposição dos sensores de emissão acústica fixados ao lado de fora do tanque experimental repleto com óleo isolante.

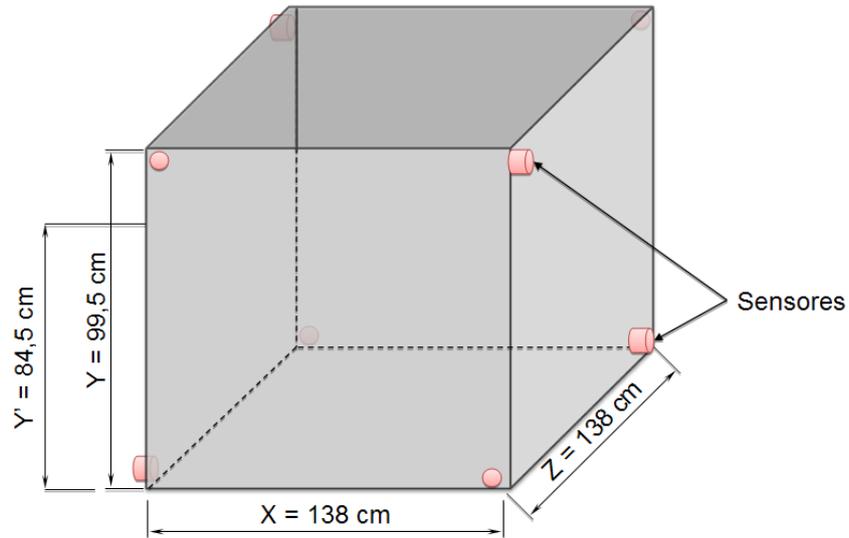


Figura 3 – Diagrama (layout) para indicação de posicionamento de sensores de emissão acústica.

4.0 – CÁLCULOS REALIZADOS VISANDO O PRÉ-PROCESSAMENTO DOS SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA ADQUIRIDOS NA ETAPA EXPERIMENTAL.

Com o intuito de pré-processar os sinais provenientes dos ensaios experimentais previamente realizados, efetuou-se os cálculos necessários para que os dados pudessem ser posteriormente submetidos às redes neurais artificiais. Seguindo este contexto, todos os cálculos são explanados tendo como base a Figura 4 que representa um sinal de emissão acústica capturado após a ocorrência de uma descarga parcial num transformador de transmissão de energia elétrica.

Assim, analisando-se tal figura, é possível notar que uma das características consideradas para o pré-processamento do sinal é o valor da máxima amplitude adquirida pelo sensor de emissão acústica.

Além dessa amplitude máxima, outra variável que possui grande necessidade de ser definida é um limiar, pois, a partir deste limiar uma diversidade de características do sinal pode ser devidamente obtida, a saber: duração, tempo de subida e contagem de pontos acima do limiar.

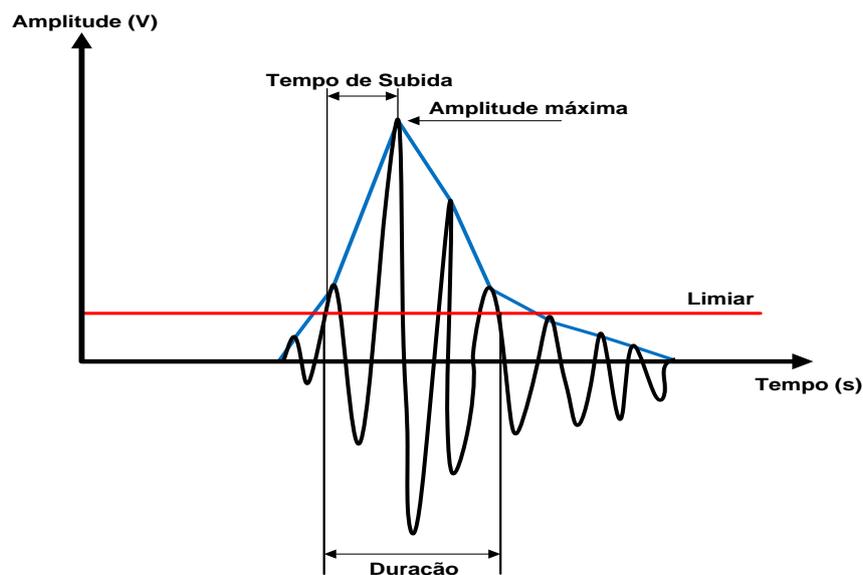


Figura 4 – Parâmetros extraídos dos sinais acústicos.

Desta forma, é importante notar que grande parte das medidas são consideradas somente após a definição de um limiar, entretanto, em muitos casos, como os sinais de emissão acústica apresentam amplitudes muito baixas frente às descargas parciais, este limiar pode ser definido em zero.

Destaca-se que todas as características extraídas dos sinais de emissão acústica foram calculadas por serem aquelas que se apresentaram na literatura correlata como as mais relevantes e, portanto, devem ser consideradas neste projeto de pesquisa e desenvolvimento.

5.0 – CARACTERÍSTICAS DOS SINAIS DE EMISSÃO ACÚSTICA PROVENIENTE DO MÓDULO DE AQUISIÇÃO.

O módulo de aquisição desenvolvido permite o monitoramento simultâneo de 8 canais de sensores de emissão acústica, sendo o sinal no domínio do tempo adquirido em altíssima velocidade. Na tabela 2 encontra-se registrado, um pequeno exemplo de como o sinal de emissão acústica é armazenado, após o processo de digitalização.

A primeira coluna representa o tempo, e as demais à amplitude em Volts captada em cada um dos 8 canais monitorados. Cada arquivo possui cerca de “1100 pontos” x “8 colunas”. Dos 35 ensaios realizados, foram obtidos 2727 arquivos válidos de sinais de emissão acústica provenientes de descargas parciais.

Notadamente é expressiva a quantidade de dados experimentais que serão utilizados nos processos de aprendizado dos sistemas inteligentes.

Os dados no domínio do tempo ainda foram concatenados em uma grande base de dados de ensaios, com mais de “3 milhões de registros” x “21 colunas”, sendo que além da identificação do ensaio e valores captados pelos oito sensores de emissão acústica, foram também inseridas as coordenadas do ponto de aplicação da DP no tanque experimental, além da distância euclidiana do ponto de aplicação da DP a cada um dos sensores. O objetivo da composição desta base mais ampla, consiste em facilitar os procedimentos de extração das características acústicas que serão efetivamente empregadas no sistema de localização das descargas parciais.

Tabela 2– Exemplo de sinal de emissão acústica adquirido pelo modo de aquisição.

Tempo (s)	Sensor 1 (V)	Sensor 2 (V)	Sensor 3 (V)	Sensor 4 (V)	Sensor 5 (V)	Sensor 6 (V)	Sensor 7 (V)	Sensor 8 (V)
0.0055	0.0153	0.0212	0.0204	0.0028	0.0222	0.0154	0.0246	0.0199
0.0056	0.0338	0.0148	0.0164	0.0307	0.0224	0.0133	0.0138	0.0187
0.0056	-0.0105	0.0099	0.0187	0.0221	0.0281	0.0219	0.0306	0.0030
0.0056	0.0107	0.0194	0.0220	0.0204	0.0135	0.0087	0.0347	0.0219
0.0057	0.0085	0.0287	0.0232	0.0537	0.0240	0.0240	0.0413	-0.0055
0.0057	0.0178	0.0221	0.0201	0.0193	0.0243	0.0348	0.0107	0.0297
0.0057	0.0142	0.0238	0.0175	0.0331	0.0075	0.0192	0.0255	0.0375
0.0058	0.0389	0.0259	0.0222	0.0255	0.0185	0.0236	0.0121	0.0349
0.0058	0.0174	0.0195	0.0184	-0.0024	0.0153	0.0150	-0.0021	0.0149
0.0058	0.0129	0.0163	0.0197	0.0059	0.0119	0.0174	0.0364	0.0324
0.0059	0.0188	0.0212	0.0216	0.0205	0.0145	0.0275	0.0056	0.0091
0.0059	0.0229	0.0308	0.0226	0.0226	0.0191	0.0274	0.0088	0.0248
0.0059	0.0317	0.0299	0.0196	0.0105	0.0180	0.0233	0.0244	0.0252
0.0060	0.0306	0.0141	0.0211	0.0240	0.0262	0.0228	0.0335	0.0264
0.0060	0.0106	0.0227	0.0181	0.0203	0.0195	0.0179	0.0139	0.0393
0.0060	-0.0042	0.0123	0.0145	0.0090	0.0206	0.0152	0.0176	0.0084
0.0060	0.0315	0.0187	0.0166	0.0336	0.0159	0.0236	0.0172	0.0301
0.0061	0.0294	0.0302	0.0187	-0.0032	0.0220	0.0178	0.0051	-0.0081

Para que todas as distâncias euclidianas fossem referenciadas na mesma base foi realizado uma transformação de coordenadas no sistema.

6.0 – CONCLUSÃO

Nesta pesquisa, foi desenvolvida uma nova técnica para auxiliar na detecção de descargas parciais em transformadores de potência. O sistema inteligente é responsável pela tarefa de identificar o local de ocorrência da descarga, recebendo os dados fornecidos por um sistema eletrônico de aquisição de dados de emissão acústica, extraindo as características que por meio da aplicação de redes neurais artificiais permite estimar a distância da descarga parcial em relação a cada sensor, por conseguinte, aplicando-se técnicas de triangulação as distâncias estimadas, a coordenada espacial da descarga parcial é então inferida. Foi comprovado através dos testes das redes, utilizando os critérios do erro quadrático médio, desvio padrão do erro e histograma do erro absoluto que, as redes de duas camadas escondidas são as que apresentaram melhor desempenho, sendo que, em um processo de treinamento de quase quatro mil padrões foram estimados com erro inferior a 25 centímetros do local da descarga parcial.

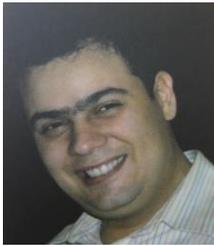
7.0 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7274: Interpretação e análise dos gases no óleo de transformadores em serviço. Rio de Janeiro: ABNT, 1982.
- (2) DUVAL, M., "A Review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers". *IEEE Electrical Insulation Magazine*, v. 18, p. 8-17, 2002.
- (3) GUARDADO, J. R.; NAREDO, J. L.; MORENO, P.; FUERTE, C. R., "A comparative study of neural network efficiency in power transformers diagnosis using dissolved gas analysis". *IEEE Transactions on Power Delivery*, v. 16, n. 4, p. 643-647, 2001.
- (4) IEEE Std. C57.12.00-2006, IEEE Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers, "IEEE Standard for Standard General Requirements for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers", 2007.
- (5) IMAMURA, M. M., "Uma Abordagem Neural Para Identificação de Gases Dissolvidos em Óleo Isolante de Transformadores em Função de Parâmetros Físico-Químicos". *Dissertação de Mestrado em Engenharia Industrial*, Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2000.
- (6) KACHLER, A. J., "On-Site Diagnosis of Power and Special Transformers". *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, p. 362-367, 2000.
- (7) MILASCH, M., "Manutenção de Transformadores em Líquido Isolante". *Editora Edgar Blucher Ltda*, 1984.
- (8) SANTOS, Nerivaldo dos Reis, SILVA, Ivan Nunes, FLAUZINO, Rogério Andrade. "Sistemas Especialistas Para Projeto Otimizado de Sistemas de Aterramento e Proteção Eficiente de Transformadores Frente às Descargas Atmosféricas", *Anais do XIX Seminário Nacional de Distribuição de Energia Elétrica (CD-ROM // Paper No. uuj378 // 12 Páginas)*, 2010.
- (9) ZHU, S. P.; SHI, J.; LIM, Y. S.; TAN, C. I.; CHEONG, Y. K., "Transformer Testing and Analysis with a Window-based Graphic User Interface". *International Conference on Energy Management and Power Delivery*, p. 410-415, 1995.
- (10) SILVA, Ivan Nunes, FLAUZINO, Rogério Andrade. "Redes Neurais Artificiais para engenharia e ciências aplicadas", *São Paulo: Artliber*, 2010.

8.0 – DADOS BIBLIOGRÁFICOS



Paulo Izidio da Costa é natural de Lins/SP, nascido em 16 de Maio de 1969. Concluiu o curso de graduação em Engenharia Elétrica (modalidade Eletrotécnica) e tornou-se mestre em Engenharia Elétrica (Sistemas dinâmicos) em 2015 pela Universidade de São Paulo - USP/São Carlos. Trabalha na CTEEP - Companhia de Transmissão de Energia Elétrica de Paulista na área de Sistemas de Proteção, Automação e Telecomunicações-SPAT. E-mail: pcosta@ctEEP.com.



Rogério Andrade Flauzino é Professor doutor da Universidade de São Paulo - USP/São Carlos. Graduou-se em Engenharia Elétrica (2001) e obteve o mestrado em (2004) em Engenharia Industrial, ambos pela Universidade Paulista - UNESP/Bauru. Fez doutorado (2007) pela Universidade de São Paulo em temas associados com aplicação de sistemas inteligentes.