

1 Introdução

A crescente dependência das sociedades modernas em relação às diversas formas de energia e em particular à energia elétrica, juntamente com o crescimento em dimensão e complexidade dos sistemas elétricos, especialmente em nível de distribuição, tem demandado maior cuidado nas análises, no planejamento e na operação destes sistemas.

Para analisar, planejar e operar um sistema de distribuição de energia elétrica de maneira econômica e segura é de fundamental importância definir um modelo adequado para cada elemento do sistema. A adequada modelagem dos elementos da rede elétrica possibilita a operação do sistema com menores margens de erro, melhor representação das restrições de operação e melhor exploração dos recursos disponíveis. Ao longo do tempo vários estudos e pesquisas foram realizados com o propósito de aprimorar os modelos dos componentes do sistema (linhas de transmissão/distribuição, transformadores, geradores, etc.), porém desde o início a carga apresentou-se como um dos componentes mais desafiadores para modelagem. Apesar de se conhecer, teoricamente, como cada equipamento se comporta individualmente, não se tem uma ideia precisa do resultado da agregação das cargas, devido à grande diversidade de equipamentos que podem compor uma carga específica (consumidor ou transformador de distribuição).

Os estudos de planejamento, análises de contingência, reconfigurações operativas de redes, análise de eventos entre outros que envolvam a avaliação do estado operativo da rede, são fortemente afetados pela modelagem de suas cargas. Especificamente para o cálculo das perdas elétricas, a adequada modelagem das cargas permite, dentre outras coisas, o aprimoramento no repasse dos custos relacionados aos sistemas de distribuição de energia elétrica para o consumidor final.

As perdas elétricas podem ser divididas em dois grupos: perdas técnicas e perdas não-técnicas.

As perdas técnicas são inerentes ao processo de transmissão e distribuição de energia elétrica e ocorrem devido à dissipação da energia nas linhas e transformadores do sistema elétrico por efeito Joule. Por outro lado, as perdas não técnicas são causadas por ações externas ao sistema como falta de pagamento por parte dos clientes, e erros na contabilidade e manutenção inadequada dos registros de medições. Estas três categorias de perdas não-técnicas são, respectivamente, tratadas como perdas comerciais ou administrativas, embora sua definição varie na literatura.

Um dos procedimentos usuais para estimar as perdas técnicas é o cálculo de fluxo de potência. Esse procedimento requer o conhecimento da topologia da rede, da impedância das linhas, e do valor das cargas elétricas no intervalo de tempo considerado.

Desde os anos cinquenta, com a crescente popularização dos computadores digitais, foram desenvolvidos métodos de cálculo do fluxo de potência para determinar e analisar o estado operacional dos sistemas elétricos. Em sistemas de distribuição tem sido mais comum desde 1980, com algumas abordagens que aproveitam a típica configuração radial das redes de distribuição.

Desde então, a abordagem usual para avaliar as perdas técnicas baseia-se num algoritmo de fluxo de potência, por vezes melhorada com medições em tempo real em pontos estratégicos do sistema. Em sistemas de distribuição, é comum que as distribuidoras não tenham registradas informações detalhadas de suas redes ou mesmo que estas informações estejam em bases de dados diferentes, o que dificulta a devida modelagem para o cálculo do fluxo de potência.

No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) é a responsável por: regular e fiscalizar a geração, transmissão, distribuição e comercialização da energia elétrica; mediar os conflitos de interesses entre os agentes do setor elétrico, e entre estes e os consumidores; conceder, permitir e autorizar instalações e serviços de energia; garantir tarifas justas para os usuários do sistema; zelar pela qualidade do serviço; estimular a competição entre os operadores; e assegurar a universalização dos serviços. Numa análise reguladora, a ANEEL deve estimular a eficiência do mercado elétrico.

No cenário atual a ANEEL solicita as informações sobre as perdas técnicas de cada empresa de distribuição de energia elétrica no Brasil; esta é uma informação fundamental para estabelecer preços de referência para a energia.

Comparando as perdas técnicas no Brasil com a de outros países, espera-se que as perdas elétricas no Brasil sejam maiores. Isto pode ser explicado por duas razões. A primeira razão é a característica de geração, que é predominantemente hidroelétrica, e as usinas estão localizadas longe dos principais centros de consumo. Assim, as linhas de transmissão que liguem as usinas geradoras com os consumidores finais percorrem grandes distâncias, o que provoca aumento de perdas. A segunda razão é o baixo nível de densidade de carga. Além da grande dimensão do país, a maior parte da população está concentrada nas regiões centro-sul.

No Brasil, a ANEEL considera um tratamento regulatório diferente para as perdas técnicas e não técnicas. Para as perdas técnicas, aplica-se um método para calcular as perdas de forma segmentada, de acordo com os níveis de tensão. A fim de definir níveis aceitáveis de perdas não técnicas, utiliza-se uma análise de regressão com alguns atributos socioeconômicos que são de alguma forma correlacionados com as perdas não técnicas.

Especificamente em nível de Distribuição, no desenvolvimento do modelo regulatório para o cálculo de perdas, é desejável buscar atender as premissas citadas em [1] e listadas a seguir:

1. Considerar as diferentes formas que têm as empresas distribuidoras de obter as informações requeridas pelo modelo, sendo aplicável a todos os agentes alcançados pela regulamentação;
2. As informações requeridas devem compor um conjunto mínimo de dados e de fácil fiscalização, e dotadas de procedimentos simples e bem estabelecidos para sua obtenção;
3. Os modelos devem ser facilmente compreensíveis pelos agentes e, preferencialmente parcimoniosos, com vistas a propiciar maior transparência aos atos expedidos pelo regulador.

Atualmente, a ANEEL aplica um método para a avaliação das perdas técnicas de potência dos sistemas de distribuição de energia elétrica, tendo como referência a demanda média das redes do Sistema de Distribuição de Média Tensão [1].

1.1 Motivação e Objetivos

A principal motivação deste trabalho está na crescente utilização de Redes Elétricas Inteligentes ou *Smart Grids*, que está fortemente relacionado com as medições nos sistemas elétricos, principalmente em nível de distribuição. Assim, aplicando as medições obtidas aos novos métodos para a alocação de carga em um sistema elétrico, as perdas elétricas poderiam ser estimadas com maior precisão do que é feito atualmente.

O objetivo desta dissertação é desenvolver um método para a estimação das perdas elétricas no sistema de média tensão em redes de distribuição como alternativa ao método vigente. O método proposto utilizará um modelo modificado de alocação de cargas baseado no modelo polinomial ou ZIP. Este método permite considerar pontos de medição nas subestações de distribuição e, se disponíveis, ao longo dos principais pontos da rede elétrica que tenham equipamentos de medição. Estas medições feitas durante um período em análise serão combinadas com um método de otimização baseado na técnica de mínimos quadrados para o ajuste dos parâmetros do modelo de carga proposto em cada intervalo de tempo considerado.

A técnica de otimização proposta utiliza Algoritmos Genéticos para ajustar os parâmetros do modelo de cada consumidor identificado no sistema. Desta forma, cada consumidor terá associado um modelo de carga associado diretamente as tensões e potências em cada intervalo de tempo na subestação, o que permitirá calcular o fluxo de potência em cada intervalo e, conseqüentemente, as perdas elétricas no sistema.

1.2 Revisão Bibliográfica de Estimação de perdas elétricas em sistemas de Distribuição

Nesta seção serão apresentados trabalhos presentes na literatura atual que estão diretamente relacionadas ao trabalho proposto.

Em [2] é apresentado um método Top-Down, denominado Novo Top-Down (NTD), que utiliza uma base de dados da potência para o sistema onde se deseja estimar as perdas. Para implementá-lo, é necessário obter as curvas de carga

medidas nas subestações, além da topologia e os valores das impedâncias das linhas da rede de média tensão. Assim, os dados de potência no ponto de demanda máxima são alocados para as cargas e, por meio de um algoritmo de fluxo de potência, são calculadas as perdas de potência na rede de média tensão para a demanda máxima. Com a utilização de um fator de perdas, também obtido pelas curvas de carga medidas, e considerando o período de tempo em análise, têm-se as perdas técnicas de energia nas redes de média tensão do sistema de distribuição.

Em [3] é apresentado o método estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para o cálculo de perdas na rede de média tensão nos sistemas de distribuição tendo como referência a demanda média anual do sistema. Isto é feito da seguinte forma: com os dados da energia anual fornecida, topologia da rede e dados dos condutores é utilizado um modelo de regressão múltipla para a determinação das perdas elétricas para a demanda média anual. Finalmente, com um coeficiente de perdas determinado pelas curvas de carga é calculada a perda de energia anual na rede.

Em [4] é apresentada um método que se baseia na estimação das perdas de energia com a aplicação da lógica *fuzzy* e de técnicas de classificação de informação, (também conhecidas como “*clustering*”). Neste método, a estimação das perdas elétricas durante um período de análise estabelecido é feita utilizando dois parâmetros: as perdas calculadas para o ponto de operação de máxima demanda na rede e o fator de perdas. As perdas em condições de máxima demanda são obtidas como a saída de um processo de inferência de lógica *fuzzy* de dois conjuntos nebulosos que representam o fator de potência do transformador na subestação e o nível de carregamento da rede ou alimentador. E o fator de perdas é determinado utilizando uma expressão empírica e a demanda máxima na rede.

Em [5] é proposto um método que estima as perdas elétricas através de cálculos de fluxo de potência nas redes para primeiramente determinar as perdas elétricas em cada intervalo e, em seguida, fazer o somatório delas. Neste método, os cálculos de fluxo de potência consideram diversos efeitos elétricos como as perdas no núcleo e no enrolamento dos transformadores, além dos elementos *shunts* e o efeito da temperatura na resistência das linhas.

Em [6] é proposto um método que estima as perdas de energia durante um período de tempo definido através de uma equação que depende de três variáveis:

a primeira variável são as perdas elétricas determinadas pelo cálculo de fluxo de potência no instante de máxima demanda; a segunda são as perdas elétricas determinadas pelo cálculo de fluxo de potência no instante de demanda nula (cargas sem demanda de potência); e, finalmente, a terceira é o fator de perdas calculado mediante uma equação empírica que depende do fator de carga. A estimação das perdas é o resultado do produto do fator de perdas com as perdas elétricas na máxima demanda e o período de tempo, somado com o produto das perdas elétricas na demanda nula no mesmo período de tempo em análise.

1.3 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação está organizada como segue:

O Capítulo 1 apresenta um panorama geral da alocação e modelagem de cargas e do método proposto para a estimação de perdas elétricas na rede de média tensão nos sistemas de distribuição. São apresentados a motivação, os objetivos do trabalho e uma revisão dos principais trabalhos presentes na literatura utilizados no seu desenvolvimento.

No Capítulo 2 são apresentados os modelos de carga mais representativos e uma breve descrição das perdas elétricas nas redes de distribuição.

No Capítulo 3 são apresentados dois métodos (Novo Top-Down [2] e ANEEL [3]) para a estimação de perdas elétricas, que são comparados com o método proposto nesta dissertação.

No Capítulo 4 é apresentado o modelo proposto para a alocação de cargas. Em seguida, o método proposto para estimação de perdas é descrito em detalhes, indicando todos os passos do algoritmo desenvolvido e aplicando-a a um sistema de distribuição didático de 5 barras para melhor entendimento.

No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos pela aplicação do método proposto, do método Novo Top-Down [2] e da ANEEL [3] para um alimentador didático da IEEE de 34 barras e para um alimentador real de 407 barras.

No Capítulo 6 são apresentadas as conclusões e propostas de trabalhos futuros e, no Capítulo 7, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas no desenvolvimento desta dissertação.

Nos Apêndices são apresentados os dados do sistema de 34 barras do IEEE utilizado no Capítulo 5, as descrições básicas da técnica de Algoritmos Genéticos que foi utilizada no método proposto e, finalmente, dois artigos referentes à dissertação que foram aprovados para conferências internacionais.