Sinalizador Luminoso Monofásico de Faltas para Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica até 69 kV.

Josemir Coelho Santos, *PEA-USP;* André Luis Trevisan Nogueira, *CPFL;* Josué de Camargo, Marlos Mazzeu Silveira, Fábio José de Andrade, *EXPERTISE ENG.*

***Resumo*—O objetivo deste trabalho é apresentar um equipamento Sinalizador Luminoso Monofásico de Faltas para Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica até 69 kV, desenvolvido pela Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), em parceria com o Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Universidade de São Paulo (PEA-USP) e a Expertise Engenharia, de Campinas, no programa ANEEL de Pesquisa e Desenvolvimento. O equipamento conta com funcionalidade de ajuste automático à corrente de carregamento da linha, imunidade às correntes de magnetização de transformadores, sinalização luminosa em 360º ao redor do equipamento, gabinete inovador com sistema de fixação prático e seguro através de grampo rosqueável e vida útil de 10 anos sem necessidade de manutenção. A eletrônica do sinalizador foi integrada em um chip proprietário misto, com partes analógica e digital, para aquisição dos sinais dos sensores de tensão e corrente e para realização da lógica de detecção da falta, respectivamente.**

***Palavras Chaves*—Sinalização de Faltas; Detecção de Faltas; Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica; Corrente de Curto-Circuito; Monitoramento de Redes de Distribuição.**

I. Introdução

ATUALMENTE é uma preocupação constante das concessionárias de distribuição de energia elétrica a manutenção dos indicadores da qualidade dos serviços prestados sempre dentro dos níveis recomendados pelo órgão regulador do setor elétrico brasileiro, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Existem pelo menos três desses indicadores que podem ser melhorados diretamente com a simples diminuição do tempo de restabelecimento do fornecimento, depois de ocorrido um desligamento de tensão provocado por um defeito permanente em determinada linha de distribuição de energia elétrica. São eles o TMA (Tempo Médio de Atendimento), o DIC (Duração de Interrupção por Unidade Consumidora) e o DMIC (Duração Máxima de Interrupção por Unidade Consumidora). Usualmente, o fator determinante do tempo de restabelecimento da linha de distribuição defeituosa é o tempo gasto pela equipe de eletricistas de campo da concessionária para localizar o defeito. Em linhas de distribuição que não são equipadas com indicadores de falta, os eletricistas se guiam pelos equipamentos de proteção da rede para saber onde a energia foi desligada. O ponto exato do defeito é localizado visualmente, exigindo muitas vezes que a equipe percorra toda a extensão dos diferentes ramos do alimentador. Isso não ocorre quando são utilizados sinalizadores de faltas, que indicam para a equipe o caminho percorrido pela corrente de falta a partir da subestação ou do equipamento de proteção trifásico que atuou na ocasião do defeito, desenergizando a linha, conforme a Fig. 1 abaixo:

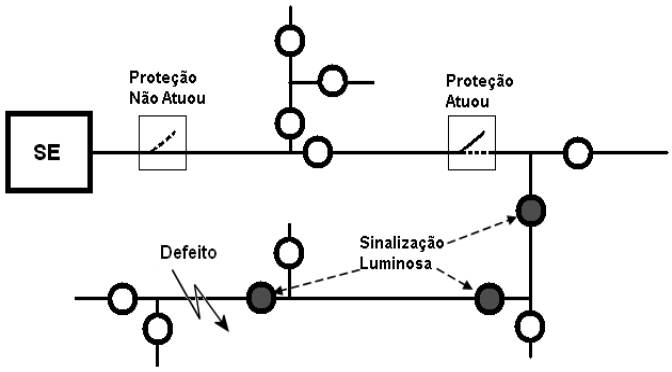

Fig. 1. Localização do defeito através dos sinalizadores luminosos de faltas.

Percorrer o alimentador apenas nos locais por onde passou a corrente de defeito, até o local exato da falta economiza muito tempo, principalmente em alimentadores longos e muito ramificados. Menor tempo para localização do ponto do defeito significa menor tempo de restabelecimento do fornecimento de energia elétrica, com conseqüente

O projeto de Pesquisa e Desenvolvimento que gerou este equipamento foi financiado, através da Companhia Paulista de Força e Luz (CPFL), pelo programa de P&D do setor elétrico brasileiro, que é regulamentado pela Agência Nacional de Energia Elétrica, ANEEL.

J. C. Santos é Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade de Tóquio e é Professor do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Brasil (e-mail: josemir@pea.usp.br).

A. L. T. Nogueira é Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Itajubá e atua como Engenheiro de Proteção na Companhia Paulista de Força e Luz (e-mail: andre@cpfl.com.br).

J. de Camargo é Engenheiro Eletricista pela Universidade Estadual de Campinas e é Sócio Diretor da Expertise Engenharia. (e-mail: josue@expertise-eng.com.br).

M. M. Silveira é Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá e atua como Engenheiro Pesquisador na Expertise Engenharia (e-mail: marlos@expertise-eng.com.br).

F. J. de Andrade é Engenheiro Eletricista pela Universidade Estadual de Campinas e atua como Engenheiro Pesquisador na Expertise Engenharia (e-mail: fabio@expertise-eng.com.br).

melhora dos indicadores de prestação de serviço da concessionária que adotou a utilização de sinalizadores em suas redes de distribuição.

Para que a sinalização da falta seja confiável, o equipamento sinalizador deve ter a habilidade de monitorar a tensão do alimentador e possuir o mínimo de "inteligência" para identificar as sobrecorrentes causadas por curto-circuitos, ignorando as sobrecorrentes momentâneas causadas pelo efeito da magnetização de transformadores (*in-rush*), além de se adaptar automaticamente à variação de carregamento da linha de distribuição que está sendo monitorada (*di/dt*).

Para que o sinalizador tenha boa aceitação entre os eletricistas da manutenção, deve ser de fácil instalação e manutenção (idealmente possuir manutenção zero). Para que seja bem aceito pela concessionária deve ter um baixo custo de aquisição e manutenção, permitindo sua instalação em larga escala na rede de distribuição e assim influenciando positivamente nos indicadores da qualidade do serviço prestado.

O sinalizador de faltas desenvolvido durante o projeto que gerou este trabalho, buscou alcançar todos esses objetivos.

II. Detecção da Falta Permanente na Linha de Distribuição

O objetivo primário do equipamento sinalizador faltas desenvolvido é detectar a passagem de uma corrente de curto-circuito no ponto de instalação, com conseqüente queda da tensão no alimentador monitorado, causada por atuação de equipamento trifásico de proteção da rede de distribuição de energia elétrica. Esta seqüência é ilustrada na Fig. 2 abaixo. Esta, de fato, é a definição de "falta permanente e interrompida por equipamento de proteção da linha".

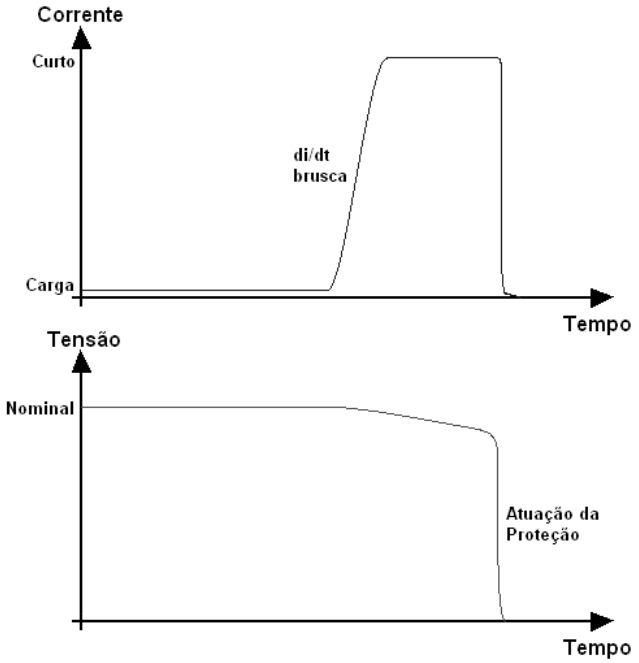

Fig. 2. Definição de "falta permanente e interrompida por equipamento de proteção da linha".

Portanto, é primordial para o equipamento em questão monitorar a variação instantânea do nível de corrente no ponto de instalação, além da presença ou ausência de tensão nessa linha. Por se tratar de um equipamento monofásico, as medições associadas à corrente e à tensão são feitas independentemente em cada uma das três fases dos pontos de instalação dos sinalizadores. Faltas monofásicas ou bifásicas serão sinalizadas por apenas um ou dois equipamentos, dependendo do tipo da falta ocorrida.

Existem fatores que podem interferir na correta detecção de uma falta, tais como: inadequação no ajuste do limiar de corrente mínima a ser considerada como causada por defeito e ocorrências de correntes transitórias de valor elevado que não causam desligamentos de equipamentos de proteção.

Equipamentos sinalizadores mais antigos, que podem ser encontrados até hoje instalados em linhas de transmissão e distribuição elétricas brasileiras, eram disparados por um limiar fixo ("*trigger*") de corrente que acionava um elemento eletro-mecânico, que por sua vez alterava a posição de uma bandeirola que indicava a falta. Assim, pelo simples fato da corrente no alimentador ultrapassar um determinado valor pré-ajustado, era sinalizada uma falta. Apesar de haverem diversas unidades desse tipo de equipamento ainda instaladas, suas indicações não são levadas em consideração pelas equipes de manutenção da rede de energia, pois, com o passar dos anos, o carregamento médio da maioria dos alimentadores subiu consideravelmente, ultrapassando o inclusive o "*trigger*" de corrente de muitos desses equipamentos, que, dessa forma, permanecem constantemente sinalizando faltas inexistentes.

Ocorrências de correntes transitórias, como as causadas pelo fenômeno do "*In-rush*" (que se traduz numa alta corrente momentânea solicitada para magnetizar os núcleos dos transformadores, por exemplo, na ocasião do religamento da tensão na linha de distribuição) também pode causar a sinalização de uma falta inexistente. Apesar de ocorrer por um período muito curto de tempo, seu nível de corrente é alto o suficiente para ser confundido com uma corrente de curto-circuito. Como isto ocorre no momento de religamento da linha, os níveis de tensão estão abaixo de seus valores normais quando da passagem da corrente de "*In-rush"*. Portanto, um pico de corrente associado a uma tensão baixa pode facilmente ser confundido com uma falta permanente, como explicado anteriormente.

Para que seja feita a correta detecção da falta permanente, sem que a mudança do carregamento da linha ou o fenômeno do "*In-rush"* cause a indicação de uma falta inexistente, características construtivas e funcionais foram implementadas no sinalizador de faltas descrito neste trabalho.

A. Detector de Tensão

Para que o equipamento possa diferenciar um aumento brusco do carregamento do alimentador monitorado de uma ocorrência de curto-circuito, é importante saber o estado da tensão nesse alimentador.

A informação necessária sobre o estado da tensão na fase do alimentador é um único dado binário, ou seja, "presente" ou "ausente". Se for detectada tensão na fase após a ocorrência de uma sobrecorrente, certamente não ocorreu uma falta permanente. Variações de corrente, nestes casos, devem ser consideradas como variações de carregamento. A mudança do estado da tensão na fase para "ausente" pode indicar a ocorrência de uma falta, caso aconteça dentro de um intervalo de tempo pré-definido após a detecção de um evento de sobre-corrente, pois indica que um equipamento de proteção atuou interrompendo a alimentação em função da sobrecorrente anteriormente detectada. Neste caso, a ausência de tensão que ocorre imediatamente após uma sobrecorrente é o "*trigger"* para que o equipamento inicie a sinalização luminosa.

O detector de tensão do equipamento sinalizador desenvolvido tem como sinal de entrada a diferença de potencial entre o sensor de tensão (uma placa de cobre posicionada próxima ao cabo da linha de distribuição) e o gabinete do circuito eletrônico, constituído por uma caixa metálica que protege mecanicamente e faz a blindagem eletromagnética da placa de circuito impresso (PCI). O sensor de tensão no equipamento desenvolvido funciona através de efeito capacitivo. Uma rede de capacitâncias parasitas existentes entre a linha e o solo, entre o sensor de tensão e a caixa metálica da PCI, entre a linha e a caixa metálica da PCI, entre a linha e o sensor de tensão e entre a caixa metálica da PCI e o solo, tornam possível a detecção da tensão pelo equipamento sinalizador.

O detector de tensão compara o nível de tensão do sensor, com um nível DC interno de referência. Caso o nível do sensor seja o maior, considera-se a presença de tensão na rede.

O circuito detector de tensão é baseado em amplificadores operacionais que são variações do tipo OTA (Operational Transconductance Amplifier).

Um amplificador operacional no detector de tensão, faz o papel de comparador, entre o sinal proveniente do sensor de tensão e uma tensão de referência fixa, gerada a partir da própria fonte de alimentação.

B. Detector de Sobrecorrente

Da mesma forma que o circuito detector de tensão, o detector de sobrecorrente fornece à lógica digital do equipamento um único dado binário, indicando a ocorrência instantânea de uma sobrecorrente ou não.

A detecção de sobrecorrente pelo sinalizador de faltas é baseada na variação da corrente (di/dt) medida por um sensor indutivo acoplado à linha de distribuição que está sendo monitorada. Para tanto, o bloco de detecção de sobrecorrente do sinalizador conta com um comparador, também baseado em amplificadores operacionais derivados dos amplificadores OTA, que constantemente compara a tensão instantânea proveniente do sensor indutivo da corrente, escalada para baixo, com uma tensão de referência. Essa tensão de referência é proporcional ao valor médio de meia-onda da tensão instantânea proveniente do sensor indutivo da corrente, obtido por meio de um circuito RC com uma constante de tempo adequada.

Como a corrente instantânea da linha de distribuição monitorada é comparada a todo instante com um valor médio da tensão proveniente do sensor indutivo da corrente, tem-se um ajuste automático do equipamento sinalizador à corrente de carga da linha de distribuição, pois mudanças no carregamento influenciam diretamente na média da tensão do sensor indutivo, que é utilizada como referência no comparador do detector de sobrecorrente. O equipamento é ajustado para que seja indicada a sobrecorrente quando a corrente instantânea ultrapassar um certo número de vezes o valor da corrente média em determinado instante, conforme resultado de simulação indicado na Fig. 3 abaixo:

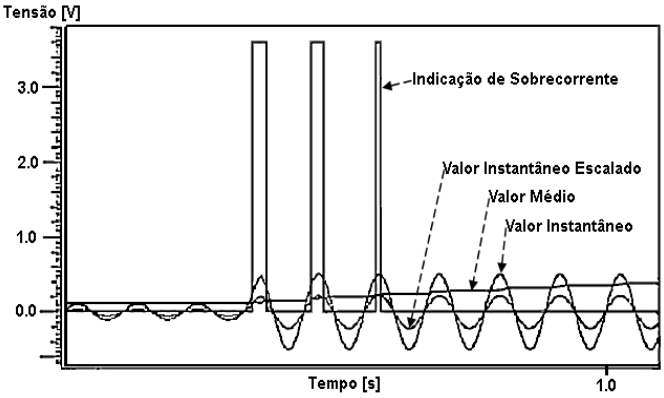

Fig. 3. Simulação do bloco analógico Detector de Sobre-Corrente do sinalizador de faltas.

C. Função Anti "In-rush"

A imunidade do equipamento ao fenômeno do "*In-rush"* das linhas de distribuição de energia elétrica é implementado em um bloco lógico digital do sinalizador. Para que o risco de sinalização errônea na ato do religamento da linha seja anulado, foi implementado um inibidor de detecção de falta comandado por um temporizador.

Quando é detectada ausência de tensão na linha monitorada, sem a precedência de um evento de sobrecorrente, a detecção de falta e sinalização luminosa são automaticamente inibidas. Quando ocorre o retorno da tensão na linha, é disparado o temporizador do *Anti "In-rush"*. Findado o tempo programado, é habilitada novamente a detecção da falta.

O tempo programado nesse temporizador é maior do que o período em que ocorre o fenômeno de "*In-rush"* nas linhas de distribuição. Quando a detecção e sinalização de faltas é reabilitada, não há mais a ocorrência desse fenômeno.

Estudos e levantamentos feitos pelos engenheiros da CPFL indicaram que 300 ms é tempo suficiente para que sejam evitadas as correntes de magnetização dos transformadores. Esse foi então o período adotado para a atuação do temporizador que inibe a detecção da falta na ocasião do retorno da tensão na linha de distribuição monitorada.

III. Gabinete e Sistema de Fixação

O gabinete do sinalizador luminoso de faltas desenvolvido levou em consideração, desde suas concepções iniciais, as opiniões e o *know-how* dos eletricistas de campo da CPFL sobre equipamentos destinados à instalação nos cabos das redes de distribuição. As premissas básicas, impostas pela própria equipe do projeto, eram as de que o equipamento deveria ser o mais leve possível e possibilitar a instalação com ferramentas normalmente utilizadas pelas equipes de manutenção de campo das diferentes concessionárias de energia elétrica.

Os eletricistas indicaram que um bom modelo a ser seguido era o da garra de linha viva, que se utiliza de um grampo rosqueável e pode ser instalada com um simples bastão isolado equipado com um gancho que se abre e se fecha pelo comando do eletricista, do tipo conhecido no meio como "*bastão pega-tudo*".

A sinalização luminosa, feita por 6 LEDs de alto-briho, foi disposta a redor da haste rosqueada central, na parte inferior do equipamento.

A haste conta com uma olhal, no qual se encaixa perfeitamente o "bastão pega-tudo" utilizado pelos eletricistas.

O gabinete foi confeccionado em plástico injetado, e possui estabilizantes Anti Ultra-Violeta, uma vez que é destinado a instalação em ambientes externos. A vedação é feita de tal maneira que impede a entrada de água ou umidade dentro do dispositivo. A cor preta favorece a visualização do equipamento e da sinalização luminosa contra o sol e céu claro.

O gabinete completo, com seu sistema de fixação e disposição dos LEDs, pode ser visto na Fig. 4 abaixo:

Fig. 4. Gabinete plástico do sinalizador luminoso de faltas, com sistema de fixação por grampo rosqueável, corpo na cor preta e com aditivo Anti-UV.

IV. Diminuição do Custo de Fabricação e Manutenção

Algumas características funcionais e construtivas foram projetadas de maneira a diminuir ao máximo o custo de fabricação e o custo de manutenção dos sinalizadores, já pensando numa escala de produção de centenas ou milhares de sinalizadores por mês.

Para permitir a produção do gabinete em larga escala e baixo custo, foram feitos moldes de injeção das diferentes peças do equipamento. A matéria prima utilizada na injeção (plástico ABS) atende perfeitamente os requisitos de robustez e durabilidade do projeto, além de ser empregada em larga escala para injeção de diferentes peças amplamente utilizadas no dia-a-dia, inclusive peças automotivas. Por isso, possui custo acessível.

A eletrônica do sinalizador foi integrada em um Circuito Integrado proprietário misto (analógico e digital). Isso permitiu a redução do consumo quiescente de corrente a níveis bastante baixos (dezenas de μA).

O CI do sinalizador de faltas foi montado na placa de circuito impresso do sinalizador através do processo COB ("*Chip On-Board"*), ilustrado na Fig. 5 abaixo. Apesar desse processo requerer acabamento especial na placa de circuito impresso, e demandar mão de obra especializada para soldagem microscópica do componente na PCI dentro de uma câmara limpa, os custos ainda são menores se comparados com o custo de encapsulamento em uma cápsula do tipo DIP-18, por exemplo.

Fig. 5. Circuito Integrado do Sinalizador de Faltas montado através do sistema COB na Placa de Circuito Impresso.

O baixo consumo de corrente, aliado à utilização de uma bateria de "*Lithium Thionyl Chloride"*, com carga de 6500 mAh e capacidade de fornecer corrente pulsada de 1500 mA, permitem que o equipamento possua autonomia suficiente para funcionar por 10 anos instalado na linha de distribuição sem necessitar de manutenção ou troca de bateria. A vida útil do gabinete também está estimada em 10 anos.

Por essas razões, o custo de manutenção do equipamento sinalizador tende a zero, pois, terminada a vida útil do sinalizador, seu custo deverá estar completamente amortizado e ele poderá ser substituído por um equipamento novo.

Espera-se que o baixo custo de produção implique num preço de venda suficientemente reduzido para permitir que a substituição do equipamento seja mais atrativa que sua manutenção.

V. Conclusão

O Sinalizador Luminoso Monofásico de Faltas para Redes Aéreas de Distribuição de Energia Elétrica até 69 kV desenvolvido conseguiu atingir o que se acredita serem os requisitos mínimos fundamentais para equipamentos desse tipo, ou seja, funcionalidades e inteligência que garantem a correta detecção de faltas, a facilidade de instalação e o baixo custo de aquisição para a concessionária (se comparados com similares importados de outros países).

O equipamento desenvolvido ainda excede o esperado no quesito manutenção, pois pode operar na linha de distribuição por até 10 anos consecutivos, sem a necessidade de manutenções periódicas para substituição de baterias.

Estão sendo realizados testes de campo com o equipamento Sinalizador Luminoso. Estes testes ainda se restringem a alguns pontos críticos da rede de distribuição de 11,9 kV da CPFL Paulista, na cidade de Campinas/SP, e alguns pontos na rede de distribuição de 25kV, da CPFL Piratininga, em Sorocaba/SP.

Já ocorreu uma atuação bem sucedida de sinalização de falta em um ponto da rede de distribuição de energia elétrica em Campinas, que auxiliou a equipe de manutenção a encontrar o defeito e restabelecer a energia em um espaço de tempo mais curto que o usual. Não houveram notícias de equipamentos com funcionamento errático ou que apresentaram falsa sinalização até o momento. Entretanto, o evento de falta permanente e sustentada por equipamento de proteção é imprevisível e não pode ser provocado deliberadamente na rede de distribuição. Por isso, os testes de campo se estenderão por um período de tempo mais longo, aumentando a possibilidade da detecção de outras faltas em outros pontos de instalação dos equipamentos. Oportunamente, resultados mais expressivos destes testes de campo serão divulgados.

VI. Biografias

Josemir Coelho Santos nasceu em São Paulo/SP, Brasil, em 23 de março de 1961. Ele foi graduado Engenheiro Eletricista na Universidade de São Paulo, Brasil (1988), Mestre em Engenharia Elétrica na Universidade de São Paulo, Brasil (1993), e obteve Doutorado em Engenharia Elétrica na Universidade de Tóquio, Japão (1997). É Professor do Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo em regime de dedicação integral desde 1990, onde coordena o Laboratório de Sensores Ópticos e atua em diversos projetos de Pesquisa e Desenvolvimento.

André Luis Trevisan Nogueira nasceu em Campinas/SP, Brasil, em 12 de outubro de 1975. Ele foi graduado Engenheiro Eletricista na Universidade Federal de Itajubá, Brasil (2000). É Engenheiro de Proteção da Companhia Paulista de Força e Luz. Atua como Pesquisador e como Gerente de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento da CPFL desde 2003.

Josué de Camargo nasceu em São Paulo/SP, Brasil, em 28 de Abril de 1958. Ele foi graduado Engenheiro Eletricista na Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP – Brasil (1981) e Engenheiro Civil na Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Brasil (1991). Atua e desenvolve diversos trabalhos na área de Qualidade da Energia Elétrica. É Diretor da Expertise Engenharia Ltda., empresa especializada em prestação de serviços de Qualidade de Energia Elétrica para indústrias e em Projetos de Pesquisa e Desenvolvimento para o setor de Energia Elétrica brasileiro.

Marlos Mazzeu Silveira nasceu em Paraguaçu/MG, Brasil, em 12 de maio de 1973. Ele foi graduado Engenheiro Mecânico na Faculdade de Engenharia de Varginha, Brasil (1994) e Mestre em Engenharia Mecânica na Universidade Federal de Itajubá, Brasil (2001). É Engenheiro Pesquisador da Expertise Engenharia e atua em projetos de Pesquisa e Desenvolvimento do setor elétrico brasileiro desde 2002.

Fábio José de Andrade nasceu em São Paulo/SP, Brasil, em 16 de Junho de 1980. Ele foi graduado Engenheiro Eletricista na Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP – Brasil (2005). É Engenheiro Pesquisador da Expertise Engenharia e atua em projetos de Pesquisa e Desenvolvimento do setor elétrico brasileiro desde 2005. É responsável pelo registro e acompanhamento dos processos de propriedade industrial dos projetos de pesquisa com participação da Expertise Engenharia.