

Fabio Romero	Daimon Engenharia e Sistemas	fabio.romero@daimon.com.br
Jarbas Barros Vilar	Companhia Energética de Pernambuco	jarbasvilar@celpe.com.br
Alden Uehara Antunes	Daimon Engenharia e Sistemas	alden@daimon.com.br
Marcello Pek Di Salvo	Daimon Engenharia e Sistemas	marcello.salvo@daimon.com.br
Leonardo Henrique Tomassetti Ferreira Neto	Daimon Engenharia e Sistemas	lferreira@daimon.com.br
Andre Meffe	Daimon Engenharia e Sistemas	andre.meffe@daimon.com.br
Guilherme Pereira Borges	Daimon Engenharia e Sistemas	guilherme.borges@daimon.com.br

Contribuição para o cálculo de fluxo de potência em alimentadores de distribuição de média tensão através do desenvolvimento de metodologia para correção de demanda e corrente por fase utilizando o conceito Smart Grid

Palavras-chave

Sistemas de distribuição

Correção de carga

Correção de demanda

Medição inteligente

Smart Grid

Estimação de estado

Resumo

Um dos principais problemas no gerenciamento de sistemas de distribuição de energia é a falta de dados de medições em tempo real. Entretanto, com o advento do conceito Smart Grid torna-se possível obter dados elétricos de alimentadores em tempo real, melhorando consideravelmente a estimação de estado da rede. O objetivo deste trabalho é apresentar uma nova metodologia para o cálculo da correção de carga em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando dados de potência e corrente por fase obtidos através de medições em tempo real localizadas em pontos estratégicos de alimentadores, resultando em melhorias consideráveis na estimação do estado do sistema e contribuindo para o cálculo de fluxo de potência do sistema elétrico. Os dados obtidos com esta nova metodologia são comparados com os atuais métodos para estimação do estado de alimentadores – os quais consideram apenas as medições na subestação – mostrando a grande contribuição para o gerenciamento e operação de alimentadores, principalmente no que tange a expansão do sistema.

1. Introdução

Na última década, em virtude do 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.

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 desenvolveram um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) que tem como um dos objetivos 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 instalados em pontos estratégicos da rede.

Com mais de 3,3 milhões de clientes, a CELPE fornece energia elétrica a 184 municípios do Estado de Pernambuco, ao Distrito Estadual de Fernando de Noronha e ao município de Pedras de Fogo, no Estado da Paraíba, buscando sempre melhorar os índices de desempenho técnico estabelecidos pela ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica). A empresa se mantém atualizada com novas tecnologias na telecomunicação, 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.

Muitas tarefas de planejamento da rede dos sistemas de distribuição de energia são baseadas em uma estimativa 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 estimativa desses parâmetros. Outros dados importantes normalmente obtidos destas estimativas 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 (MEFFE, 2001; 2007), em que a solução proposta consiste na determinação de 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 a extensão da rede. As vantagens da metodologia proposta neste artigo em relação àquela apresentada por (MEFFE, 2001; 2007), 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.

Os dados elétricos da rede são obtidos e transmitidos através de um sistema inteligente de medição, armazenamento e gerenciamento desenvolvido no Projeto. Basicamente, este sistema é composto por medidores inteligentes instalados em pontos estratégicos da rede de média tensão que coletam dados elétricos em tempo real ou em tempo previamente determinado pelo usuário e enviam estas informações via fibra ótica ou GPRS para uma central (formada por um banco de dados e um *software* robusto de planejamento, operação e monitoramento denominado Daimon Smart Grid) para utilização *online* ou posterior. Mais detalhes do Sistema podem ser obtidos em (DI SALVO, M. P.; BORGES, G. P.; ROMERO, F.; FERREIRA NETO, L. H. T.; ANTUNES, A. U.; MEFFE, A., 2014).

2. Desenvolvimento

2. 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. Como a condição "ideal" é economicamente inviável, 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 diversos pontos do alimentador de média tensão permite efetuar correções no cálculo de demanda a fim de aproximar os valores estimados àqueles medidos.

Este artigo apresenta uma nova metodologia para o cálculo de correção de corrente e demanda 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, contribuindo com uma melhoria significativa no cálculo de fluxo de potência da rede.

3. Metodologia

Muitas podem ser as causas das discrepâncias entre as demandas medidas na saída da subestação (SE) e as demandas estimadas ao longo da rede 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 (e pela grande maioria das distribuidoras de energia) para o tratamento de tais discrepâncias é feito na saída da SE (MEFFE, 2001; 2007). 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 ao longo da rede 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 Figura 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:

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

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:

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

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 (MEFFE, 2007):

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

em que i_{AC} é a corrente que circula entre os nós A e C do $\{i_A, i_B, i_C\}$ e são as correntes de linha da carga, e $z_q = z_L / [2 \cdot (z_{F1} + z_{F2} + z_L)] \text{ [pu]}$, 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}, 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 $\{I_A, I_B, I_C\}$, que serão utilizados para calcular o fator de correção de cada fase do delta. Estes fatores serão dados por:

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

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

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.

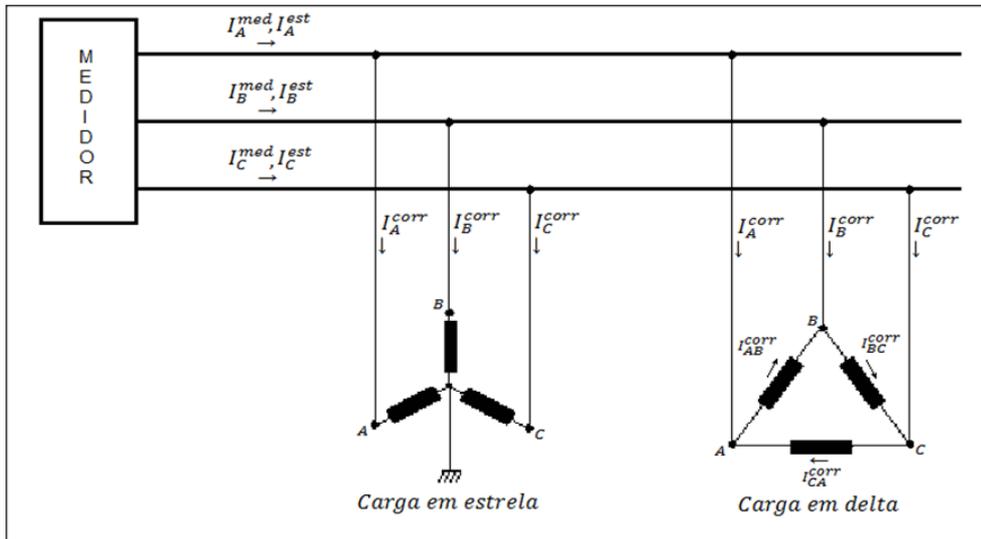


Figura 1. Exemplo do fluxo de correntes na rede de média tensão e em cargas com ligação em estrela e delta.

4. 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 (DI SALVO, M. P.; BORGES, G. P.; ROMERO, F.; FERREIRA NETO, L. H. T.; ANTUNES, A. U.; MEFFE, A., 2014).

A seguir, são apresentados os testes para cada alimentador. Os resultados das Figuras 3 a 6 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.

4.1. Alimentador MSG 01C1

Na Figura 2 tem-se a representação do diagrama unifilar do alimentador MSG-01C1.

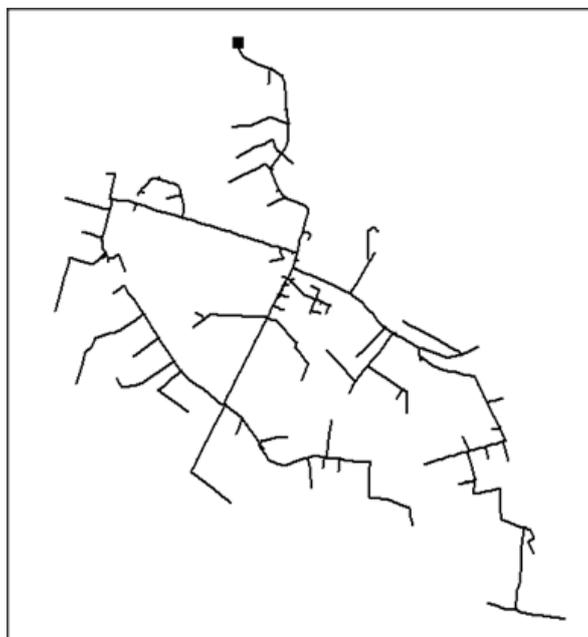


Figura 2. Diagrama unifilar do alimentador MSG-01C1.

As correntes medida e calculadas no alimentador MSG-01C1 são apresentadas por patamar na Figura 3.

Através dos resultados apresentados na Figura 3, observa-se que a metodologia proposta permite uma aproximação maior ao valor medido em comparação com a metodologia atualmente utilizada pela CELPE.

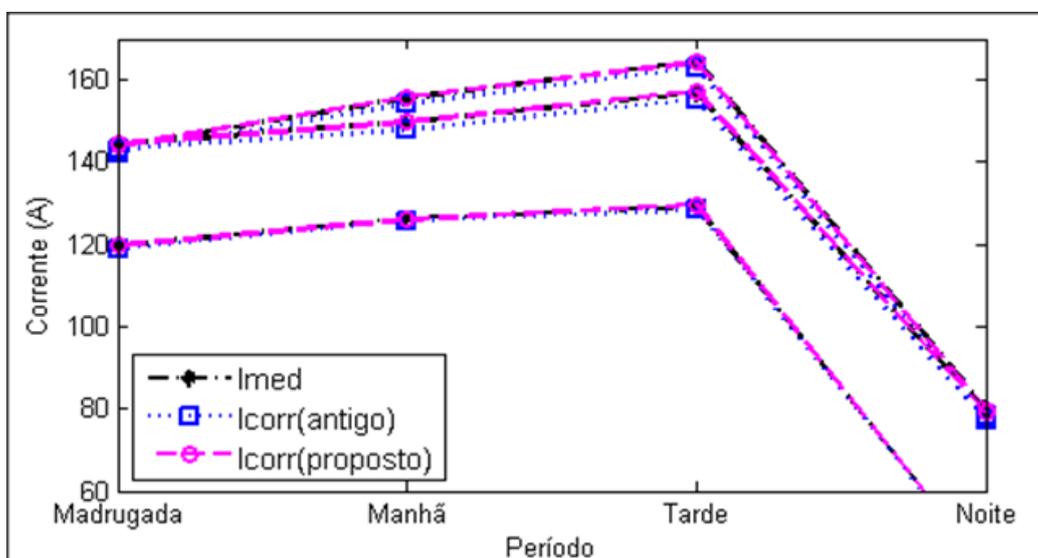


Figura 3. Indicação dos valores das correntes trifásicas medidas (I_{med}), corrigidas através dos métodos de (MEFFE, 2001; 2007) ($I_{corr(antigo)}$) e proposto ($I_{corr(proposto)}$) no alimentador MSG-01C1.

De modo a permitir uma melhor avaliação das melhorias obtidas com a metodologia proposta, na Figura 4 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”.

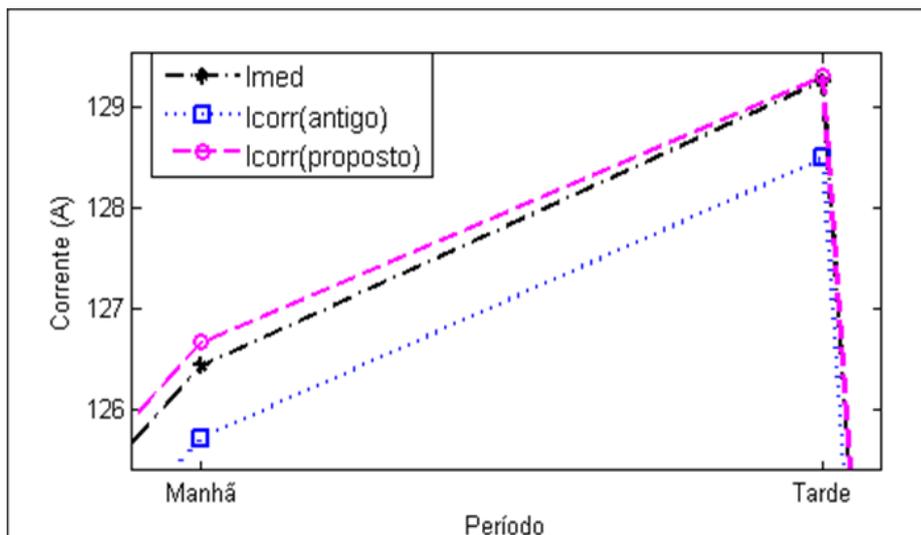


Figura 4. Detalhe dos gráficos que representam os carregamentos medido e corrigidos na fase F do alimentador MSG-01C1.

4.2. Alimentador MSG 01C3

A Figura 5 representa o diagrama unifilar do alimentador MSG-01C3.



Figura 5. Diagrama unifilar do alimentador MSG-01C3.

As correntes medida e corrigidas para o alimentador MSG-01C3 são apresentadas por patamar na Figura 6.

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

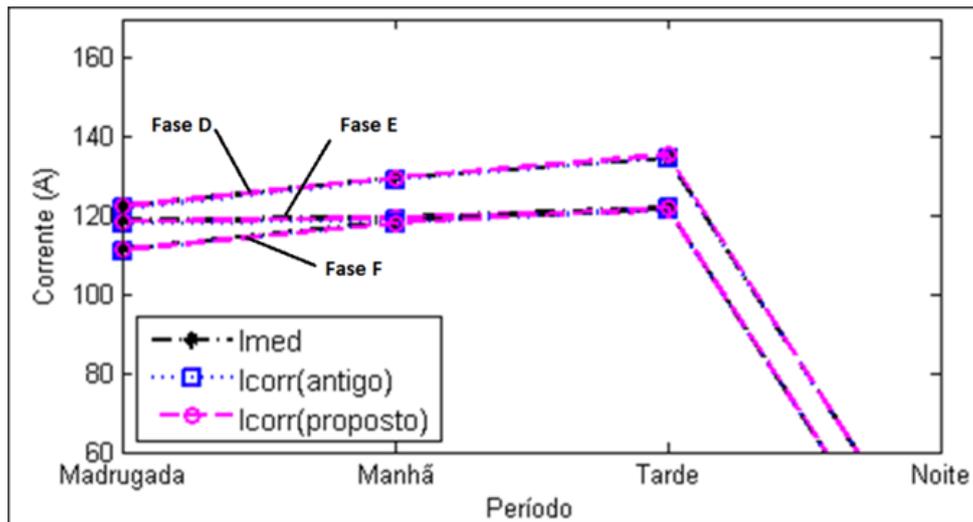


Figura 6. Indicação dos valores das correntes trifásicas medidas (I_{med}), corrigidas através dos métodos de (MEFFE, 2001; 2007) ($I_{corr(antigo)}$) e proposto ($I_{corr(proposto)}$) no alimentador MSG-01C3.

Para uma uma melhor avaliação dos resultados, na Figura 7 tem-se, detalhadamente, nos patamares da manhã etarde, a diferença entre os valores medidos, e os valores corrigidos para a fase "F".

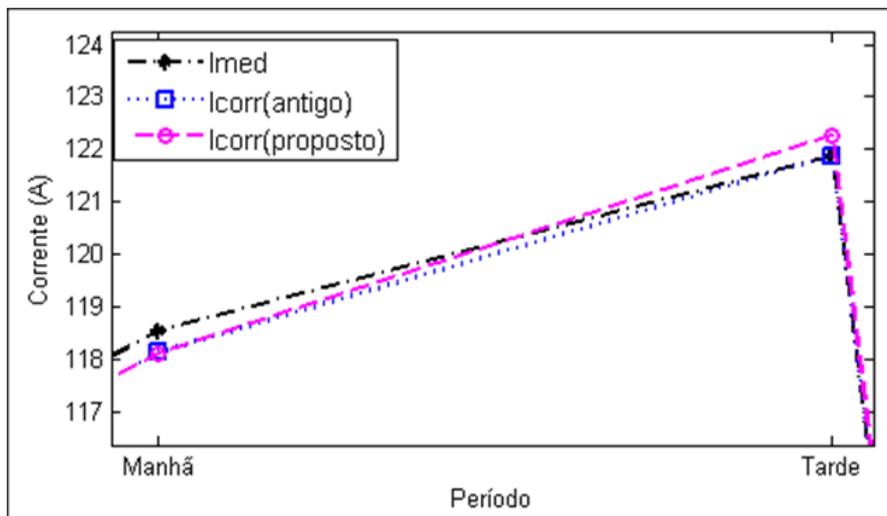


Figura 7. Detalhe dos gráficos que representam os carregamentos medido e corrigidos na fase F do alimentador MSG-01C1.

3. Conclusões

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 alto grau de desequilíbrio entre suas fases. A metodologia utiliza de forma eficiente os dados obtidos por equipamentos de medição inteligente instalados ao longo de redes de distribuição de média tensão e associados ao robusto sistema de medição, armazenamento e gerenciamento de dados elétricos desenvolvidos pela CELPE e Daimon.

Comparando o método atualmente empregado pela CELPE para cálculo de correção de demanda dentro do processo de fluxo de potência, a nova 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.

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, cabe ressaltar que 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.

Os resultados apresentados nas Figuras 3 a 6 são de medições em um determinado conjunto de medição, sendo que comparações mais pronunciáveis entre os dados de carregamento medido e corrigido em fases do alimentador foram observados em outros pontos. Tais discrepâncias entre os resultados dependem de vários dados elétricos do trecho medido, tais como corrente passante, desequilíbrio entre fases etc.

4. Referências bibliográficas

MEFFE, Andre. Metodologia para cálculo de perdas técnicas por segmento do sistema de distribuição. Mestrado em Engenharia. Universidade de São Paulo, 2001;

MEFFE, Andre. Cálculo de perdas técnicas em sistemas de distribuição – modelos adequáveis às características do sistema e à disponibilidade de informações. Doutorado em Engenharia. Universidade de São Paulo, 2007.

DI SALVO, MARCELO PEK; BORGES, GUILHERME PEREIRA; ROMERO, FABIO; FERREIRA NETO, LEONARDO HENRIQUE TOMASSETTI; ANTUNES, ALDEN UEHARA; MEFFE, ANDRE. I – Software de simulação visando o gerenciamento de sistemas de distribuição – versão final. II – Descrição do sistema de medição, armazenamento e gerenciamento de dados elétricos implantado. Relatório Técnico. Companhia Energética de Pernambuco / Daimon Engenharia e Sistemas. São Paulo, 2014.

BORGES, Guilherme Pereira; ROMERO, Fabio; Di SALVO, Marcelo Pek; ANTUNES, A. U.; MEFFE, Andre. . Avaliação da qualidade e localização de medidores a serem instalados nos alimentadores. Relatório Técnico. Companhia Energética de Pernambuco / Daimon Engenharia e Sistemas. São Paulo, 2011a.

BORGES, Guilherme Pereira; ROMERO, Fabio; Di SALVO, Marcelo Pek; ANTUNES, A. U.; MEFFE, Andre. Especificação de um modelo de cálculo elétrico, fundamentado na disponibilidade de medições em diversos pontos das redes de distribuição. Relatório Técnico. Companhia Energética de Pernambuco / Daimon Engenharia e Sistemas. São Paulo, 2011b.

BORGES, Guilherme Pereira; ROMERO, Fabio; ANTUNES, Aalden Uehara; MEFFE, André. Concepção de um conjunto de funcionalidades específicas aplicadas ao gerenciamento dos sistemas de distribuição: planejamento da expansão e faltas de alta impedância. Relatório Técnico. Companhia Energética de Pernambuco / Daimon Engenharia e Sistemas. São Paulo, 2012.

CARVALHO, Marcus Rodrigo. (2006). **Estudo comparativo de fluxo de potência para sistemas de distribuição radial** . Universidade de São Paulo, Departamento Engenharia Elétrica, Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica, São Carlos.

FERREIRA, H. L.; BARBOSA, S. R. Conexão de geração distribuída ao sistema das concessionárias de distribuição de energia - análise das perdas. **V CIERTEC: Gestión de Pérdidas, Eficiencia Energética y Protección de Ingresos en el Sector Eléctrico**, Alagoas, 28-31 Agosto 2005. 7.

KERSTING, W. H. **Distribution System Modeling and Analysis**. Boca Raton: CRC Press LLC, 2001.
