



## EXPERIÊNCIA DE CAMPO COM A MONITORAÇÃO ON-LINE DE BUCHAS DC NO SISTEMA HVDC DA SUBESTAÇÃO IBIÚNA

EDILSON G. PERES\*

Furnas Centrais Elétricas S.A.

Brazil

MARCOS E. G. ALVES\*\*

Treetech Sistemas Digitais Ltda.

Brazil

**Resumo:** O monitoramento on-line da capacitância e da tangente delta de buchas AC tem alcançado bons resultados na sua aplicação em transformadores e reatores de potência. No entanto a sua aplicação direta em buchas condensivas de transformadores conversores de sistemas HVDC, com a utilização dos mesmos recursos de hardware e software, não é possível, tendo em vista a presença de componentes harmônicos resultantes da conversão da corrente contínua para corrente alternada, nas buchas destes equipamentos. O presente artigo apresentará os resultados obtidos no desenvolvimento, instalação e operação do monitoramento on-line de buchas condensivas aplicado às buchas HVDC dos transformadores conversores da subestação de Ibiúna.

**Palavras-chave:** Transformador conversor, HVDC, monitoramento on-line, bucha, capacitância, tangente delta.

### I – INTRODUÇÃO

A subestação de Ibiúna é o terminal conversor onde toda a energia produzida em 50Hz na hidroelétrica de Itaipú, após ser convertida em corrente contínua na subestação de Foz do Iguaçu e transmitida em  $\pm 600\text{kV}_{\text{DC}}$ , é convertida para corrente alternada, agora em 60Hz,  $345\text{kV}_{\text{AC}}$ , e escoada para o sistema interligado brasileiro.

Com uma capacidade instalada de 7200MVA, a subestação de Ibiúna possui 24 transformadores conversores em operação. Estes transformadores são unidades monofásicas de 300MVA, com um enrolamento primário e dois enrolamentos secundários. Cada três unidades monofásicas formam um conversor, sendo que cada pólo é formado por dois conversores e cada bipolo é formado por dois pólos (figura 1).

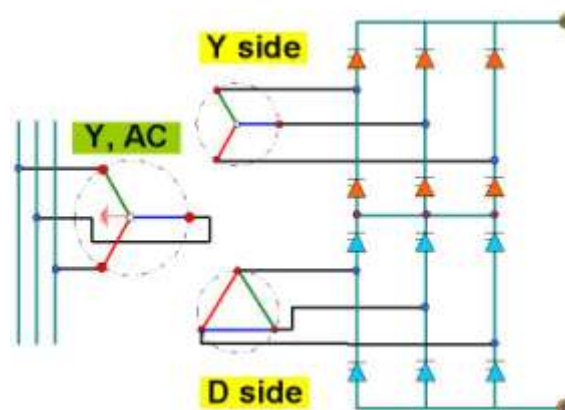
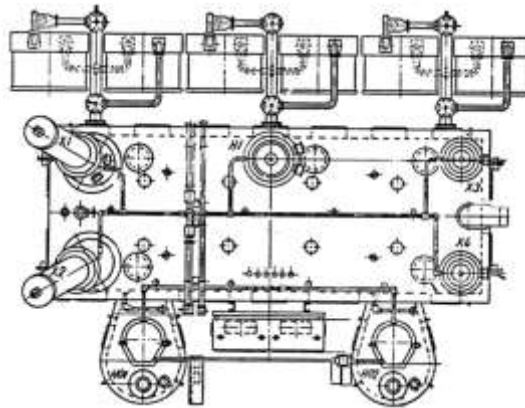


Figura 1: Esquema trifilar de três unidades monofásicas formando um conversor

Para atender a necessidade do conversor de 12 pulsos os enrolamentos  $X_1$  e  $X_2$ , de cada transformador que compõe um conversor, são conectados em estrela e os enrolamentos  $X_3$  e  $X_4$  são conectados em delta (figura 1). Já os enrolamentos  $H_1-H_{01}$  e  $H_2-H_{02}$  são conectados em estrela aterrada. Um esquemático da disposição das buchas do transformador conversor é apresentado na figura 2.

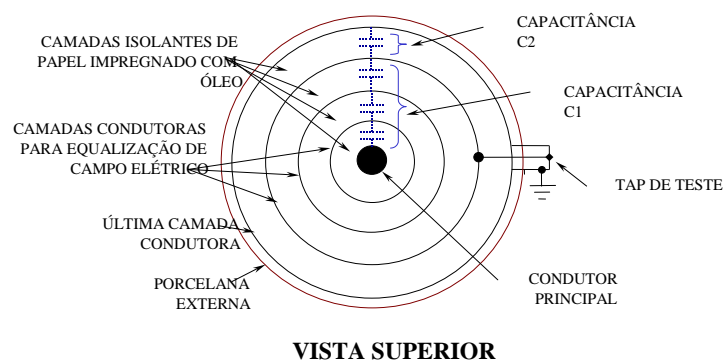


**Figura 2: Disposição das buchas no transformador conversor**

## II – MONITORAMENTO ON-LINE DE BUCHAS EM TENSÃO ALTERNADA

### II.1 – FORMA CONSTRUTIVA DAS BUCHAS CONDENSIVAS

As buchas do tipo condensivas têm sua parte ativa constituída de diversas camadas isolantes cilíndricas concêntricas, intercaladas a camadas condutoras, também cilíndricas, cuja função é uniformizar ao máximo o campo elétrico. A camada condutora mais externa é conectada ao flange da bucha, e este ao terra. Já as camadas condutoras intermediárias permanecem isoladas, com potencial flutuante, com exceção de uma das mais externas, que é aterrada através de uma ligação removível próxima à base da bucha, denominada tap de tensão, tap de teste ou, simplesmente, tap (figura 3). Para aplicação ao tempo, este conjunto, denominado corpo condensivo, estará contido em um invólucro impermeável, que pode ser de porcelana ou material polimérico à base de silicone.



**Figura 3 – Forma construtiva de uma bucha condensiva**

O conjunto descrito acima atua eletricamente como diversos capacitores conectados em série, formando um divisor de tensão capacitivo. Desta forma, a diferença de potencial total do condutor principal em relação ao terra é dividida entre os diversos capacitores. Um circuito equivalente de uma bucha energizada é mostrado na figura 4.

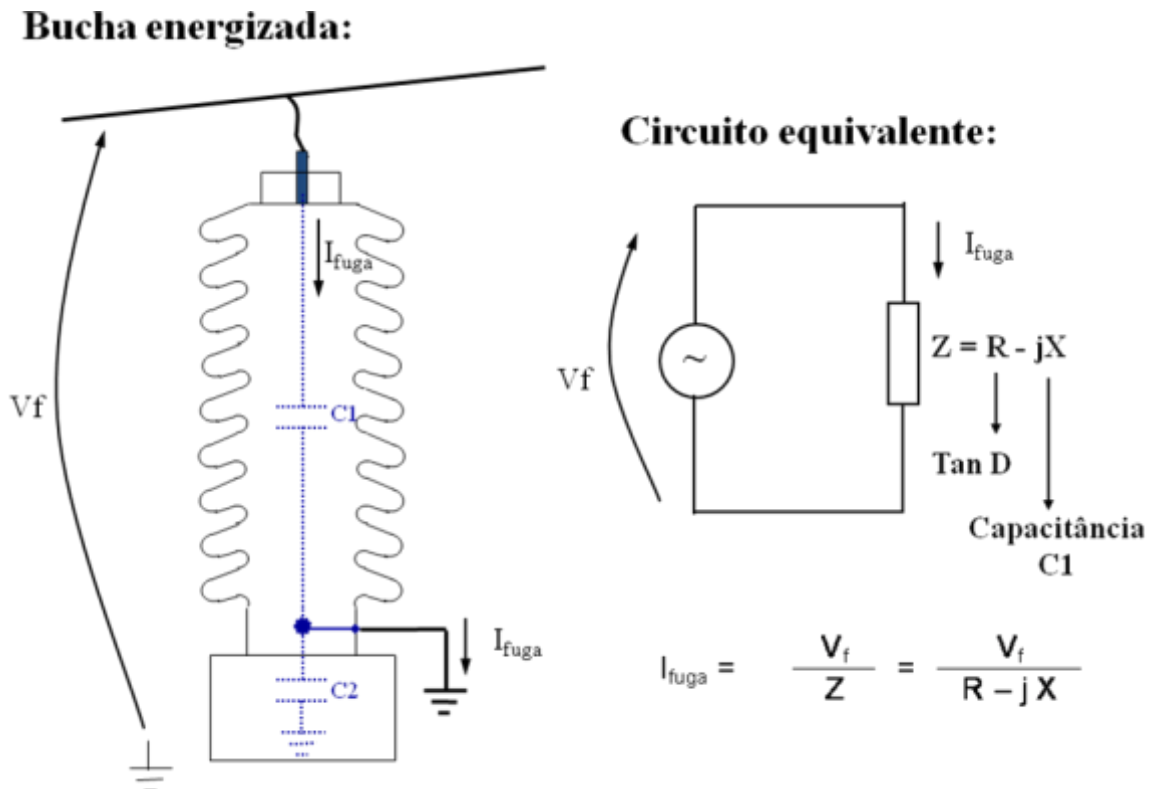


Figura 4 – Circuito equivalente de uma bucha energizada

Quando a tensão fase-terra senoidal é aplicada à bucha uma corrente, denominada corrente de fuga, passa a circular através de sua isolação devido, principalmente, à sua capacitância e, em muito menor proporção, devido às suas perdas dielétricas (expressas pelo fator de dissipação ou tangente delta). A Figura 4 ilustra esta situação; nesta figura podemos observar o equivalente elétrico obtido com a construção mostrada na Figura 3, já com a bucha energizada. Este é o modelo elétrico equivalente “série”. Um modelo elétrico “paralelo” poderia também ser aplicado, com os mesmos resultados. Com o modelo adotado, temos a seguinte corrente de fuga resultante:

$$I_{fuga} = \frac{V_f}{Z} = \frac{V_f}{R - jX}$$

Onde R representa a componente resistiva da impedância da isolação, que está associada à parte resistiva da corrente de fuga e, conseqüentemente, às perdas dielétricas. Já a componente X está associada à capacitância da isolação.

## II. 2 – FILOSOFIA DE OPERAÇÃO DO MONITORAMENTO ON-LINE EM SISTEMAS AC

O objetivo do monitoramento on-line de buchas condensivas é a detecção de alterações na isolação da bucha ainda em sua fase inicial, indicando o desenvolvimento de condições que poderão levar à falha dielétrica do equipamento. Para isto é necessário detectar, com a bucha energizada, mudanças na capacitância e/ou na tangente delta da isolação, ou seja, mudanças na impedância “Z” da isolação da bucha.

Em cada bucha a corrente de fuga ( $I_{fuga}$ ) flui através da capacitância  $C_1$  para a terra, passando pelo tap. Nota-se que, pelo circuito apresentado anteriormente, esta corrente é função da tensão fase-terra e da impedância da isolação. Desta forma, qualquer alteração na impedância da isolação (capacitância ou fator de dissipação) se refletirá em uma alteração correspondente na corrente de fuga que, em teoria, se poderia utilizar para a detecção da alteração ocorrida na impedância.

Entretanto, um dos obstáculos que se encontra para a detecção conforme descrito acima é a ordem de grandeza das alterações que se deseja monitorar. Alterações tão pequenas quanto um incremento algébrico de 0,3% no fator de dissipação [1] de uma bucha podem representar a diferença entre uma bucha nova, em boas condições, e uma bucha no limite do aceitável. Fica evidente que uma alteração tão pequena no fator de dissipação provocará uma alteração praticamente insignificante na corrente de fuga da bucha, tornando inviável sua detecção por meio da monitoração apenas da corrente de fuga de cada bucha.

Uma das técnicas que permite superar a limitação prática citada é a utilização da soma vetorial da corrente de fuga das três buchas em um sistema trifásico. Em um arranjo como este, as três correntes de fuga estão defasadas entre si em aproximadamente 120° elétricos e, normalmente, tem a mesma ordem de magnitude pois as três buchas têm capacitâncias, em princípio, semelhantes e as tensões das três fases estão próximas do equilíbrio. Com isso, a somatória das três correntes de fuga tende a um valor menor que cada uma das correntes de fuga tomadas individualmente, como ilustrado na Figura 5a para uma dada condição inicial de capacitâncias e fatores de dissipação.

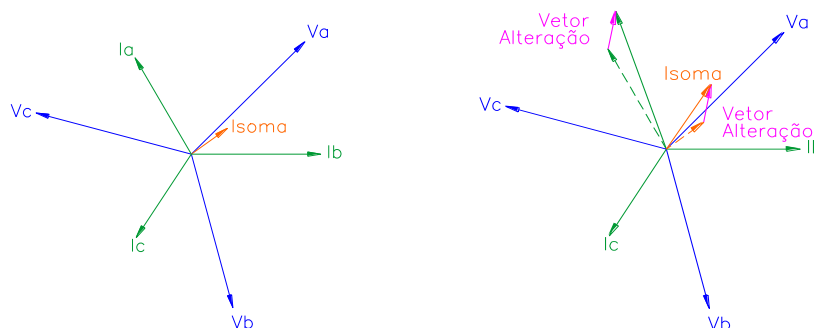


Figura 5 – Correntes de fuga de três buchas em um sistema trifásico e sua somatória: (a) Para uma dada condição inicial. (b) Com alteração na capacitância e fator de dissipação da bucha da fase A.

Supondo agora que ocorra uma alteração na capacitância e no fator de dissipação da bucha da fase A, como mostrado na figura 5b, o vetor alteração ( $\Delta I$ ), que expressa o deslocamento da corrente  $I_a$  de seu valor inicial até seu valor final, se reflete também na corrente somatória que é alterada, em relação a seu valor inicial, segundo o mesmo vetor alteração ( $\Delta I$ ).

$$\Delta I = I_a(\text{atual}) - I_a(\text{anterior}) = I_{\text{soma}}(\text{atual}) - I_{\text{soma}}(\text{anterior})$$

Este vetor alteração tem peso praticamente insignificante quando comparado à magnitude da corrente de fuga da fase A. Porém o mesmo não ocorre quando este vetor é comparado à corrente somatória, o que permite sua detecção e, por conseguinte, a detecção da alteração ocorrida na impedância da bucha em questão.

Pelo exposto acima, observam-se algumas características intrínsecas ao método utilizado:

- É necessária a determinação de uma referência inicial de correntes para o sistema, para em seguida compará-la às novas medições on-line, de forma a determinar as alterações ocorridas na capacitância e no fator de dissipação das buchas;
- Não é efetuada a medição dos valores absolutos de capacitância e tangente delta das buchas, mas sim a medição das variações ocorridas nestes parâmetros. Porém, uma vez que sejam conhecidos os valores iniciais de capacitância e tangente delta de cada bucha (valores presentes no momento em que é determinada a referência inicial de correntes), a medição das variações ocorridas permite conhecer os valores atuais de capacitância e tangente delta;
- No caso de buchas novas, podem ser utilizados como valores iniciais de capacitância e tangente delta dos valores de placa determinados pelo fabricante das buchas. Porém para buchas já em operação é recomendável que, na instalação do sistema de monitoramento on-line, seja efetuada a medição destes parâmetros através de métodos convencionais, com as buchas desenergizadas. Com isso se garante que estão sendo utilizados, pelo sistema de monitoramento, valores iniciais corretos.

### III – O MONITORAMENTO ON-LINE DE BUCHAS APLICADO ÀS BUCHAS HVDC

O processo de conversão AC/DC é, inevitavelmente, acompanhado dos efeitos da geração de harmônicos, sendo, os de ordem ímpar gerados no lado AC e os de ordem par gerados no lado DC. Como consequência, a forma de onda das correntes de fuga que aparecem nas buchas  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  e  $X_4$  dos transformadores conversores possuem o aspecto ilustrado pela figura 6:

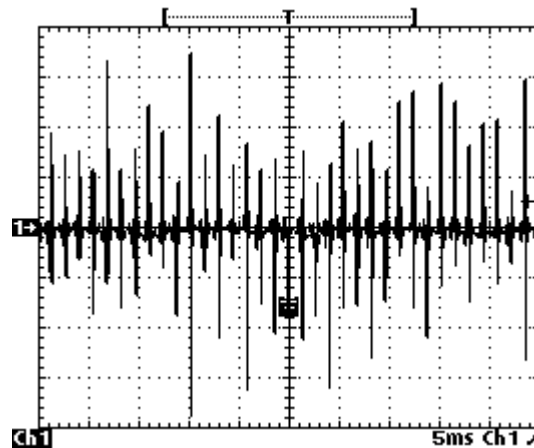


Figura 6: Forma de onda das correntes de fuga nas buchas  $X_1$ ,  $X_2$ ,  $X_3$  e  $X_4$

Tal fato impossibilita a aplicação direta, em buchas HVDC, do sistema de monitoramento com os mesmos recursos de software e hardware utilizados no monitoramento de buchas AC, descritos no item II.

A título de experiência, num primeiro momento o sistema de monitoramento utilizado para as buchas AC foi aplicado diretamente nas buchas HVDC, com o objetivo de se observar o seu comportamento e colher dados para embasar o desenvolvimento do sistema específico para HVDC. Como já era esperado, o sistema de monitoração de buchas AC não apresenta funcionamento satisfatório em buchas HVDC.

Em função disso, posteriormente foi realizada uma alteração no software de aquisição de dados e no firmware do sistema de monitoração, porém constatou-se a necessidade de alterações especiais também no hardware dos equipamentos para permitir que os mesmos fizessem a correta leitura da corrente de fuga e cálculos de capacitância e tangente delta.

Finalmente, junto com a alteração no software de aquisição de dados, foi realizado também uma alteração no hardware. Tais alterações permitiram que o sistema de monitoramento fizesse, corretamente, a aquisição e interpretação do sinal (corrente de fuga) advindo do tap da bucha.

### IV – SEGURANÇA DO SISTEMA DE MONITORAMENTO ON-LINE

Como foi exposto no item II.2, as correntes de fuga e a corrente somatória são influenciadas não apenas pelas mudanças na capacitância e tangente delta das buchas, mas também por alterações nas tensões fase-terra em cada bucha. Esta influência é eliminada por meio de tratamentos matemáticos e estatísticos realizados nas medições, razão pela qual o processo de determinação da referência inicial de correntes é efetuado num período de tempo ajustável de 1 a 7 dias após o início de operação do sistema de monitoramento. Já o processo de medição das alterações ocorridas, pelas mesmas razões, tem uma constante de tempo de resposta da mesma magnitude.

A construção física da bucha dá origem a um divisor de tensão capacitivo, como demonstrado anteriormente, sendo a porção inferior deste divisor normalmente curto-circuitada, aterrando o tap da bucha de modo que a tensão deste em relação ao terra é de zero Volt. Para que seja possível a medição da corrente de fuga da bucha este aterramento passa a ser efetuado



pelo circuito de medição da corrente de fuga. Devido à baixa impedância deste circuito, a tensão do tap em relação ao terra permanece próxima de zero. No entanto, em caso de interrupção acidental do circuito de medição, o divisor de tensão capacitivo geraria uma tensão no tap da bucha que normalmente é superior à rigidez dielétrica do tap em relação ao terra, com riscos de danos à bucha. Para evitar esta ocorrência, o adaptador de conexão ao tap da bucha está provido de dois dispositivos limitadores de tensões, conectados em paralelo, em uma configuração redundante. Estes dispositivos entram em condução em caso de abertura do circuito de medição, constituindo um caminho de baixa impedância para a corrente de fuga, de forma que a tensão do tap em relação ao terra permaneça em poucos Volt. Os dispositivos limitadores de tensão não estão suscetíveis a desgastes de natureza elétrica ou mecânica, o que permite que cada um deles, separadamente, conduza por tempo indeterminado, no mínimo, 2,5 vezes a máxima corrente de fuga encontrada nos diversos modelos de buchas existentes.

Além disso, os dispositivos limitadores de tensão atuam como proteções contra as sobrecorrentes e sobretensões que se desenvolvem no tap da bucha quando da ocorrência de sobretensões transitórias no sistema elétrico. Isso permite também que todos os ensaios dielétricos (por exemplo, tensões de impulso) sejam realizados nas buchas já com o sistema de monitoramento on-line conectado e em operação.

## V – INSTALAÇÃO

O sistema de monitoração de buchas empregado tem concepção modular, sendo constituído de 3 partes básicas:

- Adaptadores para tap – provêm a conexão elétrica aos taps das buchas, garantindo também sua vedação contra intempéries. Incorpora as proteções redundantes contra abertura acidental do circuito de medição, evitando que o tap permaneça em aberto. A figura 7 ilustra a instalação dos adaptadores de tap nas buchas dos transformadores conversores.



Figura 7: Instalação do adaptador de tap

- Módulos de Medição – recebem as correntes de fuga de três buchas de um conjunto trifásico, efetuam as medições destas correntes e seu processamento matemático e estatístico, disponibilizando para o módulo de interface os valores atuais de capacitância e tangente delta através de uma porta de comunicação serial. A figura 8 ilustra a instalação dos módulos de medição no painel de monitoração dos transformadores.



Figura 8: Instalação dos módulos de medição



- Módulo de Interface – recebe as informações dos módulos de medição e as disponibiliza de forma local em seu display e remotamente através de contatos de saída para alarme, saídas analógicas (mA) e portas de comunicação serial. Opcionalmente, o módulo de interface pode ser conectado também à rede Intranet da empresa para acesso remoto às medições. A figura 9 ilustra a instalação dos módulos de interface no painel de monitoração dos transformadores, sendo que um módulo se encarrega das buchas  $H_1$ ,  $X_1$  e  $X_2$  e o outro módulo das buchas  $X_3$  e  $X_4$ .



Figura 9: Instalação dos módulo de interface

Na subestação de Ibiúna estão sendo monitoradas seis buchas GOE 1950, seis buchas GOE 1425 e três buchas GOE 1175.

Dois módulos de interface e cinco módulos de medição foram empregados para realizarem o monitoramento dos transformadores do conversor 4, da SE Ibiúna. Esses módulos foram instalado no painel individual do transformador ZM.1.C. Os dados aquisitados pelos módulos de medição são enviados para um servidor, onde se encontra instalado o software de monitoramento, através de uma comunicação sem fio tipo Wi-Fi.

## VI - CONCLUSÃO

Até onde sabemos, a aplicação deste sistema de monitoramento on-line em buchas HVDC é pioneira. Este artigo demonstrou o princípio de funcionamento que permite a monitoração on-line dessas buchas, assim como a experiência da aplicação desse sistema às buchas dos transformadores conversores da subestação de Ibiúna. Atualmente o sistema de monitoração descrito encontra-se em operação, monitorando de forma bem-sucedida as buchas  $H_1$  (345kV AC) e  $X_1$  (+600kV DC) do conversor 4. Encontram-se em fase de implantação as adequações de hardware, firmware e software específicas para a monitoração de buchas HVDC, conforme já descrito, para as buchas  $X_2$ ,  $X_3$  e  $X_4$ .

Tendo em visto o pioneirismo desse sistema, sabemos que o mesmo ainda passará por melhorias e que, com certeza, trará benefícios como:

- Redução dos riscos de falhas dos equipamentos.
- Redução ou eliminação dos ensaios off-line realizados em buchas.
- Aumento de disponibilidade dos transformadores para o sistema elétrico pela redução das paradas para manutenção preventiva.
- Redução dos custos de manutenção.

## VII - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Alves, Marcos; Melo, Marcos, “Experiência com Monitoração On-Line de Capacitância e Tangente Delta de Buchas Condensivas”, XIX SNPTEE, Outubro/2007.

(2) The Institute of Electrical and Electronic Engineers, ANSI/IEEE Std C57.19.100-1995, “IEEE Guide for Application of Power Apparatus Bushings”, Março/1995.

(3) Alves, Marcos, “Sistema de Monitoração On-Line de Buchas Condensivas”, Revista Eletricidade Moderna, Abril/2005.

(4) Alves, Marcos; Zanetta, Luis, “Monitoração do Envelhecimento Térmico em Buchas Condensivas Isoladas com Papel Impregnado com Óleo”, X SEPOPE, Maio/2006.

(5) Alves, Marcos, “Sistema de Monitoração On-Line de Transformadores de Potência”, Revista Eletricidade Moderna, Maio/2004.



## VIII - DADOS BIOGRÁFICOS

Edilson Gonzaga Peres – Nascido em Lorena, SP, em 03 de janeiro de 1974, trabalha com Furnas Centrais Elétricas desde 2004. Engenheiro de manutenção eletromecânica da subestação de Ibiúna, formou-se Engenheiro Elétrico em 1999 pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI).

Marcos E. Guerra Alves - Nascido no Rio de Janeiro, RJ, em 15 de julho de 1975, trabalha com a Treetech Sistemas Digitais desde 1992. Especializado em sistemas de controle e monitoramento de transformadores de potência, é gerente do departamento de Pesquisas e Desenvolvidimentos. Formou-se Engenheiro Elétrico em 2001 pela Universidade São Judas Tadeu, São Paulo, e em 2005 concluiu o seu Mestrado na área de Energia e Automação da Universidade de São Paulo (USP).