

Methodology for Load Correction per Phase in Distribution Systems using Smart Metering Data

Guilherme Pereira Borges, Fabio Romero, Marcello Pek Di Salvo, André Meffe, Alden Uehara Antunes e Jarbas Barros Vilar

Abstract – One of the main problem in distribution networks management is the lack of real time measurement data. However, with the advent of Smart Grid concept it becomes possible to obtain real time electric data from the feeders to improve the network state estimation. The aim of this paper is to present a new methodology which uses current and power measurements at specific points along the feeder to improve estimation of these values throughout it. Such data are of great utility to management and operation of feeders, mainly to evaluate the need to expand the system, in addition to assist in the evaluation of technical and non-technical losses.

Index Terms — Distribution Systems, Load Correction, Load Flow, Smart Grid, Smart Metering, State Estimation.

I. INTRODUÇÃO

NA última década, em virtude do grande avanço no que diz respeito à adoção de grandes sistemas de banco de dados corporativos nas empresas distribuidoras de energia, tornou-se possível viabilizar um gerenciamento mais detalhado da rede de distribuição, tanto no que tange a evolução topológica quanto no detalhamento dos dados de consumo e demanda dos clientes.

Neste sentido, destaca-se a necessidade da adoção de um modelo de fluxo de potência mais sofisticado e compatível com a maior disponibilidade de informações provenientes do Smart Grid, sendo este fundamental em diversas atividades estratégicas das distribuidoras, tais como análises de planejamento de expansão, avaliação do desempenho técnico da rede, proteção de sistemas de distribuição, estudos de novas conexões à rede elétrica, entre outros.

O conceito Smart Grid advém de um conjunto de diversos dispositivos, como medidores, sensores, controladores e equipamentos microprocessados instalados nos sistemas

elétricos e que se comunicam através de sistemas de telecomunicação. Tais equipamentos somam-se à infraestrutura de rede elétrica com o objetivo de gerenciar, monitorar e supervisionar este sistema.

Aproveitando o avanço no que tange a integração entre as redes de energia elétrica, tecnologias digitais, comunicações e controles e os incentivos do governo brasileiro para que as distribuidoras invistam no conceito de Smart Grid, a CELPE (Companhia Energética de Pernambuco) em parceria com a Daimon Engenharia e Sistemas estão desenvolvendo um projeto de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) que objetiva, dentre outros tópicos, desenvolver uma nova metodologia para cálculo de correção de demanda por fase em sistemas de distribuição de média tensão, levando em conta os dados elétricos medidos ao longo do alimentador através de medidores inteligentes.

Com mais de 3,1 milhões de clientes, a CELPE fornece energia elétrica a mais de 184 municípios do Estado de Pernambuco. Para continuar entre as melhores distribuidoras do Brasil (de acordo com o ranking da continuidade do serviço em 2011 publicado pela ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica), a CELPE se mantém atualizada com novas tecnologias de comunicação, distribuição e manutenção, contribuindo para elevar os índices de qualidade no fornecimento de energia elétrica.

A rede elétrica “inteligente” é capaz de executar continuamente o seu próprio diagnóstico, podendo estabelecer condições adequadas de balanço de suas cargas, analisando, localizando e respondendo em tempo real às necessidades das condições de operação do sistema, sendo capaz de adequar ou restabelecer os componentes de rede ou das áreas afetadas por alguma condição incomum utilizando o mínimo de intervenção humana e, portanto, contribuindo para manter a confiabilidade, a segurança, a qualidade da energia e a eficiência da rede elétrica.

Essas informações de monitoramento podem ser de grande utilidade para a operação do sistema. Entretanto, pelo fato do Smart Grid ser um conceito recente se faz necessário desenvolver maneiras para utilizar esses novos dados agora disponíveis. Neste artigo é proposto um novo método de correção de demanda nas redes de distribuição de energia elétrica que emprega os dados coletados de medidores instalados em pontos estratégicos para aprimorar seus resultados.

Este trabalho foi financiado pela Companhia Energética de Pernambuco (CELPE) e faz parte do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica do Brasil (ANEEL).

G. P. Borges, F. Romero, M. P. Di Salvo, A. Meffe e A. U. Antunes são engenheiros da Daimon Engenharia e Sistemas, São Paulo, SP, Brasil (e-mails: guilherme.borges@daimon.com.br, fabio.romero@daimon.com.br, marcello.salvo@daimon.com.br, andre.meffe@daimon.com.br e alden@daimon.com.br).

J. B. Vilar é engenheiro da Companhia Energética de Pernambuco, Recife, PE, Brasil. (e-mail: jarbas.vilar@celpe.com.br).

Muitas tarefas de planejamento da rede dos sistemas de distribuição de energia são baseadas em uma estimação das suas piores condições operacionais num futuro próximo, considerando tanto as demandas como as correntes dos alimentadores. Decisões como construir novas subestações, dividir um alimentador ou mesmo a postergação de tais medidas são dependentes da estimação desses parâmetros. Outros dados importantes normalmente obtidos destas estimações são curvas de carga típicas de consumo, fatores de potência e fatores de potência efetivos dos transformadores de distribuição. Estas informações são usadas para avaliar, por exemplo, as perdas técnicas da rede, usando um cálculo de fluxo de carga para cada condição de carregamento.

Com base nos dados de perdas técnicas e demandas estimadas nos pontos de medição, também é possível estimar a parcela de perdas não técnicas dos alimentadores, que é toda energia ou demanda efetivamente entregue ao consumidor, ao consumo próprio ou a outra concessionária, mas que, por algum motivo, não foi computada nas vendas (energia ou demanda não faturada). Estas são de difícil aferição, pois não podem ser medidas e nem são contempladas pelos métodos de cálculo, que utilizam exatamente os consumos faturados. As principais metodologias atualmente utilizadas para correção de demanda foram desenvolvidas levando-se em conta apenas as medições existentes no início de cada alimentador. Tal problema foi abordado por André Méffe [1], [2], onde a solução proposta consiste em determinar um fator de correção único com base na corrente máxima medida e a maior corrente estimada no início do alimentador, e então aplicá-lo nos módulos das três fases ao longo de toda sua extensão. As vantagens da metodologia proposta neste artigo em relação àquela apresentada em [1] e [2], diz respeito à utilização das medições distribuídas ao longo do alimentador e de fatores de correção independentes para cada uma das fases, os quais são capazes de corrigir não só o módulo, mas também a defasagem das correntes, para a determinação de valores mais condizentes com o estado real da rede.

II. OBJETIVO

Um bom sistema de gerenciamento de redes está baseado em cálculos de fluxo de potência. Considerando um plano de medições ideal, a rede teria medições e sensores em pontos suficientes para o cálculo de fluxo ser desnecessário, pois seria possível visualizar em tempo real a situação de carregamento em cada ponto da rede. Dessa forma, o cálculo de fluxo de potência vem para suprir essa falta de medição/sensoriamento.

Entretanto, para que o resultado do fluxo de potência represente bem a realidade da rede, a carga deve ser muito bem caracterizada a partir do cálculo de demanda realizado com base em dados de faturamento e de curvas típicas. Esse cálculo, no entanto, possui imprecisões, pois as curvas típicas possuem certa validade estatística e, frequentemente, não se sabe como a carga do consumidor está dividida entre as fases que o alimenta. Além disso, há a questão da qualidade do cadastro da concessionária que pode afetar a qualidade do resultado do cálculo. O uso de medições em vários pontos permitirá efetuar correções no cálculo de demanda a fim de

corrigir tais imprecisões.

Este artigo apresenta uma nova metodologia para o cálculo de correção de correntes e demandas por fase em sistemas de distribuição, utilizando de forma eficiente os dados obtidos pelos medidores inteligentes instalados ao longo da rede.

Em comparação com o método atualmente empregado pela CELPE, a metodologia proposta possui a vantagem de corrigir os desequilíbrios de carga de forma independente e mais precisa, visto que cada fase do alimentador possui seu próprio fator de correção de módulo e fase, em função dos dados obtidos ao longo do alimentador.

III. METODOLOGIA

Muitas podem ser as causas das discrepâncias entre as demandas medidas na saída da subestação (SE) e as demandas estimadas pelo cálculo de fluxo de potência. Neste contexto, existem aspectos de difícil tratamento, podendo-se citar:

- eventuais erros de cadastro;
- eventuais erros em medidores de grandezas elétricas;
- existência de consumidores clandestinos;
- descompasso existente entre a efetivação de manobras permanentes na rede de distribuição e a atualização correspondente nos bancos de dados de cadastro;
- dificuldade de caracterização da demanda dos pontos de carga.

O método utilizado pela CELPE para o tratamento de tais discrepâncias é feito na saída da SE [1-2]. Nele os dados das medições no início do alimentador são empregados para calcular um fator de correção na fase que apresenta a maior corrente medida. Este fator é então aplicado igualmente em todas as correntes e demandas das três fases do alimentador, de modo que os desequilíbrios estimados pelo cálculo de fluxo de carga ao longo do alimentador permaneçam inalterados após a aplicação do método, mesmo que isso resulte em valores discrepantes dos medidos anteriormente.

Já a metodologia proposta neste artigo utiliza os valores medidos das correntes em um determinado ponto de medição para obter fatores de correção de corrente individuais por fase do alimentador. Estes fatores são então aplicados nas correntes de cada uma das cargas dentro do raio de ação do medidor em questão, de modo a torná-las compatíveis com os valores obtidos nas medições, tanto em módulo quanto em defasagem. Após isso, a demanda de cada carga é corrigida utilizando estes mesmos fatores ou outros a serem calculados de acordo com sua configuração.

Na Fig. 1, sejam I_A^{med} , I_B^{med} e I_C^{med} as correntes de cada fase do alimentador, complexas, obtidas no medidor, e I_A^{est} , I_B^{est} e I_C^{est} as correntes complexas estimadas no mesmo ponto, os fatores de correção de corrente f são definidos como:

$$f = \frac{I^{med}}{I^{est}} \quad (\text{por fase}) \quad (1)$$

Estes fatores são então aplicados nas correntes de linha estimadas na entrada de cada uma das cargas daquele trecho,

de tal forma que as correntes corrigidas resultantes I_A^{corr} , I_B^{corr} e I_C^{corr} são dadas por:

$$I^{corr} = I^{est} \cdot f \quad (\text{por fase}) \quad (2)$$

Em seguida, é feita a correção da demanda destas cargas, de acordo com a configuração de cada uma. Nas cargas que possuem o primário em estrela aterrada a corrente que circula em cada fase do primário é a própria corrente de linha, desta forma a correção é feita aplicando-se os próprios fatores de correção de corrente nas demandas por fase da carga, de modo que:

$$D^{corr} = D^{est} \cdot f \quad (\text{por fase}) \quad (3)$$

No entanto, quando o primário das cargas apresenta configuração do tipo estrela isolada ou delta, esta correção não pode ser feita de forma imediata, sendo necessário para isso realizar a conversão de estrela isolada para delta e posteriormente calcular as correntes, tanto estimadas quanto corrigidas, em seu interior, para obter um novo fator de correção nas fases do delta que serão aplicados nas demandas. Para calcular estas correntes, utiliza-se a seguinte expressão empírica [2]:

$$i_{AC} = z_{eq}(i_B - i_A) + i_c / 2 \quad [pu] \quad (4)$$

em que i_{AC} é a corrente que circula entre os nós A e C do delta, i_A , i_B e i_C são as correntes de linha da carga, e $z_q = z_L / [2 \cdot (z_{F1} + z_{F2} + z_L)]$ [pu], sendo z_{F1} , z_{F2} e z_L as impedâncias do primário da Estação de Transformação (ET). Obtida a corrente I_{CA} , as correntes I_{AB} e I_{BC} podem ser determinadas aplicando-se a lei dos nós de Kirchhoff. Desta forma, calculam-se estas três correntes utilizando-se tanto os valores estimados quanto corrigidos de I_A , I_B e I_C , que serão utilizados para calcular o fator de correção de cada fase do delta. Estes fatores serão dados por:

$$f_{AB} = \frac{I_{AB}^{corr}}{I_{AB}^{est}}, \quad f_{BC} = \frac{I_{BC}^{corr}}{I_{BC}^{est}}, \quad f_{CA} = \frac{I_{CA}^{corr}}{I_{CA}^{est}} \quad (5)$$

em que as correntes corrigidas são aquelas obtidas utilizando os valores I_A^{corr} , I_B^{corr} e I_C^{corr} na expressão anterior, enquanto que as correntes estimadas são obtidas a partir de I_A^{est} , I_B^{est} e I_C^{est} .

São estes os fatores que serão aplicados nas demandas de cada fase do delta utilizando a expressão (3) para obter os valores corrigidos nas cargas em questão.

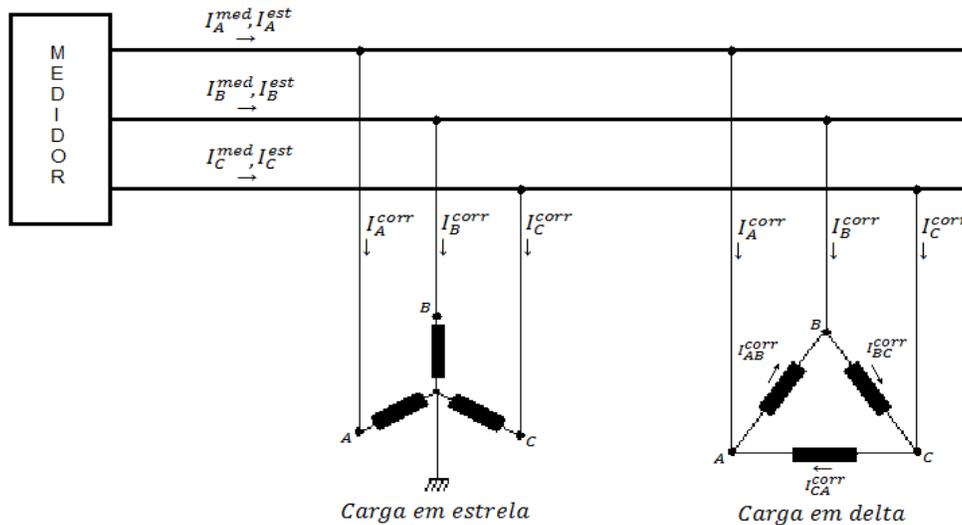


Fig. 1. Exemplo do fluxo de correntes na rede de média tensão e em cargas com ligação em estrela e delta.

IV. PRINCIPAIS RESULTADOS

As simulações computacionais apresentadas nesta seção referem-se à aplicação da metodologia proposta em alimentadores de distribuição da CELPE, previamente selecionados por possuírem características que facilitem a implementação do caso piloto, tais como, por exemplo, proximidade à rede de fibra óptica da CELPE, quantidade de consumidores conectados à rede, índice de desligamento do alimentador, índice de perdas comerciais, dentre outros. Desta forma, os testes foram realizados para os alimentadores MSG-

01C1 e para o alimentador MSG-01C3, sendo que ambos pertencem a mesma SE Rio Doce.

A seguir, são apresentados os testes para cada alimentador. Os resultados das Figuras 2 a 5 mostram os valores das correntes medida e corrigida pela metodologia atual e pela metodologia proposta. Destaca-se que as correções na demanda realizadas utilizando a metodologia atual são sempre realizadas com base no patamar que apresenta a corrente máxima medida, no caso, o período da tarde. Desta forma, após os cálculos dos fatores e da correção da demanda, uma comparação entre os valores das correntes medidas e

corrigidas é apresentada nos gráficos.

A. Alimentador MSG 01C1

Na Fig. 1 tem-se a representação do diagrama unifilar do alimentador MSG-01C1.

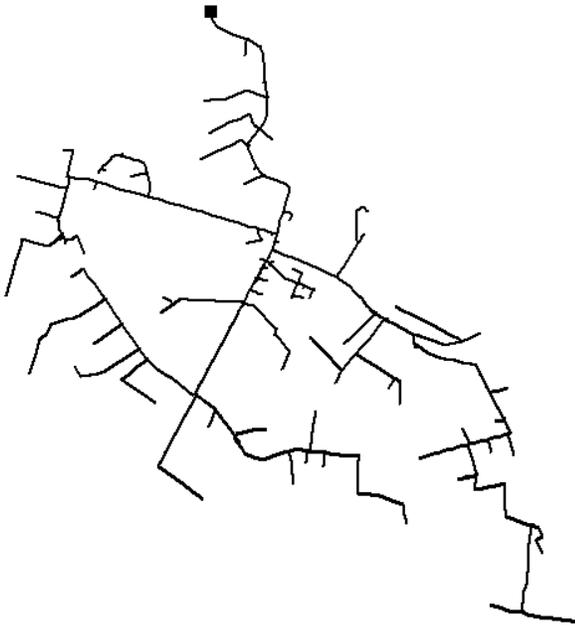


Fig. 1. Diagrama unifilar do alimentador MSG-01C1.

As correntes medida e calculadas no alimentador MSG-01C1 são apresentadas por patamar na Fig. 2.

Através dos resultados apresentados na Fig. 2, observa-se que a metodologia proposta permite uma aproximação maior ao valor medido em comparação com a metodologia atualmente utilizada pela CELPE [1] e [2].

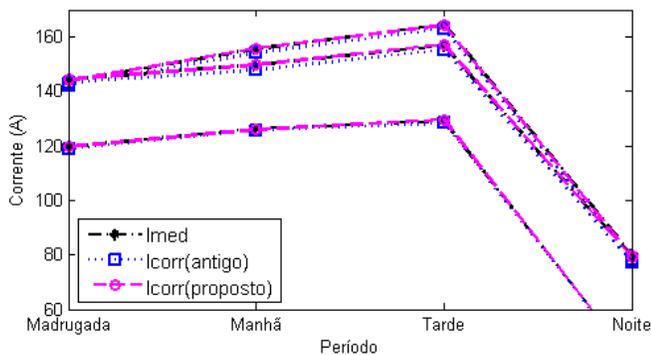


Fig. 2. Indicação dos valores das correntes trifásicas medidas (I_{med}), corrigidas através dos métodos de [1] e [2] ($I_{corr(antigo)}$) e proposto ($I_{corr(proposto)}$) no alimentador MSG-01C1.

De modo a permitir uma melhor avaliação das melhorias obtidas com a metodologia proposta, na Fig. 3 tem-se, em detalhes, a diferença entre os valores de corrente medidos e corrigidos nos patamares da manhã e tarde (que são os mais carregados) para a fase “F”.

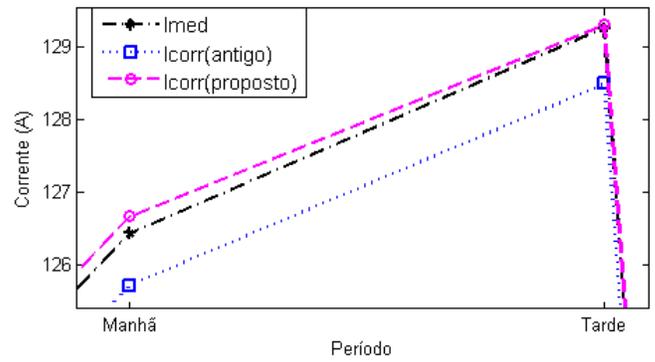


Fig. 3. Detalhe dos gráficos que representam os carregamentos medido e corrigidos na fase F do alimentador MSG-01C1.

B. Alimentador MSG 01C3

A Fig. 4 representa o diagrama unifilar do alimentador MSG-01C3.

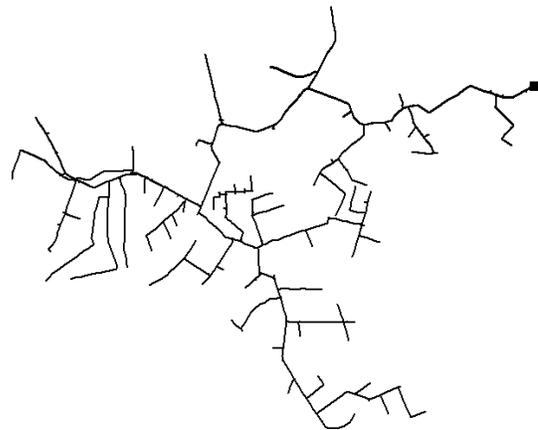


Fig. 4. Diagrama unifilar do alimentador MSG-01C3.

As correntes medida e corrigidas para o alimentador MSG-01C3 são apresentadas por patamar na Fig. 5.

Observa-se que, Assim como no teste anterior, a metodologia proposta permite uma aproximação maior ao valor medido em comparação com a metodologia utilizada.

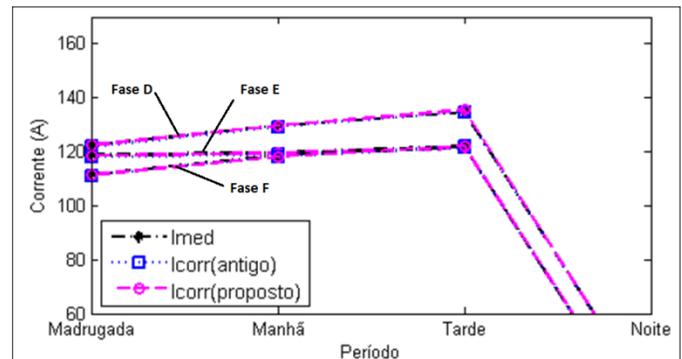


Fig. 4. Indicação dos valores das correntes trifásicas medidas (I_{med}), corrigidas através dos métodos de [1] e [2] ($I_{corr(antigo)}$) e proposto ($I_{corr(proposto)}$) no alimentador MSG-01C3.

Para uma uma melhor avaliação dos resultados, na Fig. 5 tem-se, detalhadamente, nos patamares da manhã e tarde, a diferença entre os valores medidos, e os valores corrigidos para a fase “F”.

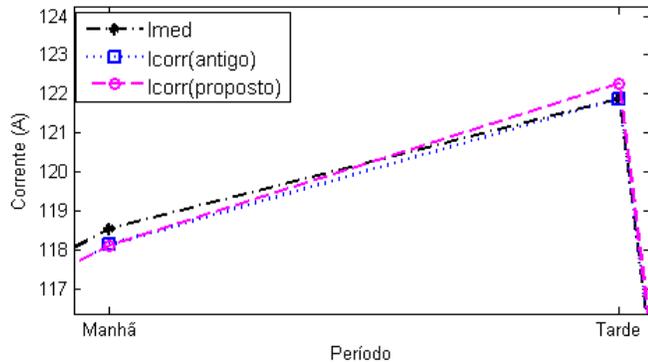


Fig. 5. Detalhe dos gráficos que representam os carregamentos medido e corrigidos na fase F do alimentador MSG-01C1.

V. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou uma nova metodologia proposta para o cálculo da correção de correntes e demandas por fase em redes de distribuição de média tensão, as quais, de forma geral, apresentam desequilíbrio entre suas fases. A metodologia utiliza de forma eficiente os dados obtidos por equipamentos de medição inteligente (compostos por TC / TP e *smart meters*) instalados ao longo de redes de distribuição de média tensão.

Comparando o método atualmente empregado pela CELPE para cálculo de correção de demanda dentro do processo de fluxo de potência, a nova metodologia aqui proposta possui a vantagem de corrigir os desequilíbrios de carga de forma independente e mais precisa, visto que cada fase do alimentador possui seu próprio fator de correção de módulo e fase, em função dos dados obtidos ao longo do alimentador.

Atualmente a metodologia está sendo aplicada como caso piloto nos alimentadores MSG-01C1 e MSG-01C3 e os resultados obtidos até o momento mostram que é possível determinar com boa precisão o valor do desequilíbrio de carga em determinados trechos do alimentador, e assim aplicar uma correção de demanda que obtenha valores mais realistas ao longo do mesmo. Tais resultados facilitam a definição de pontos estratégicos para instalação de reguladores de tensão, bem como a execução de medidas que diminuam o desequilíbrio entre as fases e melhorem os índices de qualidade e confiabilidade do sistema elétrico.

Além disso, os pontos que apresentarem discrepâncias mais elevadas entre as energias medida e calculada terão maior probabilidade de possuírem altos índices de fraude, sendo, portanto, alvos preferenciais para futuras ações corretivas por parte da CELPE.

VI. REFERÊNCIAS

- [1] Meffe, A. Cálculo de perdas técnicas em sistemas de distribuição - modelos adequáveis às características do sistema e à disponibilidade de informações. Universidade de São Paulo, 2007.
- [2] Meffe, A. Metodologia para cálculo de perdas técnicas por segmento do sistema de distribuição. Universidade de São Paulo, 2001.

VII. BIOGRAFIAS



Guilherme Pereira Borges was born in Cuiabá, Brazil, in 1981. He graduated in Electrical Engineering from Federal University of Mato Grosso, Cuiabá, Brazil, in 2008, and received the MSc degree in Electrical Engineering from Polytechnic School of University of São Paulo, São Carlos, Brazil, in 2011. Currently he is with Daimon Engineering and Systems, a company specialized in developing engineering software, R&D projects and consultancy projects. His current researchs interests includes power electric systems, distribution energy systems, smart grid, distributed generation, supply restoration in power distribution system, state estimation, and synchronized phasor measurement techniques.



Marcelo Pék Di Salvo was born in São Paulo, Brazil, in 1987. He graduated in Electrical Engineering from Polytechnic School of University of São Paulo, São Paulo, in 2010. Currently he is with Daimon Engineering and Systems, a company specialized in developing engineering software, R&D projects and consultancy projects. His current researchs interests includes power electric systems, distribution energy systems, smart grid, distributed generation, supply restoration in power distribution system, state estimation, and synchronized phasor measurement techniques.



Fabio Romero was born in Uberlândia, Brazil, in 1980. He graduated in Electrical Engineering from the University of Lins, Lins, Brazil, in 2003, and received the MSc degree in Energy from Institute of Energy and Environment of the University of São Paulo, São Paulo, Brazil, in 2007.

He joined the University of São Paulo in 2004 as Researcher with the Lightning and High Voltage Research Center (CENDAT / USP), and currently is with Daimon Engineering and System, a company specialized in developing engineering software, R&D projects and consultancy projects. He is author or coauthor of scientific papers presented at international conferences or published in reviewed journals. His current research interests include electrical power distribution planning, distribution losses, smart grids, protection of distribution lines, grounding, power system electromagnetic transients, grounding, and energy quality.



Alden Uehara Antunes was born in Ilha Solteira, Brazil, on March 10th, 1971. He graduated in Electrical Engineering at the Politechnic School of São Paulo University in 1996. He received his MSc at the Politechnic School of São Paulo University in 1999 and his PhD at the Politechnic School of São Paulo University in 2004. Nowadays, he is with Daimon Engineering and System, a company specialized in developing engineering software, R&D projects and consultancy projects. He has experience in the area of Electrical Engineering with emphasis on the Distribution of Electricity acting mainly on the following

topics: Electrical distribution system planning, methodologies for calculating technical losses, protection of primary feeders, service quality and smart grids.



André Meffe was born in São Paulo, Brazil, on April 23th, 1976. He graduated in Electrical Engineering from University of São Paulo in 1998. He received his MSc in Electrical Engineering from University of São Paulo in 2001 and his PhD in Electrical Engineering from University of São Paulo in 2006. He has been with the Department of Electrical Engineering at the University of São Paulo from 1999 to 2004, where he worked with researches related to electric distribution systems. Nowadays,

Mr. Méffe is with Daimon Enginnering and System, a company specialized in developing engineering software, R&D projects and consultancy projects His current research interests include electrical power distribution planning, methodologies for calculating technical losses and technical losses' targets, service quality and smart grids.



Jarbas Barros Vilar graduated in Electrical Engineering from University of Pernambuco, Recife, in 1981. He is a specialist in distribution system planning, and power regulation. Currently he is with Pernambuco Energy Company. His current research interests include electrical power distribution planning, methodologies for calculating technical losses and technical losses' targets, service quality and smart grids