

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E DE
COMPUTAÇÃO

SÉRGIO AUGUSTO DE MORAIS FILHO

**IDENTIFICAÇÃO DE PERDAS NÃO
TÉCNICAS EM REDES DE
DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA
ELÉTRICA**

São Carlos
2015

SÉRGIO AUGUSTO DE MORAIS FILHO

IDENTIFICAÇÃO DE PERDAS NÃO TÉCNICAS EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
à Escola de Engenharia de São Carlos, da
Universidade de São Paulo

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase em
Sistemas de Energia e Automação

ORIENTADOR: Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

São Carlos
2015

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

D478i de Moraes Filho, Sérgio Augusto
Identificação de perdas não técnicas em redes de
distribuição de energia elétrica / Sérgio Augusto de
Moraes Filho; orientador José Carlos de Melo Vieira
Junior. São Carlos, 2015.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com
ênfase em Sistemas de Energia e Automação) -- Escola de
Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo,
2015.

1. Perdas não técnicas. 2. Sistema elétrico de
distribuição. 3. Medidores Inteligentes. 4. Método QV.
I. Título.

FOLHA DE APROVAÇÃO

Nome: Sérgio Augusto de Moraes Filho

Título: "Identificação de perdas não técnicas em redes de distribuição de energia elétrica"

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado
em 20 / 11 / 2015,

com NOTA 9,0 (nove , zero), pela Comissão Julgadora:

Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Junior - (Orientador - SEL/EESC/USP)

Prof. Associado Eduardo Nobuhiro Asada - (SEL/EESC/USP)

Mestre Gerson Bessa Gibelli - (Doutorando - SEL/EESC/USP)

Coordenador da CoC-Engenharia Elétrica - EESC/USP:
Prof. Dr. José Carlos de Melo Vieira Júnior

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Deus único que me deu vida, saúde, condições para que pudesse estudar, aprender e desenvolver este trabalho de conclusão de curso e por todos que ele, em Sua infinita sabedoria, colocou em meu caminho para o meu bem.

Sou grato por Ele ter sido bom para comigo e me dado a graça de nascer em uma família que me ensinou no caminho em que eu devo andar e se esforçou de forma amorosa e sacrificial para que eu pudesse ter uma boa educação enquanto criança e, deste modo, contribuir para que eu pudesse obter o privilégio de estudar na renomada instituição de ensino que é a Universidade de São Paulo.

Agradeço ao Professor Dr. José Carlos de Melo Vieira Junior pela atenção, comprometimento e dedicação que mostrou durante todo o período em que me orientou, tanto no projeto de iniciação científica quanto no decorrer deste trabalho de conclusão de curso.

Lembro, neste momento, da minha prima Fernanda Trindade, que se mostrou sempre disposta em me ajudar com os estudos e me aconselhar desde o meu ingresso no curso de Engenharia Elétrica.

Estendo minha gratidão aos colegas de estudo durante esses anos de graduação, pelo companheirismo e auxílio prestado nos momentos de necessidade.

Agradeço, também, a todos os meus amigos que me acompanham nos momentos de alegrias e tristezas, pelos momentos de descontração e aconselhamento que colaboraram para que eu amadurecesse como pessoa e fosse quem eu sou hoje.

"Não é tolo aquele que dá o que não pode reter para ganhar o que não pode perder." Jim Elliot

Sumário

Resumo	11
Abstract	13
Lista de Figuras.....	15
Lista de Tabelas	17
Introdução	19
1.1 Objetivos	21
1.2 Estrutura do Documento.....	21
2 Cálculo de Perdas em Sistemas de Distribuição	23
2.1 Técnicas atuais para combate às Perdas Não Técnicas (PNTs).....	26
3 Método QV.....	35
3.1 Cálculo de Fluxo de Carga – Método de Newton Raphson (NR)	35
3.1.1 Processo Iterativo: Método de Newton Raphson.....	38
3.2 Explicação do Método QV	39
3.2.1 Aplicação do Método QV em cálculo de fluxo de carga	40
3.2.2 Algoritmo para Aplicação do Método QV.....	43
4 Aplicação e Resultados	45
4.1 Descrição do Sistema Elétrico adotado: Sistema de Média Tensão	45
4.1.1 Validação do Método QV.....	45
4.1.2 Aplicação Método QV para detecção de PNTs	48
4.1.3 Estudo de Sensibilidade	49
4.2 Análise de desempenho na presença de Erros Arbitrários de Tensão.....	54
4.2.1 Análise de Sensibilidade: Detecção de PNTs na presença de Erros Arbitrários de Tensão	56
4.3 Descrição do Sistema Elétrico adotado: Sistema de Baixa Tensão.....	59
4.4 Análise de desempenho na presença de Erros Arbitrários de Tensão.....	61
4.4.1 Análise de Sensibilidade: Detecção de PNTs na presença de Erros Arbitrários de Tensão	61
5 Conclusões.....	69
5.1 Trabalhos Futuros	70
6 Referências	73
7 Apêndice A – Dados do Sistema Elétrico – Média Tensão	75
8 Apêndice B – Dados do Sistema Elétrico – Baixa Tensão.....	77

Resumo

O presente trabalho se insere em um contexto no qual o sistema de distribuição de energia elétrica se depara com o desafio de aumentar sua eficiência por meio da redução das perdas não técnicas de energia elétrica. Estas são perdas devidas, principalmente, às fraudes nos sistemas de aferição do consumo. Aproveitando-se do desenvolvimento tecnológico recente, que possibilitou a criação dos chamados medidores inteligentes, este trabalho propõe um método alternativo de fluxo de potência para auxiliar nesse processo de identificação das perdas não técnicas. O mesmo é capaz de calcular a potência que deveria supostamente estar sendo medida no ponto de consumo de energia com base na potência reativa (Q) e tensão (V) medidas neste ponto. Caso uma diferença considerável seja constatada na comparação entre as grandezas medidas e calculadas pelo método proposto pode-se considerar o ponto de medição como sendo passível de verificações mais detalhadas por parte das concessionárias de energia. O método foi aplicado a dois sistemas, sendo um de média e outro de baixa tensão e em ambos os casos o mesmo apresentou resultados satisfatórios, possibilitando a identificação da barra do sistema em que houve fraude como uma das barras suspeitas mesmo na presença de erros na leitura de tensão das barras do sistema. Assim, o Método QV se constitui mais uma ferramenta útil no combate ao problema recorrente das perdas não técnicas nos sistemas de distribuição de energia elétrica.

Palavras-chave: Perdas não técnicas, Sistema elétrico de distribuição, Medidores Inteligentes, Método QV.

Abstract

This specific work is inserted in a context in which the electrical power distribution system is facing the challenge of increasing its efficiency by reducing the non technical losses. Those losses are due, mainly, to fraud in consumption measuring system. Taking advantage of the recent scientific development, which has made possible the creation of smart meters, this work proposes an alternative method that perform power flow calculus. This method is able to calculate the power that is supposed to be measured at that consumption spot based on reactive power (Q) and voltage (V) measured at this point. If any substantial difference is found when comparing the quantities measured and calculated by the proposed method the point in which the analysis is being made can be declared liable of a deeper analysis performed by the energy utility. The proposed method was applied in two systems, one of low and another of medium voltage and in both cases the method produced satisfactory results, allowing the identification of the systems bus where the fraud occurred as one of the suspicious buses even in the presence of voltage measurement errors at that same bus. Thus, the QV Method is an additional tool that can be useful in order to face the recurrent problem of the non technical losses in electrical power distribution systems.

Key-Words: Non technical losses, Electrical power distribution system, Smart Meters, QV Method.

Lista de Figuras

Figura 1 – Sistema 2 Barras	41
Figura 2 – Sistema Elétrico (Média Tensão) – Aplicação do Método QV	45
Figura 3 – Sistema Elétrico (Baixa Tensão) [16] – Aplicação do Método QV	59

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Dados Iniciais – Sistema de Média Tensão	46
Tabela 2 – Dados Iniciais – Método QV	46
Tabela 3 – Resultado Método de Newton Raphson.....	47
Tabela 4 – Resultado Método QV	47
Tabela 5 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10.....	49
Tabela 6 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (180kW)	50
Tabela 7 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (160kW)	50
Tabela 8 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (140kW)	51
Tabela 9 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (120kW)	51
Tabela 10 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (100kW)	52
Tabela 11 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (80kW)	52
Tabela 12 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (60kW)	53
Tabela 13 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (40kW)	53
Tabela 14 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (20kW)	54
Tabela 15 – Desvios de potência – Erro de leitura de tensão de 0,1%	55
Tabela 16 – Desvios de potência – Erro de leitura de tensão de 0,5%	55
Tabela 17 – Desvios de potência – Erro de leitura de tensão de 1%	56
Tabela 18 – Desvio de potência – Fraude na Barra 5, com erro na leitura de tensão da barra 5 de 0,5%	57
Tabela 19 – Desvio de potência – Fraude na Barra 10, com erro na leitura de tensão da barra 5 de 0,5%	57
Tabela 20 – Desvio de potência – Fraude na Barra 5, com erro na leitura de tensão da barra 5 de 1%	58
Tabela 21 – Desvio de potência – Fraude na Barra 10, com erro na leitura de tensão da barra 5 de 1%	58
Tabela 22 – Dados Iniciais – Sistema de Baixa Tensão	60
Tabela 23 – Desvio de potência – Fraude na Barra 8, com erro na leitura de tensão da barra 2 de 0,5%	62
Tabela 24 – Desvio de potência – Fraude na Barra 13, com erro na leitura de tensão da barra 2 de 0,5%	63

Tabela 25 – Desvio de potência – Fraude na Barra 21, com erro na leitura de tensão da barra 2 de 0,5%	64
Tabela 26 – Desvio de potência – Fraude na Barra 8, com erro na leitura de tensão da barra 2 de 1%	65
Tabela 27 – Desvio de potência – Fraude na Barra 13, com erro na leitura de tensão da barra 2 de 1%	66
Tabela 28 – Desvio de potência – Fraude na Barra 21, com erro na leitura de tensão da barra 2 de 1%	67
Tabela 29 – Dados do Sistema de Média Tensão	75
Tabela 30 – Potências Ativa (P) e Reativa (Q) – Sistema de Média Tensão.....	76
Tabela 31 – Dados do Sistema de Baixa Tensão	77
Tabela 32 – Potências Ativa (P) e Reativa (Q) – Sistema de Baixa Tensão.....	78

Introdução

Nos últimos anos, observa-se que o sistema elétrico em geral tem passado por diversas mudanças, decorrentes, principalmente, da privatização no setor elétrico. Nesse novo contexto, as concessionárias de energia têm visado aumentar sua eficiência em todos os aspectos, sejam eles técnicos ou financeiros, de forma a garantirem maiores receitas provenientes da otimização da operação e do planejamento do sistema elétrico como um todo [1]. Deste modo, o cálculo das perdas de energia em sistemas de distribuição de energia elétrica tem se tornado uma preocupação constante das concessionárias distribuidoras, uma vez que se trata de uma medida do quão eficiente está a rede elétrica, além de ser uma energia não contabilizada no faturamento [2]. Assim, tais perdas representam um entrave ao desenvolvimento do sistema elétrico uma vez que o prejuízo financeiro provocado por estas impede a realização de investimentos para melhoria e ampliação da rede elétrica. Além disso, a presença de perdas no sistema implica a necessidade de aumento na quantidade de energia gerada para abastecer uma carga que se encontra em constante crescimento [3].

Vale ressaltar que as perdas elétricas são comumente definidas como a diferença entre a energia gerada e a energia consumida pelas cargas. As perdas podem ser então subdivididas em perdas técnicas e perdas não técnicas. As perdas técnicas são aquelas devidas ao processo de transmissão e distribuição de energia, uma vez que ocorrem nos transformadores, alimentadores e demais equipamentos ligados à própria rede de distribuição. Já as perdas não técnicas são aquelas relacionadas à energia que foi consumida sem ser faturada pela concessionária de energia [4]-[6].

Os motivos que contribuem para as perdas não técnicas são vários e se encontram citados a seguir:

- Medidores com erros de leitura além do considerado admissível e isoladores com problemas [7], situações devidas à degradação natural destes instrumentos e falta de manutenção correta no sistema de distribuição de energia elétrica.
- Alterações intencionais nos medidores que, portanto, leem um consumo de energia abaixo do que realmente foi consumido pela carga.
- Roubo de energia através de ligações ilegais à rede elétrica antes do ponto de medição de energia.
- *By-pass* nos medidores realizados com a finalidade de burlar as taxas relativas ao real consumo de energia.

- Práticas ilegais por parte dos funcionários das próprias concessionárias de energia que adulteram as leituras de energia de alguns consumidores que são beneficiados e, em troca, lhes propõem alguma quantia em dinheiro.

Pode-se afirmar que a causa primordial das perdas não técnicas presentes atualmente no sistema elétrico de distribuição são as fraudes [8], sendo estas classificadas como uso, ou alteração, ilegal das ligações de energia com a finalidade de que o consumo real não seja faturado em sua totalidade pela concessionária de energia [9].

Nessa conjectura, o desenvolvimento de métodos de identificação, determinação, análise e mitigação das perdas não técnicas tem se tornado uma necessidade importante nos sistemas de energia elétrica como um todo. Estudos têm surgido a todo instante com o objetivo de melhorar e intensificar o combate às perdas não técnicas de energia, através da identificação dos locais em que estas ocorrem.

Para tanto, linhas de pesquisas têm se baseado em métodos diversos. Pode-se notar um forte uso de técnicas que se baseiam no histórico de consumo medido pelas concessionárias e, a partir deste, são capazes de identificar padrões de comportamento nos perfis de carga que se relacionam com atividades ilegais e ocorrência de perdas não técnicas.

Recursos como Redes Neurais Artificiais (RNAs), Máquinas de Vetores de Suporte (MVS), Floresta de Caminhos Ótimos (FCO), Métodos Estáticos, Árvores de Decisão, Conhecimento Descoberto em Base de Dados e Classificadores Múltiplos [9] têm sido amplamente utilizados na tarefa de identificar dos consumidores suspeitos de fraudes, de forma a direcionar as ações e investigações de campo realizadas pelas concessionárias distribuidoras.

Geralmente, as concessionárias utilizam métodos eficientes para o cálculo preciso das perdas totais e perdas técnicas do sistema para em seguida determinar as perdas não técnicas [2]. No entanto, é preciso também identificar e localizar as principais fontes ou causas das perdas não técnicas. A execução desta difícil tarefa tende a ser facilitada com as perspectivas da instalação massiva de medidores inteligentes nas redes de distribuição de energia elétrica. Tais medidores serão capazes de medir tensão, potência ativa e reativa, e energia em curtos intervalos de tempo, além de permitir comunicação com uma central de informação. Logo, este desenvolvimento tecnológico tem impulsionado o desenvolvimento de métodos avançados de identificação e cálculo de perdas não técnicas e que não fazem uso de históricos de consumo, isto é, métodos para o cálculo direto das perdas não técnicas. Um exemplo disso pode ser observado em [10], em que medidores instalados

nas redes secundária e primária são empregados para detectar a ocorrência de perdas não técnicas, especialmente aquelas relativas ao roubo de energia elétrica. Nesse trabalho, grandes diferenças observadas entre o valor de energia medido por um medidor instalado na rede primária e a soma do valor de energia dos medidores instalados na rede secundária indicam a ocorrência de roubo de eletricidade. Os resultados são satisfatórios e permitem indicar uma região em que ocorre o roubo de energia, embora não seja possível saber qual consumidor cometeu a fraude.

1.1 Objetivos

Este trabalho tem o objetivo de contribuir para a identificação e cálculo de perdas não técnicas em um contexto futuro, marcado pela ampla presença de medidores inteligentes, por meio um método alternativo de cálculo de fluxo de potência.

O tema abordado neste estudo é de suma importância para a boa operação dos sistemas de energia elétrica, visto que a presença de perdas reduz a eficiência dos sistemas de transmissão e distribuição de energia e os prejuízos provenientes dessa ineficiência são suficientemente grandes a ponto inviabilizar investimentos em melhoria e expansão das redes elétricas, o que faz com que a concessionária seja prejudicada no mercado de energia.

Adicionalmente, a ideia deste trabalho consiste em conciliar as funcionalidades advindas dos medidores inteligentes no processo de identificação e cálculo das perdas não técnicas. Logo, busca-se aproveitar os recursos tecnológicos que estarão disponíveis em um futuro próximo para resolver um problema recorrente das redes de distribuição de energia elétrica.

1.2 Estrutura do Documento

Este documento se encontra dividido da seguinte forma: Introdução (capítulo 1), que apresenta um breve resumo sobre a importância das perdas não técnicas no setor elétrico atual assim como objetivos do trabalho e estrutura do documento; Cálculo de Perdas em Sistemas de Distribuição (capítulo 2), que consta de um resumo das técnicas amplamente utilizadas no cálculo e identificação das perdas não técnicas; Método QV (capítulo 3), na qual será realizada a abordagem do cálculo do fluxo de carga a partir do método de Newton Raphson e formulação matemática do Método QV; Aplicação e Resultados (capítulo 4), que apresenta os processos de validação, aplicação e estudo de sensibilidade do Método QV, além de análise de desempenho do mesmo na presença de erros na leitura de tensão nas barras dos sistemas estudados e, por fim, Conclusões (capítulo 5), que apresenta

um resumo do que foi feito neste trabalho e de como o método proposto no mesmo se comportou nas simulações realizadas, bem como sugestões de trabalhos futuros.

2 Cálculo de Perdas em Sistemas de Distribuição

Estudos indicam que nenhum sistema elétrico se encontra totalmente imune com relação aos roubos de energia no sistema, e embora as perdas devidas ao roubo sejam pequenas em porcentagem, seus valores absolutos são altos em decorrência da grande quantidade de energia distribuída [3].

A partir do estudo apresentado em [3], pode-se afirmar que as perdas financeiras são críticas para várias companhias de energia e resultam em falta de recursos para investimento em melhorias no sistema de energia, além de exigirem maior geração de energia para suprir a demanda de carga.

A emergência deste assunto tem se tornado evidente devido às novas tendências no setor elétrico. Até então, alguns países possuíam um sistema elétrico baseado em monopólios estatais, nos quais a eficiência e lucro não eram tratados com a devida importância. Contudo, com a atual tendência de privatização dos sistemas elétricos, novas medidas devem ser adotadas visando garantir a eficiência dos mesmos e a otimização dos lucros.

Nesse contexto, o Banco Mundial e a Transparência Internacional têm sido os principais agentes promotores de gerenciamentos eficientes de setores privados ou públicos que prestam serviços essenciais à população. Além disso, o desenvolvimento de uma sociedade consciente e com senso crítico tem levado a questionamentos com relação à qualidade dos serviços prestados e exigido transparência na operação de organizações burocráticas.

Outro fator apontado como responsável por parte da energia gerada não ser revertida em lucro é a ineficiência e práticas administrativas do sistema elétrico [3]. O próprio sistema elétrico consome parte da energia gerada para seu funcionamento, isto é, iluminação e manutenção das subestações e instalações elétricas. Essa parcela de energia representa cerca de 2% a 6% no total de energia gerada. Adicionalmente, a energia é dissipada nos processos de transmissão e distribuição ao fluir por transformadores e linhas de transmissão. Sendo assim, quanto menores e melhores as linhas de transmissão, menores serão as perdas técnicas dos sistemas elétricos. Políticas gerenciais como energia não tarifada também prejudicam a receita arrecadada com a energia do sistema, uma vez que diversos órgãos governamentais e pessoas que trabalham no sistema elétrico não pagam pela energia consumida devido a acordos que preveem que o fornecimento de energia seja gratuito para grupos específicos de consumidores.

A fim de facilitar a compreensão do estudo apresentado neste trabalho, faz-se imprescindível delinear os termos relacionados às possíveis origens das perdas não técnicas de energia elétrica. Desta

forma, é importante destacar que os tipos de perdas não técnicas de energia que prevalecem no sistema elétrico são divididos em quatro categorias [3]. São elas:

- Fraude

É caracterizada quando o consumidor tenta enganar a concessionária de energia adulterando o medidor de energia. Assim, o consumo mostrado é menor que o real.

- Roubo

Ocorre quando uma linha do sistema elétrico é ligada diretamente à carga, sem passar pelo medidor. É considerada uma situação corriqueira em diversos países, principalmente em áreas residenciais pobres.

- Faturamentos Irregulares

Amplamente difundido, diversos comportamentos condenáveis têm permitido que a eletricidade utilizada por certos consumidores não seja paga. Tais comportamentos são difíceis de detectar, pois são devidos a posturas ilegais por parte dos empregados das concessionárias de energia, sejam eles os agentes medidores de energia (ou leituristas) ou parte da equipe administrativa, que aceita quantia em dinheiro em troca de alterações nas medições e nas faturas de energia. Assim os consumidores pagam contas menores e os empregados recebem dinheiro por isso.

- Contas não pagas

Alguns sistemas ao redor do mundo apresentam casos críticos de inadimplência nas contas de energia elétrica, isso ocorre por parte dos mais abastados financeiramente e por algumas pessoas com grande influência política. Além disso, diversos setores e agências do próprio governo se encontram frequentemente entre os consumidores providos de energia gratuitamente devido a acordos estabelecidos entre estes e as concessionárias de energia.

O roubo de energia pode ser estimado, mas não mensurado exatamente. Para isso, o método comumente aplicado leva em conta o cálculo e análise das perdas nos setores de transmissão e distribuição de energia. Este método se baseia na diferença entre a energia gerada pelo sistema e a energia medida e vendida aos consumidores. Se for realizado um cálculo das perdas nas linhas de transmissão percebe-se que as perdas devidas aos roubos correspondem à parcela de energia que não

foi contabilizada [3]. Contudo, este método ainda é um tanto impreciso para estimar roubos de energia e não inclui a parcela de energia que não é paga [3].

Nesse cenário, tornou-se importante a compreensão e entendimento da administração como um fator importante no estudo dos padrões de desenvolvimento social, econômico e político. Isso se deve ao fato dos roubos de energia estarem relacionados a uma cultura de boa ou má administração. Segundo [3] pode-se concluir que países com altos índices de perdas em transmissão e distribuição (T&D) possuem um estado de direito fraco, sendo marcados por instabilidade política, ineficácia do governo e frequentes casos de fraudes e corrupção na administração do país.

Alguns consumidores afirmam que a maioria das concessionárias de energia oferecem serviços de baixa qualidade, possuem altos lucros e, sendo assim, o roubo de energia não seria tão prejudicial a estas. Por outro lado, outros defendem a ideia de que se deve combater o roubo de energia pelo único fato de este ser um crime, e, portanto, passível de punição [3].

Contudo, as consequências do roubo de energia vão além do prejuízo financeiro às concessionárias de energia, visto que a soma dos roubos de energia e contas não pagas contribuem para que as concessionárias operem com perdas altas, o que impede que essas prestem um serviço de qualidade e abasteça uma carga que cresce de modo acelerado a cada dia.

Embora possuam valores percentuais baixos em países cujos sistemas de energia apresentam alta eficiência, as perdas de energia apresentam altos valores financeiros. Um dos piores casos aconteceu na Índia nos anos de 1996/97, país marcado por conflitos sociais e pobreza, quando os roubos de energia e contas não pagas alcançaram patamares de tal forma elevados que apenas três concessionárias tiveram lucro e as perdas comerciais foram de aproximadamente US\$1,6 bilhões. As concessionárias não conseguiram pagar suas contas ao governo e o sistema elétrico como um todo ficou à beira de um colapso durante uma década, o que afastou até mesmo os possíveis investidores do campo de energia elétrica [3].

Mesmo que o roubo de energia não possa ser erradicado em sua totalidade, esforços tecnológicos e gerenciais podem fazer com que os índices de roubo sejam reduzidos a uma faixa tolerável. O primordial no combate ao roubo de energia é o conhecimento e estudo detalhado desse problema. A análise realizada deve fornecer detalhes sobre a natureza e grandeza do roubo de energia, sem os quais quaisquer tentativas de combate aos mesmos tendem a apresentar baixa eficácia. Desta forma, é possível adotar a melhor estratégia no combate ao problema do roubo de energia, isto é, a

ação mais adequada a cada caso. Assim, apresentam-se a seguir algumas propostas e iniciativas encontradas na literatura técnica que visam combater as perdas não técnicas, mais especificamente, aquelas relacionadas a fraudes.

2.1 Técnicas atuais para combate às Perdas Não Técnicas (PNTs)

No trabalho [3] são apontados métodos de naturezas distintas para lidar com o problema do roubo de energia elétrica, são eles: métodos tecnológicos, gerenciamento e mudanças no sistema.

No campo tecnológico, o aspecto abordado está ligado às várias inovações tecnológicas que têm ocorrido no ramo de energia elétrica, contudo muitos sistemas de energia ainda não se apropriaram desses avanços técnicos e, por isso, não dispõem de alguns benefícios presentes em sistemas que possuem essas tecnologias já inseridas na rede elétrica. Para a redução de perdas em transmissão e distribuição (T&D) são necessários investimentos que devem visar à melhoria nas linhas de transmissão, transformadores, e, principalmente, instalação e manutenção de sistemas modernos de medição, que não permitem qualquer tipo de alteração por parte de usuários mal-intencionados. Embora sejam caros, tais medidores representam uma forte arma no combate aos roubos de energia.

Já no que diz respeito ao gerenciamento do sistema, a corrupção foi apontada como sendo uma das áreas mais problemáticas para as organizações do ramo de energia visto que, neste caso, o roubo de energia ocorre com a conivência dos próprios operários do sistema elétrico. Além disso, alguns funcionários extorquem quantias em dinheiro para não divulgarem as práticas ilegais dos usuários. Sendo assim, é importante ressaltar que uma das medidas a ser adotada no combate a corrupção neste setor é o pagamento em dia dos funcionários, para que estes não recorram a práticas ilegais (suborno) como fonte de renda.

É interessante notar que quanto menor a interface ou contato entre os empregados do setor elétrico e os consumidores, melhor seria o gerenciamento e a coordenação do sistema elétrico a partir de um escritório central. Concomitantemente, esta medida poderia diminuir o índice de fraudes que ocorrem por práticas ilegais dos empregados, tais como alteração nos valores de energia consumida.

O aspecto legal referente ao roubo de energia também deve ser observado. Em alguns países, esta prática é tratada com certa leveza, como um crime qualquer e com punições brandas. Já em outros países, como na Índia, o roubo de energia é tratado como um crime especial, passível de punição severa que inclui reclusão de até cinco anos e multas com altos valores. Novas leis, como essa, tornam

mais fácil a punição pelo ato de roubar energia e, juntamente com as multas, impõem dificuldades a roubos futuros.

Outra face deste problema está no não pagamento das contas. Este aspecto é de extrema dificuldade posto que o raciocínio de “sem pagamento, sem produto” não é comumente aceito em diversos países, chegando a beirar a violência física e ameaças de morte caso os empregados da concessionária desligassem o fornecimento de energia, caso ocorrido na Albânia [3]. Sendo assim, estratégias como cobrança terceirizada e disponibilidade de vários métodos de pagamento são bem-vindas e podem ajudar a solucionar este impasse.

No âmbito de mudanças no sistema, verificou-se que há a necessidade de regulamentação do setor, o que já fez com que, em todo o mundo, diversas comissões independentes surgissem como órgão regulador do setor elétrico e discutissem questões como quais são os níveis de roubo de energia aceitáveis para as concessionárias, se estas podem ou não repassar o prejuízo com o roubo de energia e ineficiência aos clientes, e quais as sanções aplicáveis caso as concessionárias não atingissem as metas para redução de perdas técnicas e não técnicas (roubos).

Evidentemente, os roubos de energia têm sido responsáveis por grandes perdas financeiras em diversos países, sendo que em alguns desses tais perdas têm levado o sistema elétrico a fortes crises econômicas. Isto impede que investimentos em manutenção e aumento da capacidade do sistema sejam aplicados, dificultando pagamentos de empréstimos e salários, além de ocasionar aumento nas tarifas de energia.

O problema das perdas de energia pode ser combatido mediante a adoção de um conjunto de medidas técnicas e administrativas que, juntas e devidamente aplicadas, podem aumentar a eficiência do sistema. Destaca-se o fato de que tais medidas devem ser adotadas com base em um conhecimento profundo e específico de cada sistema elétrico assim como da natureza do problema referente ao roubo de energia.

Neste trabalho, o foco está nos meios tecnológicos de combate às perdas não técnicas de energia (PNTs). Diversos estudos têm surgido com a finalidade de empregar conhecimento técnico na solução do impasse das perdas devidas, principalmente, a furtos de eletricidade da rede elétrica. Alguns métodos são pouco aplicáveis à conjectura atual do sistema elétrico como um todo, pelo fator de exigirem esforços acima do que as concessionárias de energia podem realizar. É o caso apresentado em [11]. Nesse trabalho, os autores propõem o combate às perdas não técnicas de energia por meio

da modernização do sistema de distribuição. São apresentados equipamentos que podem melhorar o processo de medição de energia, tais como sistemas de conexão e desconexão que permitem os consumidores se conectar à rede de modo seguro. Adicionalmente, defende-se a substituição dos medidores eletromecânicos por medidores eletrônicos, o que permitiria uma leitura mais precisa, maior confiabilidade da mesma, além de maior durabilidade dos instrumentos, diminuindo o custo de manutenção. Entretanto todas as propostas apresentadas demandam ampla instalação e, para isso, há a necessidade de equipes compostas por operários que atuariam nas áreas em que fossem verificados altos índices de perdas não técnicas, uma vez que a implantação dessas melhorias em todo o sistema de distribuição se mostra inviável. Vale destacar o alto custo que essas estratégias representam para as concessionárias de energia e o tempo necessário para a implantação das mesmas. Observa-se que embora as medidas propostas possam ajudar na redução das perdas elétricas, os ônus relacionados a estas são altos, dificultando a implantação das mesmas.

Um dos conceitos mais bem aceitos no ramo de cálculo de perdas é o de separação do sistema elétrico em partes, pois permite estimar as perdas técnicas de forma detalhada e pontual, conforme o verificado em [7]. Com essa finalidade, o sistema de distribuição pode ser subdividido em alguns segmentos: transformadores de subestação, rede de média tensão, transformadores de distribuição, redes de baixa tensão, ramais de ligação, medidores de energia e outros (capacitores, isoladores, etc.). Nessa linha de pesquisa e no tocante aos métodos utilizados na determinação das perdas no sistema de distribuição, vale lembrar que as opções são várias. Porém verifica-se que quanto mais refinado o processo de cálculo, mais dados são necessários, ao passo que processos mais simplificados e rápidos exigem menor quantidade de dados. Tais processos são, naturalmente, menos exatos e podem ser melhor utilizados em algumas situações específicas.

Em se tratando dos métodos para cálculo direto das perdas técnicas para depois determinar as não técnicas, o artigo [7] propõe as alternativas apresentadas a seguir:

- Método *Bottom-Up*: utilizado quando há dados detalhados do sistema, bem como curvas de carga dos consumidores e demais informações relacionadas à rede de alimentação. Devido ao elevado grau de detalhamento das informações, esse método possibilita resultados precisos.
- Método *Top-Down*: utilizado quando não há certa quantidade de dados referentes ao sistema, tornando possível a obtenção de resultados rápidos, porém aproximados.

Sabendo da dificuldade que há em se obter informações detalhadas referentes ao sistema elétrico, pode-se constatar que o grande desafio consiste em obter uma metodologia que permita que o cálculo das perdas, técnicas e não técnicas, seja realizado com o mínimo de dados possível. A metodologia *Top-Down* mostrou-se uma boa alternativa no cumprimento dessa tarefa [7].

De forma um tanto quanto diferente do que foi apresentado em [7], diversos métodos de cálculo de perdas não técnicas surgiram nos últimos anos. Estes seguem basicamente as mesmas linhas gerais, diferindo entre eles apenas os métodos utilizados na análise dos dados coletados. O raciocínio, quase que padrão, presente nesses estudos se encontra primeiramente explicado em [1]. O artigo descreve novas técnicas que permitem a identificação de ocorrência das perdas não técnicas. O procedimento proposto se baseia nos dados usualmente coletados pelas concessionárias de energia, que permitem a identificação do perfil de consumo de energia dos diversos consumidores ligados à rede de distribuição. A partir desses dados inicia-se o processo de análise do comportamento dos perfis de carga medidos, cujas etapas de agrupamento, detecção e classificação são o alvo do estudo. No processo de agrupamento são criados vários grupos que reúnem as curvas de carga de um mesmo consumidor que apresentam características similares. Em seguida, as curvas são adequadas para que se estabeleça uma futura comparação entre estas. Após isso, são usados critérios como consumo nulo e parâmetros como dia da semana, feriados, média e desvio padrão para determinar se o consumidor em estudo segue um padrão de consumo normal ou se há evidências de comportamento anormal de consumo. Tais dados permitem a verificação de ocorrência ou não de perdas não técnicas. Os resultados do procedimento apresentado são satisfatórios, visto que este foi testado em três métodos computacionais. Dentre esses, o que mais se destacou foi o Naïve Bayes ao apresentar uma precisão de 98%.

A partir dos módulos apresentados em [2], outros meios de determinação e identificação das perdas não técnicas surgiram e se firmaram no setor elétrico. Alguns deles serão apresentados a seguir, juntamente com uma análise sobre seus benefícios e desvantagens. Um ponto comum entre esses procedimentos é a análise de perfis de carga. A partir de dados relacionados ao consumo de energia elétrica podem-se determinar estimativas de demanda de carga no sistema de distribuição e, assim, detectar qualquer comportamento anômalo da rede vinculado às atividades ilegais e às perdas não técnicas.

O artigo [8] propõe um tipo específico de análise do comportamento do consumo de energia elétrica, denominado Combinação de Perfis de Carga baseado em Perdas Não Técnicas. Evidencia-se como objetivo verificar os meios de detecção e previsão de ocorrência de perdas não técnicas no

sistema elétrico por métodos que identificam comportamentos atípicos nas curvas de cargas. O processo compreende etapas como Módulo de Perfil de Carga, composta por sub-etapas de determinação de parâmetros de comportamento, isto é, etapa de agrupamento das curvas de cargas baseado em características em comum, e de classificação destes perfis de curva de carga analisados. Na etapa de determinação de parâmetros, ou agrupamento, são levadas em consideração as condições da carga, tais como tipo de consumidor, nível de tensão, localização, clima e dias da semana. Já na etapa de classificação dos perfis analisados é realizada a verificação de como se comporta a curva de carga em questão. Os padrões atípicos são utilizados na identificação de variações que indicam a ocorrência de perdas não técnicas. Por fim, compara-se o perfil analisado com as referências utilizando séries temporais ou domínio da frequência. Caso seja observada alguma variação no perfil de carga semelhante aos padrões utilizados para as perdas não técnicas, pode-se entender que se trata de um consumidor suspeito de fraude. Contudo para a confirmação por meio deste método é necessário que se realizem investigações adicionais.

Ainda em [8], um método que pode ser visto como continuação do descrito no parágrafo anterior é apresentado. Trata-se do método de Previsão de Perdas não Técnicas Baseada em Coleta de Dados. Tal método utiliza perfis de carga que apresentam comportamentos normais e anormais como referência, para que o perfil em estudo seja comparado com os perfis de referência. Caso o comportamento em estudo seja atípico, o perfil de carga será investigado futuramente. Caso este seja comum, dá-se início a uma nova etapa de verificação e identificação dos denominados valores atípicos, que consistem em características que podem indicar a ocorrência de perdas não técnicas no perfil de carga analisado. Sendo confirmada a ocorrência de perdas não técnicas por parte da equipe de verificação, o perfil analisado é incorporado à base de dados para servir como parâmetro para as análises, de forma que o método fique cada vez mais aprimorado. Assim, o estudo possui seu foco na análise do comportamento do consumidor ligado à rede elétrica de forma que seja possível a constatação e previsão da ocorrência das perdas não técnicas, direcionando as equipes de inspeção.

Juntamente com a análise de perfis de carga, ferramentas computacionais têm aprimorado o processo de identificação de perdas não técnicas. Algumas mais evidentes na atualidade são as Máquinas de Vetores de Suporte, cuja aplicação pode ser constatada em [9]. Neste trabalho, apresenta-se um método computacional de detecção de perdas não técnicas de energia que se baseia na tecnologia de MVS e também em características observáveis no perfil de carga medido ao longo de 25 meses. Isso requer uma base de dados de tamanho considerável, porém existente nas concessionárias de energia. Além disso, o método possui capacidade de identificar apenas perfis de carga que possuem mudanças abruptas no padrão de consumo, o que limita sua atuação e constitui

um ponto negativo do processo referido. A base de dados passa por um filtro que elimina consumidores com consumo de 0 kWh ao longo dos 25 meses, que não estiveram presentes durante todo o período avaliado (consumidores registrados recentemente), assim como medições repetidas. Após isso, os dados são processados e analisados de forma que seja possível identificar padrões de consumo que se identificam com atividades relacionadas às perdas não técnicas. O modelo apresentado, juntamente com um sistema inteligente de detecção de fraude, foi testado em três cidades da Malásia e sua taxa de acerto foi de 53%. Assim, o método apresentado se mostrou pouco satisfatório em comparação com outros já expostos, com maiores margens de acerto na identificação de perdas não técnicas.

Dispositivos baseados em Redes Neurais Artificiais (RNAs), cuja principal ideia é simular de forma informatizada um neurônio biológico, com suas sinapses e impulsos, têm despontado como alternativas promissoras. Um deles, desenvolvido no Brasil e apresentado em [4] já tem auxiliado concessionárias a combaterem as fraudes no sistema elétrico. O sistema inteligente de detecção de pontos potenciais de perdas não técnicas desenvolvido é denominado *FraudInspector*. O método baseia-se na utilização de RNAs treinadas com amostras de dados provenientes da concessionária Manaus Energia. Os fatores escolhidos e considerados na análise dos perfis de consumo foram: demanda medida, demanda contratada, fator de carga e potência instalada. As leituras utilizadas foram mensais. O sistema desenvolvido analisa os dados de entrada, citados anteriormente, e ao final do processo é capaz de indicar se o consumidor em estudo é ou não um possível fraudador. Os testes realizados mostraram que, dentre um total de 126 amostras de consumidores pertencentes a um tipo específico de classe industrial, o índice de acerto de consumidores classificados em potenciais fraudadores ou não, foi de 85,71%. Entretanto, vale ressaltar que dentre os casos que representavam a ocorrência real de fraudes, o sistema foi capaz de detectar corretamente apenas 33,33%. Esta porcentagem pode ser superada por novos métodos de identificação de perdas não técnicas.

Um exemplo de método com maior precisão em seus resultados pode ser visto em [5]. Trata-se de um método computacional de classificação denominado Floresta de Caminhos Ótimos que constitui uma ferramenta rápida na identificação e, conseqüentemente, no combate às perdas não técnicas de energia em sistemas de distribuição. O algoritmo apresentado se propõe a realizar o mesmo trabalho de métodos tradicionais como Redes Neurais Artificiais e Máquinas de Vetores de Suporte, porém de forma muito mais rápida. Para comparar os diversos classificadores e confirmar a exatidão e robustez do algoritmo proposto foram feitos testes cujo conjunto de exemplos era composto por 50% casos de treinamento e 50% de testes. O resultado foi que dentre os métodos testados (FCO, MSV-FBR (com Função de Base Radial), MVS-LINEAR – (com Função Linear), e RNA-PCM

(usando perfil de carga medido)) o FCO apresentou a precisão de 90,21%, semelhante à alcançada pelo método MVS-FBR, porém com o tempo 524 vezes menor do que este na fase de treinamento. Os testes foram realizados a partir de uma base de dados, fornecida por uma concessionária brasileira, composta de 736 perfis, sendo 116 consumidores ilegais e 620 consumidores com padrões normais.

Um passo a frente dos métodos discutidos anteriormente estão os chamados estimadores de carga. São dispositivos capazes de estimar com precisão a demanda de carga em certo ponto, prevendo assim o comportamento instantâneo do sistema, ainda que sem medições em tempo real. Um exemplo desses estimadores pode ser observado em [6], no qual é proposto um mecanismo de estimativa em tempo real da carga nos transformadores, denominado estimação de estado. Ao contrário dos métodos tradicionais de estimativas, baseados na capacidade dos transformadores ou no consumo de energia, o método proposto leva em consideração aspectos como a conexão entre o consumidor e o transformador, o tipo de consumidor, a fatura de energia, comportamento do consumo da carga e a leitura de energia de um ponto específico na rede de média tensão. Assim, podem-se verificar as perdas técnicas de energia em cada transformador, dentro de uma região considerada, utilizando um modelo matemático até que estas atinjam uma margem de erro inferior à delimitada pelo usuário. Dessa forma, é possível estimar a carga que flui por este transformador durante o período de tempo em que se quer observar o comportamento do mesmo. Nesta etapa, as perdas técnicas são sabidas e já consideradas no cálculo teórico da carga que flui pelo transformador. De posse das informações referentes ao quanto de energia, ou consumo, foi faturada em cada ponto de distribuição, compara-se este valor com o valor de energia entregue que foi estimado. Só então é possível observar qual transformador apresenta maior diferença entre esses valores, o que indica que estes são pontos onde a ocorrência de perdas não técnicas são maiores. O modelo foi aplicado e verificou-se um erro de menos de 6% quando os dados estimados foram comparados com dados de energia medidos no mesmo período em que ocorreu a aplicação do método. Portanto, constata-se que o modelo de estimador de estado apresentado representa um mecanismo de estimativa capaz de estimar as perdas não técnicas em cada transformador de forma eficiente, precisa e em tempo real. Uma limitação que deve ser ressaltada é a necessidade de uma base de dados sobre o histórico de consumo de energia. Assim, embora possa ser eficiente, esta técnica se torna refém de um conhecimento prévio. Contudo, essa tendência tende a ser erradicada com o avanço tecnológico e aplicação de novos medidores de energia.

É importante lembrar que o desafio deste trabalho de conclusão de curso consiste em conseguir atingir resultados confiáveis no que diz respeito à ocorrência das perdas não técnicas e localização das mesmas, porém sem o uso de uma base de dados histórica, isto é, em tempo real. Esta

meta pode ser atingida com o auxílio de medidores inteligentes, como já foi previsto em [12], que aponta a modelagem e estimativa de carga como auxílio na obtenção da demanda horária do transformador a partir das leituras mensais de consumo e ressalta que, no futuro, os medidores inteligentes poderão ser uma arma poderosa contra as perdas não técnicas. Técnicas baseadas nesta ideia permitem que as estimativas sejam comparadas com as medições realizadas nas subestações e auxilia na identificação de pontos em que a probabilidade de ocorrência de furtos de energia são maiores. Tais áreas são pontos que merecem atenção e, por isso, necessitam de investimentos como instalação de medidores inteligentes. Por fim, após a etapa de instalação dos medidores inteligentes, a comparação realizada entre a carga que foi estimada e a leitura direta do medidor certamente aumentaria a eficiência de ações que visam o combate às perdas não técnicas de energia, de forma a diminuir as perdas de energia e os prejuízos financeiros causados por estas. A ideia é factível e inteligente, pois permite e orienta a substituição gradual dos medidores presentes na rede elétrica de forma paralela ao combate às perdas não técnicas que, com a instalação dos medidores citados, poderão ser mais facilmente encontradas e, então, combatidas.

Tamanha utilidade dos medidores inteligentes, que compõem as denominadas redes inteligentes, se deve às suas muitas e promissoras funcionalidades. Seus potenciais são inúmeros e explicados com grande clareza em [10]. Tais equipamentos de alta tecnologia presente nas redes de infraestrutura avançada podem ser instalados em diversos pontos, tanto nos transformadores quanto nos próprios alimentadores, conforme a necessidade e planejamento realizado. Seus benefícios são diversos e inegáveis, dentre os quais se destaca sua utilidade no combate aos furtos de energia independente da forma como ocorrem. Isto é possível por meio de um raciocínio simples, baseado na diferença de energia elétrica medida entre pontos diferentes da rede elétrica. Como exemplo, tem-se que ao instalar um medidor inteligente em um transformador, este é capaz de medir o quanto de energia está sendo fornecida pelo mesmo para abastecimento das cargas. Assim, pode-se comparar essa quantia de energia com a soma das energias medidas pelos medidores instalados nas cargas (medidores de consumo instalados nas residências, por exemplo). Desta forma, a energia medida no transformador e fornecida por este deve ser aproximadamente igual ao somatório das leituras dos medidores instalados junto às cargas. Qualquer diferença entre essas quantias pode ser percebida e, quando acentuada, representa um furto de energia decorrente de alteração nos medidores ou ligações ilegais. Além disso, os medidores inteligentes possuem capacidade de comunicação com a central de comando da concessionária, permitindo a esta o controle e observação de todo o sistema de distribuição de energia.

Uma aplicação recente e de grande importância dos medidores inteligentes já é observada em [13]. Nesse trabalho um novo método de identificação e localização de perdas não técnicas foi desenvolvido a partir de medidores inteligentes presentes no sistema de distribuição de energia baseado na estimação de estado da rede de distribuição. Nesse contexto tecnológico, pode-se saber, quase que em tempo real, se há algum comportamento anômalo no sistema que pode indicar a presença de perdas não técnicas de energia. Além disso, o método permite localizar onde os possíveis furtos de energia estão ocorrendo, de forma a constatar os locais passíveis de investigação. Após a realização de testes com o método proposto verificou-se que, mesmo com um medidor defeituoso, o método possui estimativas próximas da carga real consumida, visto que os dados ruins são descartados no algoritmo do mesmo. No caso apresentado, as perdas não técnicas verificadas a partir do método proposto foram iguais a 4,09 kW enquanto que processos baseados no histórico de consumo de três semanas acusaram que as perdas não técnicas foram iguais a 25,37 kW. Uma vez que o método proposto foi capaz de apontar locais em que o perfil de carga apresenta comportamento anormal, seja em função de erros de medição ou devido à presença de perdas não técnicas, observou-se que o mesmo pode direcionar a investigação em campo e a auxiliar o combate as perdas não técnicas de energia com base nas novas tecnologias de medição inteligente.

Este capítulo mostrou a existência de inúmeras propostas para o cálculo das perdas não técnicas em sistemas de distribuição de energia elétrica. Pôde-se perceber que alguns métodos utilizam técnicas de inteligência artificial, outros empregam técnicas de estimação de estado e estimação de cargas e outros consideram a instalação de medidores inteligentes para a localização e determinação das perdas não técnicas. Nota-se então a importância desse tema no cenário mundial. Neste contexto, a proposta deste trabalho é utilizar um método de cálculo de fluxo de carga baseado no método de Newton-Raphson [14], considerando a existência de medidores inteligentes nos consumidores. Assim, este documento apresenta a formulação clássica do método de Newton-Raphson, a qual é abordada no próximo capítulo.

3 Método QV

O método desenvolvido neste estudo é denominado Método QV, pois se trata de uma variação do convencional método de Newton Raphson (NR), usado para cálculo de fluxo de carga, que utiliza um novo tipo de barra no sistema elétrico: barra QV. A criação deste novo tipo de barra só é possível devido à capacidade dos medidores inteligentes de coletarem os dados referentes à potência reativa e magnitude da tensão em cada barra em que estão instalados. Uma vez conhecidas a potência reativa e a magnitude da tensão nas barras QV do sistema, torna-se possível o cálculo das demais variáveis (ângulo da tensão, fluxo de potência ativa e reativa, potência ativa) cujos valores não são conhecidos.

Em um contexto em que as perdas não técnicas de energia têm se tornado um precioso objeto de estudo por parte dos pesquisadores é de suma importância ressaltar o principal fator causador das perdas não técnicas presentes atualmente no sistema elétrico de distribuição: as fraudes [8]. Estas, de acordo com [9], são classificadas como uso, ou alteração, ilegal das ligações de energia com a finalidade de que o consumo real não seja faturado em sua totalidade pela concessionária de energia.

É válido ressaltar que a maioria destas fraudes afeta a leitura da potência ativa consumida, o que dificulta a identificação das mesmas pelos métodos convencionais, baseados na leitura das potências ativa e reativa consumida. Diante desta realidade, a vantagem do método proposto se encontra no fato de que o mesmo parte da leitura da tensão e da potência reativa fornecida à carga. Assim, alterações na medição da potência ativa não constituem um obstáculo ao cálculo dos valores reais de potência consumida de modo que a eficiência do método não é significativamente afetada pelas alterações nesta grandeza. O método QV pode permitir, então, que as fraudes de energia sejam localizadas com maior exatidão e contribui no sentido de orientar as concessionárias de energia para a adoção das medidas apropriadas.

Com o objetivo de facilitar o entendimento do Método QV, propõe-se inicialmente uma explicação detalhada do método de NR, do qual o primeiro é oriundo.

3.1 Cálculo de Fluxo de Carga – Método de Newton Raphson (NR)

Atualmente, o método mais utilizado no cálculo de fluxo de carga em sistemas elétricos é o Método de Newton Raphson (NR). As barras são divididas em PV, quando são conhecidas as potências ativas e magnitude de tensão e desconhecidas a potência reativa e ângulo da tensão; PQ, quando os valores de potência ativa e reativa são conhecidos, sendo a magnitude e ângulo da tensão as variáveis desconhecidas; e V θ (barra de referência) em que se sabe a magnitude e ângulo da tensão na barra, apenas.

Uma vez conhecidas as variáveis cujos valores não são fornecidos para cada barra, no caso de uma barra PQ pode-se citar o ângulo e magnitude da tensão, torna-se possível o cálculo das demais variáveis da rede, que neste caso são potência ativa e reativa. Pode-se então calcular o fluxo de potência na rede elétrica.

As equações iniciais do fluxo de carga referentes à potência ativa e reativa podem ser diretamente deduzidas das Leis de Kirchhoff e são [14]:

$$P_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (g_{km} \cos \theta_{km} + b_{km} \sin \theta_{km}) \quad (1)$$

$$Q_k = V_k \sum_{m \in K} V_m (g_{km} \sin \theta_{km} - b_{km} \cos \theta_{km}) \quad (2)$$

Sendo:

- P: potência ativa da barra
- Q: potência reativa da barra
- V: magnitude da tensão da barra
- θ : ângulo da tensão da barra
- g: a condutância do trecho da linha de transmissão em questão
- b: a susceptância do trecho da linha de transmissão em questão
- k=1,..., NB; um índice indicativo da barra referida, em que NB é o numero de barras do sistema em estudo.
- m: índice indicativo da qual barra referida, assim como k.

Em seguida, encontram-se as equações de fluxo de potência entre as barras:

$$P_{km} = V_k^2 g_{km} - V_k V_m g_{km} \cos(\theta_{km}) - V_k V_m b_{km} \sin(\theta_{km}) \quad (3)$$

$$Q_{km} = -V_k^2 (b_{km} + b_{km}^{sh}) + V_k V_m b_{km} \cos(\theta_{km}) - V_k V_m g_{km} \sin(\theta_{km}) \quad (4)$$

Em que b_{km}^{sh} representa a susceptância shunt na linha. Como exemplo, pode-se entender que P_{12} representa o fluxo de potência ativa que vai da barra 1 a barra 2.

Para melhor entendimento, supõe-se um problema em que são dadas duas barras: uma PQ e outra V θ , que será resolvido adiante. Deseja-se saber os valores V e θ na barra PQ, para que, então, as demais variáveis possam ser calculadas.

Sendo que as expressões (3) e (4) são usadas para o cálculo do somatório de potência ativa e reativa, respectivamente, que fluem nas barras em questão deve-se impor que a diferença entre a potência especificada da barra e o somatório citado seja zero, como consta em (5) e (6).

Expressão válida para barras PQ e PV:

$$\Delta P_k = P_k^{esp} - V_k \sum_{m \in K} V_m (g_{km} \cdot \cos \theta_{km} + b_{km} \cdot \sin \theta_{km}) = 0 \quad (5)$$

Expressão válida para barras PQ:

$$\Delta Q_k = Q_k^{esp} - V_k \sum_{m \in K} V_m (g_{km} \cdot \sin \theta_{km} - b_{km} \cdot \cos \theta_{km}) = 0 \quad (6)$$

Deste modo, calculam-se as variáveis de interesse V e θ nas barras.

Como auxílio, define-se a função $g(x)$ como uma função vetorial do tipo:

$$g(x) = \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (7)$$

Sendo ΔP e ΔQ a forma vetorial de representações das injeções de potência ativa e reativa nas barras da rede elétrica e definidas como:

$$\Delta P = P^{esp} - P(V, \theta) \quad (8)$$

$$\Delta Q = Q^{esp} - Q(V, \theta) \quad (9)$$

Define-se ainda o vetor x como sendo aquele que contém as incógnitas a serem obtidas.

$$x = \begin{bmatrix} \theta \\ V \end{bmatrix} \quad (10)$$

As equações de (1) a (10) compõem um sistema de equações não lineares que podem ser resolvidas por meio de um processo iterativo denominado método de Newton Raphson.

3.1.1 Processo Iterativo: Método de Newton Raphson

Generalizando o processo de cálculo de fluxo de potência pelo Método de Newton Raphson, a seguir são definidas algumas funções e vetores cujos significados serão explicados e melhor entendidos posteriormente, porém de importância fundamental para a aplicação do NR.

Em um sistema n-dimensional, considera-se:

$$g(x) = 0$$

Sendo $g(x)$ uma função vetorial ($n \times 1$) e x o vetor que contém as incógnitas ($n \times 1$).

Matriz Jacobiana (J):

$$J = \frac{\partial g}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial g_1}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_1}{\partial x_n} \\ \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial g_n}{\partial x_1} & \dots & \frac{\partial g_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (11)$$

O vetor de correção (Δx) é calculado a partir da equação 12:

$$g(x^v) + J(x^v) \cdot \Delta x^v = 0 \quad (12)$$

Definidas essas funções torna-se possível a aplicação do método de NR, que será organizado em passos sequenciais para melhor compreensão.

Passo 1) Fazer $v = 0$ e partir de uma solução inicial adequada $x^v = x^0$.

Passo 2) Calcular $g(x^v)$.

Passo 3) Verificar a convergência de $|g_i(x^v)| \leq \varepsilon$, para $i = 1, \dots, n$. Caso haja convergência, o problema chegou ao final e a solução é dada pelo vetor x^v . Caso contrário, o processo continua.

Passo 4) Calcular J .

Passo 5) Calcular solução refinada x^{v+1} utilizando o vetor de correção Δx , que por sua vez é obtido da seguinte forma:

$$\Delta x^v = -[J(x^v)]^{-1} \cdot g(x^v) \quad (13)$$

Assim, a nova solução é:

$$x^{v+1} = x^v + \Delta x^v \quad (14)$$

Passo 6) Atribuir $v + 1 \rightarrow v$ e retornar ao passo 2.

3.2 Explicação do Método QV

O objetivo desta seção é explicar o funcionamento do método QV para a melhor compreensão de como o mesmo pode contribuir para a identificação do local e do montante das perdas não técnicas.

Na solução do fluxo de carga via método QV, o foco do problema se encontra na montagem da matriz Jacobiano (J) visto que neste ponto a formulação própria do método QV difere-se da usada no método NR.

Inicialmente, calculam-se os parâmetros do sistema necessários para a montagem da matriz impedância, responsável por caracterizar o sistema elétrico. Assim, a resistência (r_{km}) e reatância (x_{km}) da linha de distribuição devem ser fornecidas para que, a partir destes parâmetros, outros como condutância (g_{km}) e susceptância (b_{km}) possam ser obtidos conforme as expressões a seguir.

$$g_{km} = \frac{r_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (16)$$

$$b_{km} = \frac{-x_{km}}{r_{km}^2 + x_{km}^2} \quad (17)$$

Feito isso, os valores obtidos devem ser substituídos nas equações de potência reativa, que vão da expressão 1 à expressão 4.

O cálculo procede sendo que o ponto mais importante é relativo à obtenção da variação Δx , pois este vetor de correção permite que a solução inicial seja refinada e aproximada, de forma gradativa, ou seja, a cada iteração, até encontrar a solução final do problema.

Entretanto, esta etapa tem como cerne a equação:

$$g(x^v) = -J(x^v) \cdot \Delta x^v \quad (18)$$

Isso explica tamanha a relevância do cálculo do Jacobiano (J) para a solução do Método QV.

Acontece que o método proposto se distingue da formulação padrão do método de Newton visto que se trata de um procedimento válido para um novo tipo de barra no sistema elétrico. São as barras QV, que serão apresentadas na seção 3.2.1.

Assim, compara-se o Jacobiano aplicado a uma barra PQ, tipo de barra comumente encontrado nas formulações clássicas de fluxo de carga, com o mesmo aplicado a uma barra QV. O

Jacobiano pertinente ao primeiro caso está apresentado na expressão 19, enquanto que o pertinente ao segundo caso se encontra na expressão 20. Verifica-se, no segundo caso, a inexistência das derivadas da potência ativa (P) com relação a V ou θ , pelo fato de não se conhecer P, bem como a nulidade da derivada da potência reativa (Q) com relação a V, visto que esta tem seu valor fixo.

$$J = \frac{\partial g}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial P}{\partial V} & \frac{\partial P}{\partial \theta} \\ \frac{\partial Q}{\partial V} & \frac{\partial Q}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$J = \frac{\partial g}{\partial x} = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q}{\partial \theta} \end{bmatrix} \quad (20)$$

Logo, o Jacobiano que será pelo Método QV é composto por uma única matriz que representa apenas uma das quatro submatrizes, vistas na expressão 19, que compõem o Jacobiano próprio do Método de Newton Raphson convencional quando na presença de barras do tipo PQ. A submatriz útil na formulação no novo método é denominada M em [14] e que representa a derivada da potência reativa (Q) em relação à variável θ .

Deste modo, a equação 20 deve ser reescrita e utilizada dentro do processo iterativo do Método NR da seguinte maneira:

$$[\Delta Q^v] = \left[\frac{\partial Q}{\partial \theta} \right] \cdot [\Delta \theta^v] \quad (21)$$

3.2.1 Aplicação do Método QV em cálculo de fluxo de carga

A seguir, aplica-se o método de QV de cálculo de fluxo de carga ao sistema de 2 barras baseado em um sistema extraído de [14] e representado na Figura 1, com tolerância de convergência $\varepsilon = 0,00001$ p.u..

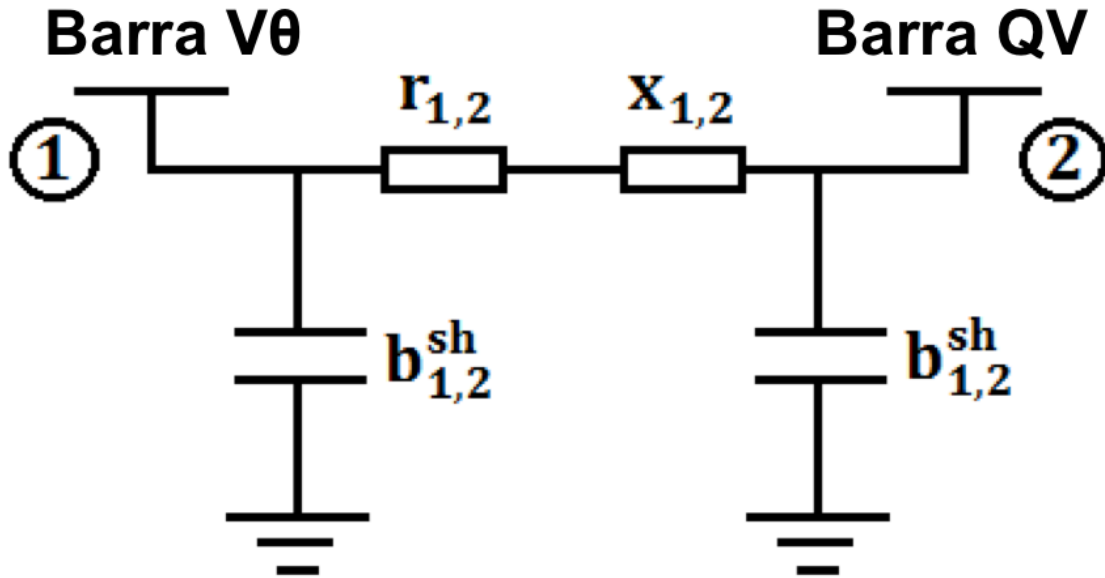


Figura 1 – Sistema 2 Barras

Os dados das barras são:

- Barra 1 (Tipo Vθ): P = Desconhecido, Q = Desconhecido, V = 1,05 p.u. e $\theta = 0,0$ grau
- Barra 2 (Tipo QV): Q = -0,008 p.u., V = 1,0485 p.u., P = Desconhecido e $\theta =$ Desconhecido

Os dados de linha são:

- Linha 1-2: r = 0,0992 p.u., x = 0,0285 p.u., $b^{sh} = 0,02$ p.u

Assim, os parâmetros e valores já fornecidos são: $Q_2^{esp} = -0,008$ p.u.; $V_1 = V^{esp} = 1,0485$ p.u.; $\theta_{21} = \theta_2 - \theta_1 = \theta_2$; $g_{21} = -9.3135$ p.u.; $b_{21} = 2.6776$ p.u.; $g_{22} = 9.3135$ p.u.; $b_{22} = -2.6776$ p.u..

Realizando a primeira iteração:

1. $v = 0$; $\theta_2^o = 0,0$ e $V_2^o = 1,0485$ p.u.
2. $Q_2^o(\theta_2^o, V_2^o) = -0,0041$ p.u.
Logo, $\Delta Q_2^o = -0,0039$ p.u.
3. $|\Delta Q_2^o| = -0,0039 > \varepsilon$
4. $J(\theta_2^o) = \left[\frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2^o} \right]^0 = -10,2539$

$$5. [\Delta Q_2^o] = \left[\frac{\partial Q_2}{\partial \theta_2^o} \right]^0 \cdot [\Delta \theta_2^o]$$

$$[-0,0039] = [-10,2539] \cdot [\Delta \theta_2^o]$$

$$[\Delta \theta_2^o] = [-0,0975] \cdot [-0,0039]$$

$$[\Delta \theta_2^o] = 0,000384$$

$$\theta_2^1 = \theta_2^0 + \Delta \theta_2^o$$

$$\theta_2^1 = 0 - 0,3839 \cdot 10^{-3}$$

$$\theta_2^1 = -0,3839 \cdot 10^{-3}$$

$$6. v = 1$$

No início da segunda iteração, verificou-se que o processo convergiu, pois:

$$|\Delta Q_2^o| = -2,17 \cdot 10^{-7} < \varepsilon$$

Portanto, o ângulo da tensão na barra QV é:

$$\theta_2^1 = \theta_2^0 + \Delta \theta_2^o = 0 - 0,3839 \cdot 10^{-3} = -0,3839 \cdot 10^{-3}$$

Sendo assim, o cálculo termina e o resultado foi o obtido ao término da primeira iteração:

$$\theta_2^1 = -0,3839 \cdot 10^{-3} \text{ graus}$$

Destaca-se que a tensão na barra QV é fixa. Portanto, seu valor permanece sendo:

$$V_2 = 1,0485 \text{ p.u.}$$

Com isso, demonstra-se o procedimento comumente utilizado para o cálculo de fluxo de potência por meio do Método QV.

3.2.2 Algoritmo para Aplicação do Método QV

Nesta seção, os procedimentos detalhados para aplicação do método QV em casos reais são apresentados pelos passos a seguir.

- Passo 1: Obter a topologia e os dados do sistema elétrico que se deseja analisar, identificando os pontos de carga e os medidores correspondentes.
- Passo 2: Modelagem do sistema elétrico compatível com a formulação do fluxo de carga QV;
- Passo 3: Para um determinado instante de tempo, armazenar as medidas de tensão, potência ativa e de potência reativa proveniente dos medidores instalados nas barras de carga;
- Passo 4: Tomar as medidas de tensão e de potência reativa das barras de carga e criar barras do tipo QV;
- Passo 5: Selecionar uma barra e defini-la do tipo V θ . Usualmente, escolhe-se a barra de subestação;
- Passo 6: Executar o fluxo de carga QV para obter o estado da rede;
- Passo 7: De posse do estado da rede elétrica, calcular a potência ativa em cada barra de carga;
- Passo 8: Comparar os valores de potência ativa calculados no Passo 7 com os valores de potência ativa armazenados no Passo 3;
- Passo 9: Indicar as barras em que foram observadas as maiores discrepâncias resultantes das comparações efetuadas no Passo 8. Estas barras são suspeitas de fraudes e devem ser investigadas com detalhes.

4 Aplicação e Resultados

4.1 Descrição do Sistema Elétrico adotado: Sistema de Média Tensão

Faz-se, nesta etapa, uma descrição dos sistemas elétricos escolhidos para a aplicação do Método QV. O sistema se baseia no padrão IEEE 13 barras [15], porém o mesmo foi modificado e simplificado para que apenas uma fase fosse considerada. Os dados utilizados para modelar o sistema elétrico de média tensão são apresentados no Apêndice A. O nível de tensão deste sistema é 4,16 kV e a potência aparente considerada foi de 10 MVA. Considera-se que há medidores inteligentes instalados em cada barra de carga do sistema e que eles são capazes de medir tensão, potência ativa e reativa. A figura 2 ilustra o sistema elétrico referido.

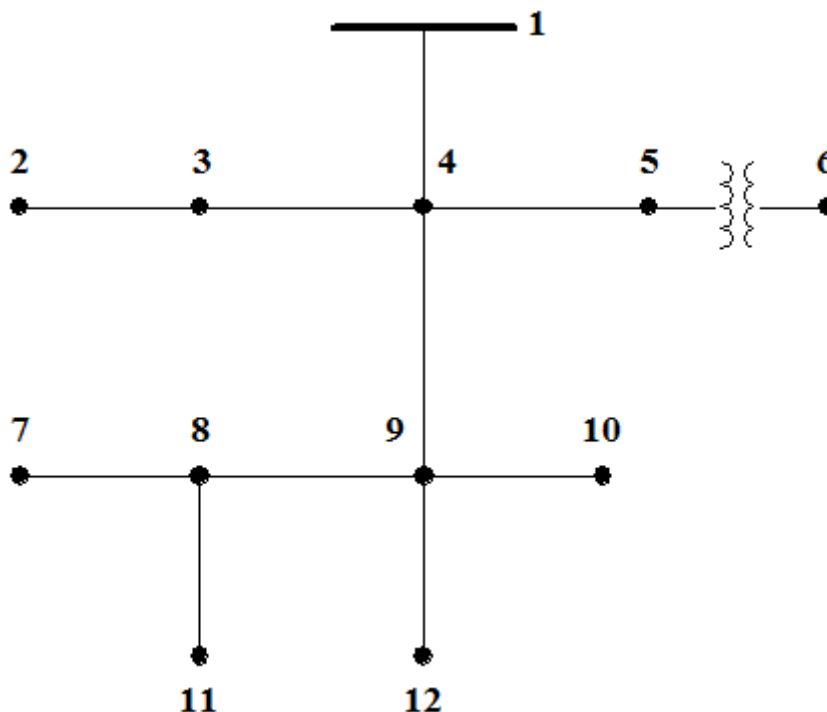


Figura 2 – Sistema Elétrico (Média Tensão) – Aplicação do Método QV

4.1.1 Validação do Método QV

No início, faz-se necessário o uso do Método de NR para o cálculo de fluxo de carga visando à obtenção do valor da potência reativa (Q) em cada barra. Este procedimento é necessário, pois os dados de tensão e potência reativa calculados nas barras serão usados como dados dos medidores no método QV. Os dados de potência do sistema são expostos na tabela 1.

Tabela 1 – Dados Iniciais – Sistema de Média Tensão

	P (kW)	Q (kvar)	V(p.u)	θ(rad)
Barra 1 (Tipo Vθ)	Desconhecido	Desconhecido	1,05	0
Barra 2 (Tipo QV)	230	132	Desconhecido	Desconhecido
Barra 3 (Tipo QV)	170	125	Desconhecido	Desconhecido
Barra 4 (Tipo QV)	100	58	Desconhecido	Desconhecido
Barra 5 (Tipo QV)	0	0	Desconhecido	Desconhecido
Barra 6 (Tipo QV)	400	290	Desconhecido	Desconhecido
Barra 7 (Tipo QV)	170	80	Desconhecido	Desconhecido
Barra 8 (Tipo QV)	0	0	Desconhecido	Desconhecido
Barra 9 (Tipo QV)	665	435	Desconhecido	Desconhecido
Barra 10 (Tipo QV)	750	350	Desconhecido	Desconhecido
Barra 11 (Tipo QV)	128	86	Desconhecido	Desconhecido
Barra 12 (Tipo QV)	0	0	Desconhecido	Desconhecido

Para a aplicação do Método QV para o mesmo sistema consideram-se apenas os dados referentes à potência reativa e tensão em cada uma das barras, obtidos por meio do Método de Newton Raphson. Para efeito de simulação, os valores de potências consumidos são tratados com sinal negativo, enquanto que os valores com sinal positivo se referem à potência gerada. Os dados usados na simulação do Método QV são expostos na tabela 2, com $S_{base} = 10MVA$.

Tabela 2 – Dados Iniciais – Método QV

	P (kW)	Q (kvar)	V (p.u)	θ (rad)
Barra 1 (Tipo Vθ)	Desconhecido	Desconhecido	1,05	0
Barra 2 (Tipo QV)	Desconhecido	-132	0,9867	Desconhecido
Barra 3 (Tipo QV)	Desconhecido	-125	0,9878	Desconhecido
Barra 4 (Tipo QV)	Desconhecido	-58	0,9911	Desconhecido
Barra 5 (Tipo QV)	Desconhecido	0	0,9875	Desconhecido
Barra 6 (Tipo QV)	Desconhecido	-290	0,9873	Desconhecido
Barra 7 (Tipo QV)	Desconhecido	-80	0,9526	Desconhecido
Barra 8 (Tipo QV)	Desconhecido	0	0,9531	Desconhecido
Barra 9 (Tipo QV)	Desconhecido	-435	0,9545	Desconhecido
Barra 10 (Tipo QV)	Desconhecido	-350	0,9501	Desconhecido
Barra 11 (Tipo QV)	Desconhecido	-86	0,9524	Desconhecido
Barra 12 (Tipo QV)	Desconhecido	0	0,9545	Desconhecido

O Método QV foi simulado pelo programa computacional MATLAB, versão R2013a (8.1.0.604). Espera-se que o procedimento proposto neste trabalho forneça os mesmos resultados que o método de Newton convencional proporciona, pois somente assim há a garantia de que o método é válido. Por isso, as tabelas 3 e 4 apresentam os resultados das simulações realizadas pelo Método de Newton Raphson e pelo Método QV, respectivamente. Em ambos os métodos, a tolerância utilizada foi de 0,00001 p.u., que significa 100W, neste caso.

Tabela 3 – Resultado Método de Newton Raphson

Barra	V (p.u.)	θ (rad)	P (kW)
1	1,05	0	2725
2	0,9867	-0,0468	-230
3	0,9878	-0,0465	-170
4	0,9911	-0,0457	-100
5	0,9875	-0,0472	0
6	0,9873	-0,0473	-400
7	0,9526	-0,0798	-170
8	0,9531	-0,0797	0
9	0,9545	-0,0793	-665
10	0,9501	-0,0795	-750
11	0,9524	-0,0795	-128
12	0,9545	-0,0793	0

Tabela 4 – Resultado Método QV

Barra	V (p.u.)	θ (rad)	P (kW)
1	1,05	0,0000	2725
2	0,9867	-0,0468	-230
3	0,9878	-0,0465	-170
4	0,9911	-0,0457	-100
5	0,9875	-0,0472	0
6	0,9873	-0,0473	-400
7	0,9526	-0,0798	-170
8	0,9531	-0,0797	0
9	0,9545	-0,0793	-665
10	0,9501	-0,0795	-750
11	0,9524	-0,0795	-128
12	0,9545	-0,0793	0

Ambos os métodos convergiram com três iterações cada um. Soma-se a isso o fato de que os resultados são satisfatórios, divergindo apenas devido a possíveis aproximações matemáticas.

4.1.2 Aplicação Método QV para detecção de PNTs

Nesta etapa é mostrada a aplicação do método QV em uma situação de perda não técnica de energia elétrica. Para considerar a fraude, criou-se a situação em que há roubo de energia elétrica na barra 10 do sistema apresentado na Figura 2. Será admitido que há um desvio de 200 kW. Assim, a potência ativa total demandada pela barra 10 será então 950 kW ($750 \text{ kW} + 200 \text{ kW}$), no entanto, o medidor associado a esta barra registrará apenas os 750 kW originais. Ressalta-se que embora o medidor não registre a potência real demandada pela barra 10, a informação da fraude reflete na tensão medida: o fraudador consegue fraudar a medição da potência ativa, mas não a da tensão. Logo, para aplicar o método QV neste documento a fim de verificar sua potencialidade, são necessárias duas etapas, descritas a seguir.

- **Etapla 1:** é necessário emular o comportamento do sistema elétrico. Assim, executa-se o cálculo de um fluxo de potência convencional (Newton-Raphson) considerando o desvio de potência ativa na barra 10, ou seja, a potência especificada nesta barra será de 950 kW. Os resultados obtidos referentes aos módulos das tensões nodais e às potências reativas nas barras de carga são empregados para alimentar o cálculo do fluxo de carga pelo Método QV – estas grandezas representam os valores registrados pelos medidores inteligentes em casos reais.

- **Etapla 2:** esta etapa é a aplicação do método QV propriamente dito, detalhada nos itens a seguir:

- Dispondo das informações de Q e V nas barras de carga, tratar as mesmas como barras do tipo QV;
- Considerar a barra de referência como barra do tipo V θ ;
- Calcular o fluxo de carga de acordo com a teoria do método QV para obter os ângulos das tensões nodais;
- Com os resultados obtidos, calcular as potências ativas em cada barra de carga;
- Comparar os valores de potência ativa calculados no passo anterior, com os valores de potência ativa especificados. Ressalta-se que estes valores especificados correspondem aos valores medidos pelos medidores inteligentes em situações reais;
- As barras que apresentarem diferenças de potência ativa significativas são consideradas barras suspeitas de fraude.

A tabela 5 apresenta os resultados da aplicação do Método QV no sistema elétrico em estudo, considerando a fraude na barra 10. Observa-se que o maior desvio verificado foi indicado na barra 10, confirmando a potencialidade do método QV em localizar a fraude de energia elétrica. Além disso, observa-se também a potencialidade do método em estimar o montante de potência ativa que foi desviado.

Tabela 5 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10

Barra	P (kW)	Desvio (kW)
2	-230	0
3	-170	0
4	-100	0
5	0	0
6	-400	0
7	-170	0
8	0	0
9	-665	0
10	-950	-200
11	-128	0
12	0	0

4.1.3 Estudo de Sensibilidade

Com objetivo de aprofundar o estudo com relação ao método proposto é realizada uma série de fraudes com valores gradativamente menores na barra 10 do sistema. Sendo assim, espera-se analisar o comportamento do método para fraudes menores, pois com este procedimento torna-se possível a determinação da sensibilidade do método com relação à quantidade de potência ativa que está sendo roubada.

A primeira situação de fraude leva em consideração uma fraude de 180kW na barra 10 do sistema em estudo. Posteriormente o valor da fraude é reduzido de forma gradativa de 20kW em 20kW até que o valor da fraude seja de apenas 20kW.

Para cada situação de roubo o resultado do cálculo realizado via método QV, juntamente com o desvio com relação à potência ativa especificada para cada barra, é apresentado na forma de tabelas (tabelas 6 a 14).

Tabela 6 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (180kW)

Barra	P (kW)	Desvio (kW)
2	-230	0
3	-170	0
4	-100	0
5	0	0
6	-400	0
7	-170	0
8	0	0
9	-665	0
10	-930	-180
11	-128	0
12	0	0

Tabela 7 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (160kW)

Barra	P (kW)	Desvio (kW)
2	-230	0
3	-170	0
4	-100	0
5	0	0
6	-400	0
7	-170	0
8	0	0
9	-665	0
10	-910	-160
11	-128	0
12	0	0

Tabela 8 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (140kW)

Barra	P (kW)	Desvio (kW)
2	-230	0
3	-170	0
4	-100	0
5	0	0
6	-400	0
7	-170	0
8	0	0
9	-665	0
10	-890	-140
11	-128	0
12	0	0

Tabela 9 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (120kW)

Barra	P (kW)	Desvio (kW)
2	-230	0
3	-170	0
4	-100	0
5	0	0
6	-400	0
7	-170	0
8	0	0
9	-665	0
10	-870	-120
11	-128	0
12	0	0

Tabela 10 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (100kW)

Barra	P (kW)	Desvio (kW)
2	-230	0
3	-170	0
4	-100	0
5	0	0
6	-400	0
7	-170	0
8	0	0
9	-665	0
10	-850	-100
11	-128	0
12	0	0

Tabela 11 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (80kW)

Barra	P (kW)	Desvio (kW)
2	-230	0
3	-170	0
4	-100	0
5	0	0
6	-400	0
7	-170	0
8	0	0
9	-665	0
10	-830	-80
11	-128	0
12	0	0

Tabela 12 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (60kW)

Barra	P (kW)	Desvio (kW)
2	-230	0
3	-170	0
4	-100	0
5	0	0
6	-400	0
7	-170	0
8	0	0
9	-665	0
10	-810	-60
11	-128	0
12	0	0

Tabela 13 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (40kW)

Barra	P (kW)	Desvio (kW)
2	-230	0
3	-170	0
4	-100	0
5	0	0
6	-400	0
7	-170	0
8	0	0
9	-665	0
10	-790	-40
11	-128	0
12	0	0

Tabela 14 – Resultado Método QV – Fraude na Barra 10 (20kW)

Barra	P (kW)	Desvio (kW)
2	-230	0
3	-170	0
4	-100	0
5	0	0
6	-400	0
7	-170	0
8	0	0
9	-665	0
10	-770	-20
11	-128	0
12	0	0

Ao término desta etapa observa-se que o método QV não apresentou perda significativa de exatidão no cálculo dos valores de potência ativa envolvidos na fraude, fato que confere ao método uma sensibilidade importante na identificação de suspeitas de fraude no sistema elétrico.

4.2 Análise de desempenho na presença de Erros Arbitrários de Tensão

Com o objetivo de verificar a eficácia da metodologia de identificação de PNT proposta mesmo na presença de erros de medição, situação inevitável em qualquer sistema elétrico, fez-se uma análise da eficiência do Método QV quando os mesmos se verificam em cada uma das barras que compõem o sistema de média tensão em estudo.

Nesta etapa do estudo deseja-se verificar a influência devida apenas aos erros na leitura de tensão sobre o resultado do método proposto, de forma a não considerar a ocorrência de fraudes nas barras do sistema. Para isso, o procedimento adotado consiste em aplicar, arbitrariamente, erros de 0,1%, 0,5% e 1% sobre o valor da tensão medida em cada barra e, então, verificar os desvios de potência resultantes da aplicação do Método QV. A simulação foi feita de forma que o erro é inserido, inicialmente, somente na barra 2 e, então, aplica-se o Método QV. Posteriormente, o erro é inserido somente na barra 3 e aplica-se, novamente, o Método QV. Este procedimento é realizado em todas as barras presentes no sistema, para cada valor de erro. Desvio de potência é o termo que se refere, neste trabalho, a diferença entre as potências obtidas para o caso base (sem erros inseridos na leitura de tensão), que representam as potências medidas pelos medidores inteligentes presentes no sistema, e as potências calculadas via Método QV na presença de erros arbitrários na leitura de tensão. Os desvios de potência presentes em cada barra do sistema em estudo são apresentados nas tabelas 15 a

17 em megawatts (MW) para os casos cujos erros na leitura de tensão são os citados no início deste parágrafo.

Tabela 15 – Desvios de potência – Erro de leitura de tensão de 0,1%

Local do erro na leitura de tensão – Erro 0,1%											
Barra	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,00	0,00	-0,15	-0,02	-0,02	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
2	0,34	-0,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	-0,34	0,54	-0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	-0,20	0,70	-0,23	0,01	0,00	0,00	-0,13	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	-0,24	4,85	-4,60	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	-4,59	4,61	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,62	-0,62	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,62	1,17	-0,31	0,00	-0,23	0,00
9	0,00	0,00	-0,11	0,00	0,00	0,00	-0,31	0,88	-0,21	0,00	-0,24
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,21	0,21	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,23	0,00	0,00	0,23	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-0,24	0,00	0,00	0,24

Tabela 16 – Desvios de potência – Erro de leitura de tensão de 0,5%

Local do erro na leitura de tensão – Erro 0,5%											
Barra	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-0,02	-0,03	-0,80	-0,61	-0,56	-0,03	-0,06	0,02	0,00	0,00	-0,04
2	1,69	-1,67	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	-1,68	2,71	-1,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,01	-0,99	3,57	-0,95	0,22	-0,01	-0,02	-0,68	0,00	0,00	-0,01
5	0,00	0,00	-1,19	24,48	-22,86	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	-22,82	23,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,14	-3,11	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-3,11	5,89	-1,56	0,00	-1,16	0,00
9	0,00	0,00	-0,56	0,00	0,00	0,02	-1,52	4,47	-1,04	0,00	-1,19
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,04	1,04	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,16	0,00	0,00	1,16	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-1,19	0,00	0,00	1,25

Tabela 17 – Desvios de potência – Erro de leitura de tensão de 1%

Barra	Local do erro na leitura de tensão – Erro 1%										
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	-0,08	-0,14	-1,76	-2,64	-2,51	-0,14	-0,23	-0,16	-0,01	-0,02	-0,18
2	3,40	-3,34	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	-3,34	5,46	-2,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,05	-1,93	7,30	-1,13	1,11	-0,04	-0,06	-1,36	0,00	-0,01	-0,05
5	0,00	0,00	-2,36	49,54	-45,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	-45,28	47,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	6,33	-6,21	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-6,21	11,87	-3,12	0,00	-2,31	0,00
9	0,00	0,00	-1,11	0,00	0,00	0,10	-2,94	9,12	-2,07	0,01	-2,33
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-2,08	2,09	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-2,32	0,00	0,00	2,34	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	-2,33	0,00	0,00	2,58

Verifica-se, com base na observação dos resultados, que em todos os casos os maiores desvios de potência ocorreram na barra onde há o erro na leitura de tensão, sendo assim estas sempre figuraram entre as barras suspeitas de fraude. Isto indica que as alterações nos valores de tensões provocaram desvios nas potências calculadas que, por sua vez, foram perceptíveis ao Método QV.

Vale destacar, também, que as maiores alterações nas potências devido aos erros na leitura de tensões foram observadas nas barras 5. O valor destoante de potência calculada na barra 5 pode ser considerado como um efeito particular do Método QV decorrente do efeito do erro na leitura de tensão na mesma. A grande variação observada, também, na barra 6 se deve ao fato de que a mesma se encontra muito próxima da barra 5.

4.2.1 Análise de Sensibilidade: Detecção de PNTs na presença de Erros Arbitrários de Tensão

Para testar a capacidade de detecção de fraudes via Método QV em situações em que há erros na leitura de tensões das barras do sistema, novas simulações foram feitas. Estas, por sua vez, consideram a presença dos erros citados juntamente com a ocorrência de fraude no sistema elétrico, o que caracteriza a presença de PNT. Uma vez que a exatidão do método proposto se mostrou mais vulnerável aos erros na leitura de tensão da barra 5, os casos testes simulados nesta parte do estudo abordam esta situação para que as conclusões sobre a sensibilidade do método sejam tiradas com base no pior caso apresentado.

Foram simuladas PNT de energia da ordem de 20, 40 e 60kW nas barras 5 e 10. Em todos os casos, foi considerado um erro na leitura da tensão da barra 5 da ordem de 0,5%. As tabelas 18 a 21 apresentam os resultados obtidos, sendo que o termo “desvio” representa a diferença entre as potências calculadas pelo Método QV na situação indicada e as potências medidas.

Tabela 18 — Desvio de potência — Fraude na Barra 5, com erro na leitura de tensão da barra 5 de 0,5%

Fraude na Barra 5							
PNT de 0kW		PNT de 20kW		PNT de 40kW		PNT de 60kW	
Barra	Potência Calculada (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)
1	2.117.202,38	1	23.094,75	1	46.195,36	1	69.301,88
2	-230.000,00	2	0,00	2	0,00	2	0,00
3	-170.000,00	3	0,00	3	0,00	3	0,00
4	-1.046.526,56	4	-1.246,39	4	-2.485,54	4	-3.717,46
5	24.478.719,33	5	-33.931,50	5	-67.885,35	5	-101.861,59
6	-23.216.725,11	6	12.555,05	6	25.131,15	6	37.728,33
7	-169.999,99	7	0,00	7	0,00	7	0,00
8	0,00	8	0,00	8	0,00	8	0,00
9	-664.999,96	9	0,00	9	0,00	9	0,00
10	-749.999,98	10	0,00	10	0,00	10	0,00
11	-128.000,00	11	0,00	11	0,00	11	0,00
12	0,00	12	0,00	12	0,00	12	0,00

Tabela 19 – Desvio de potência – Fraude na Barra 10, com erro na leitura de tensão da barra 5 de 0,5%

Fraude na Barra 10							
PNT de 0kW		PNT de 20kW		PNT de 40kW		PNT de 60kW	
Barra	Potência Calculada (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)
1	2.117.202,38	1	22.636,37	1	45.293,33	1	67.970,96
2	-230.000,00	2	0,00	2	0,00	2	0,00
3	-170.000,00	3	0,00	3	0,00	3	0,00
4	-1.046.526,56	4	-380,10	4	-756,01	4	-1.127,72
5	24.478.719,33	5	-11.721,06	5	-23.493,72	5	-35.318,20
6	-23.216.725,11	6	10.928,74	6	21.905,60	6	32.930,77
7	-169.999,99	7	0,00	7	0,00	7	0,00
8	0,00	8	0,00	8	0,00	8	0,00
9	-664.999,96	9	0,00	9	0,01	9	0,01
10	-749.999,98	10	-20.000,00	10	-40.000,00	10	-59.999,99
11	-128.000,00	11	0,00	11	0,00	11	0,00
12	0,00	12	0,00	12	0,00	12	0,00

Tabela 20 – Desvio de potência – Fraude na Barra 5, com erro na leitura de tensão da barra 5 de 1%

Fraude na Barra 5							
PNT de 0kW		PNT de 20kW		PNT de 40kW		PNT de 60kW	
Barra	Potência Calculada (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)
1	80.604,08	1	29.152,47	1	58.291,72	1	87.417,90
2	-230.000,00	2	0,00	2	0,00	2	0,00
3	-170.000,00	3	0,00	3	0,00	3	0,00
4	-1.234.123,16	4	-6.510,83	4	-12.988,57	4	-19.433,39
5	49.536.404,51	5	-48.426,57	5	-96.898,19	5	-145.414,95
6	-45.676.563,12	6	24.913,64	6	49.869,04	6	74.866,28
7	-169.999,99	7	0,00	7	0,00	7	0,00
8	0,00	8	0,00	8	0,00	8	0,00
9	-664.999,95	9	0,00	9	0,00	9	0,00
10	-749.999,98	10	0,00	10	0,00	10	0,00
11	-128.000,00	11	0,00	11	0,00	11	0,00
12	0,00	12	0,00	12	0,00	12	0,00

Tabela 21 – Desvio de potência – Fraude na Barra 10, com erro na leitura de tensão da barra 5 de 1%

Fraude na Barra 10							
PNT de 0kW		PNT de 20kW		PNT de 40kW		PNT de 60kW	
Barra	Potência Calculada (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)
1	80.604,08	1	26.362,12	1	52.739,39	1	79.131,97
2	-230.000,00	2	0,00	2	0,00	2	0,00
3	-170.000,00	3	0,00	3	0,00	3	0,00
4	-1.234.123,16	4	-3.718,87	4	-7.421,05	4	-11.106,58
5	49.536.404,51	5	-23.720,46	5	-47.545,35	5	-71.475,10
6	-45.676.563,12	6	21.686,47	6	43.468,41	6	65.346,23
7	-169.999,99	7	0,00	7	0,00	7	0,00
8	0,00	8	0,00	8	0,00	8	0,00
9	-664.999,95	9	0,00	9	0,01	9	0,01
10	-749.999,98	10	-20.000,00	10	-40.000,00	10	-59.999,99
11	-128.000,00	11	0,00	11	0,00	11	0,00
12	0,00	12	0,00	12	0,00	12	0,00

Atentando-se nas tabelas 18 a 21, percebe-se que nos casos em que o roubo de energia foi nulo as potências calculadas variaram, conforme esperado e explicado no item 4.2, devido ao efeito inerente ao erro na leitura de tensão na barra 5. Os desvios de potência são, posteriormente, calculados com relação aos valores de potências resultantes quando o valor de fraude é nulo. Somados os efeitos do erro na leitura de tensão na barra 5 com o da fraude simulada na mesma, percebe-se que em ambos

as situações simuladas (erro 0,5% e 1%), embora a potência calculada nesta barra não apresente a quantia roubada com exatidão, a mesma permite que a barra 5 seja identificada como suspeita de fraude. Este resultado permite que uma determinada distinção seja feita entre as barras, auxiliando na indicação dos locais passíveis de uma investigação mais detalhada a fim de se comprovar a ocorrência ou não de PNTs nestas. É importante atentar para o fato de que o efeito no cálculo da potência da barra 5 ocorrido quando o erro na leitura de tensão acontece na mesma não afeta a identificação das barras suspeitas de fraude.

Já quando o roubo de energia ocorre na barra 10, que é uma barra que possui potências (ativa e reativa) não nulas, os resultados obtidos pelo método em ambas as situações simuladas em estudo permitem a identificação da mesma como sendo uma barra suspeita, de forma correta e com precisão mínima do cálculo numérico de aproximadamente 0,01W, apresentada no caso de 60kW de perdas. Neste caso, o valor da potência calculada na barra 5 pode ser desprezado, visto que o mesmo não afeta o cálculo da potência consumida e dos desvios de potência na barra 10.

4.3 Descrição do Sistema Elétrico adotado: Sistema de Baixa Tensão

Com o objetivo de testar o Método QV em baixas tensões, um segundo sistema foi submetido ao mesmo. O sistema de baixa tensão, cuja rede secundária é utilizada neste estudo, é alimentado com um equivalente de rede de 100 MVA a 13,8kV e possui, logo em seu início, um transformador abaixador (13,8kV/0,22kV). A potência aparente adotada para a rede secundária foi de 100kVA. Este sistema se encontra representado na Figura 3 [16].

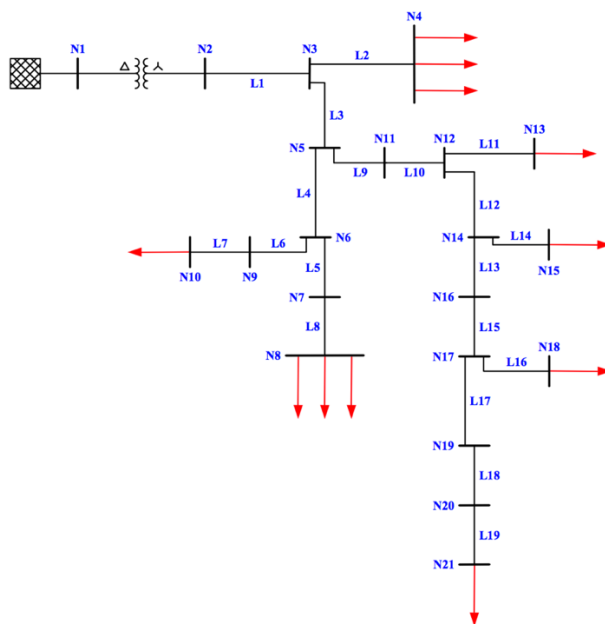


Figura 3 – Sistema Elétrico (Baixa Tensão) [16] – Aplicação do Método QV

O sistema em estudo foi também modificado para que apenas uma fase fosse considerada. Os dados utilizados para modelar o sistema elétrico são apresentados no Apêndice B. Considera-se, mais uma vez, que há medidores inteligentes instalados em cada barra de carga do sistema e que eles são capazes de medir tensão, potência ativa e reativa. Os dados utilizados para modelar o sistema elétrico de baixa tensão são apresentados no Apêndice B enquanto que os dados iniciais do sistema em questão se encontram na tabela 22.

Tabela 22 – Dados Iniciais – Sistema de Baixa Tensão

	P (W)	Q (VAr)	V(p.u)	θ(rad)
Barra N1 (Tipo Vθ)	Desconhecido	Desconhecido	1,05	0
Barra N2 (Tipo QV)	0	0	Desconhecido	Desconhecido
Barra N3 (Tipo QV)	0	0	Desconhecido	Desconhecido
Barra N4 (Tipo QV)	1312,7	803,6	Desconhecido	Desconhecido
Barra N5 (Tipo QV)	0	0	Desconhecido	Desconhecido
Barra N6 (Tipo QV)	0	0	Desconhecido	Desconhecido
Barra N7 (Tipo QV)	0	0	Desconhecido	Desconhecido
Barra N8 (Tipo QV)	6346,7	3934	Desconhecido	Desconhecido
Barra N9 (Tipo QV)	0	0	Desconhecido	Desconhecido
Barra N10 (Tipo QV)	1700	1053,6	Desconhecido	Desconhecido
Barra N11 (Tipo QV)	0	0	Desconhecido	Desconhecido
Barra N12 (Tipo QV)	0	0	Desconhecido	Desconhecido
Barra N13 (Tipo QV)	2606,7	1615,6	Desconhecido	Desconhecido
Barra N14 (Tipo QV)	0	0	Desconhecido	Desconhecido
Barra N15 (Tipo QV)	1133,3	702,4	Desconhecido	Desconhecido
Barra N16 (Tipo QV)	0	0	Desconhecido	Desconhecido
Barra N17 (Tipo QV)	0	0	Desconhecido	Desconhecido
Barra N18 (Tipo QV)	598	400,4	Desconhecido	Desconhecido
Barra N19 (Tipo QV)	0	0	Desconhecido	Desconhecido
Barra N20 (Tipo QV)	0	0	Desconhecido	Desconhecido
Barra N21 (Tipo QV)	566,7	351,2	Desconhecido	Desconhecido

4.4 Análise de desempenho na presença de Erros Arbitrários de Tensão

Com o objetivo de encontrar o caso em que o Método QV é mais afetado pelos erros na leitura de tensão nas barras do novo sistema em estudo, utiliza-se do mesmo procedimento adotado na análise de desempenho do sistema de média tensão. Uma vez que o raciocínio utilizado para atingir tal objetivo já foi explanado na seção 4.2, é suficiente afirmar que a barra cujo erro na medida de tensão mais influenciou os resultados do método proposto foi a barra 2. Sendo assim, as análises que serão realizadas de agora em diante considerarão que o erro de tensão estará presente sempre na barra N2 do sistema presente na Figura 3.

4.4.1 Análise de Sensibilidade: Detecção de PNTs na presença de Erros Arbitrários de Tensão

Aplicou-se o Método QV para o sistema de baixa tensão através da simulação de uma série de fraudes com valores gradativamente menores nas barras 8, 13 e 21 do sistema. As fraudes foram simuladas uma a uma e de modo não simultâneo. Deste modo, um valor de fraude é simulado, inicialmente, somente na barra 8 e, então, aplica-se o Método QV. Posteriormente, um outro valor de fraude é inserido somente na barra 8 e aplica-se, novamente, o Método QV. Este procedimento é realizado na barra 8 para todos os valores de fraude que se quer simular. Posteriormente, o valor de fraude na barra 8 é igualado a zero e simula-se os mesmos valores de fraude, utilizados no caso da barra 8, aplicados apenas na barra 13. A próxima barra em que se aplica a fraude é a barra 21, adotando-se o mesmo procedimento já explicado. A escolha das barras se deu em virtude de as mesmas representarem quantidades relativamente distintas de carga com relação ao nível de carga presente neste sistema em específico. Deseja-se analisar o comportamento do método para fraudes de 100W, 500W e 1kW, visando o estudo da sensibilidade do método com relação à quantidade de potência ativa que está sendo roubada mesmo na ocorrência de erro da 1% na medição da tensão da barra N2.

Procedendo-se à exemplo do que foi feito no sistema de média tensão na seção 4.2.1, os resultados obtidos no sistema de baixa tensão quando há a ocorrência de fraudes é mostrado nas tabelas 23 a 28.

Tabela 23 – Desvio de potência – Fraude na Barra 8, com erro na leitura de tensão da barra 2 de 0,5%

Fraude na Barra 8							
PNT de 0W		PNT de 100W		PNT de 500W		PNT de 1.000W	
Barra	Potência Calculada (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)
1	-115.729,94	1	102,39	1	512,31	1	1.025,51
2	170.858,10	2	-3,68	2	-18,45	2	-37,01
3	-39.802,89	3	3,76	3	18,82	3	37,68
4	-1.312,70	4	0,00	4	0,00	4	0,00
5	0,00	5	0,00	5	0,00	5	0,00
6	0,00	6	0,00	6	0,00	6	0,00
7	0,00	7	0,00	7	0,00	7	0,00
8	-6.346,70	8	-100,00	8	-500,00	8	-1.000,00
9	0,00	9	0,00	9	0,00	9	0,00
10	-1.700,00	10	0,00	10	0,00	10	0,00
11	0,00	11	0,00	11	0,00	11	0,00
12	0,00	12	0,00	12	0,00	12	0,00
13	-2.606,70	13	0,00	13	0,00	13	0,00
14	0,00	14	0,00	14	0,00	14	0,00
15	-1.133,30	15	0,00	15	0,00	15	0,00
16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00
17	0,00	17	0,00	17	0,00	17	0,00
18	-598,00	18	0,00	18	0,00	18	0,00
19	0,00	19	0,00	19	0,00	19	0,00
20	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,00
21	-566,70	21	0,00	21	0,00	21	0,00

Tabela 24 – Desvio de potência – Fraude na Barra 13, com erro na leitura de tensão da barra 2 de 0,5%

Fraude na Barra 13							
PNT de 0W		PNT de 100W		PNT de 500W		PNT de 1.000W	
Barra	Potência Calculada (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)
1	-115.729,94	1	101,34	1	507,01	1	1.014,86
2	170.858,10	2	-3,59	2	-18,00	2	-36,10
3	-39.802,89	3	3,71	3	18,57	3	37,16
4	-1.312,70	4	0,00	4	0,00	4	0,00
5	0,00	5	0,00	5	0,00	5	0,00
6	0,00	6	0,00	6	0,00	6	0,00
7	0,00	7	0,00	7	0,00	7	0,00
8	-6.346,70	8	0,00	8	0,00	8	0,00
9	0,00	9	0,00	9	0,00	9	0,00
10	-1.700,00	10	0,00	10	0,00	10	0,00
11	0,00	11	0,00	11	0,00	11	0,00
12	0,00	12	0,00	12	0,00	12	0,00
13	-2.606,70	13	-100,00	13	-500,00	13	-1.000,00
14	0,00	14	0,00	14	0,00	14	0,00
15	-1.133,30	15	0,00	15	0,00	15	0,00
16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00
17	0,00	17	0,00	17	0,00	17	0,00
18	-598,00	18	0,00	18	0,00	18	0,00
19	0,00	19	0,00	19	0,00	19	0,00
20	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,00
21	-566,70	21	0,00	21	0,00	21	0,00

Tabela 25 – Desvio de potência – Fraude na Barra 21, com erro na leitura de tensão da barra 2 de 0,5%

Fraude na Barra 21							
PNT de 0W		PNT de 100W		PNT de 500W		PNT de 1.000W	
Barra	Potência Calculada (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)
1	-115.729,94	1	101,06	1	505,66	1	1.012,25
2	170.858,10	2	-3,59	2	-18,03	2	-36,19
3	-39.802,89	3	3,70	3	18,54	3	37,11
4	-1.312,70	4	0,00	4	0,00	4	0,00
5	0,00	5	0,00	5	0,00	5	0,00
6	0,00	6	0,00	6	0,00	6	0,00
7	0,00	7	0,00	7	0,00	7	0,00
8	-6.346,70	8	0,00	8	0,00	8	0,00
9	0,00	9	0,00	9	0,00	9	0,00
10	-1.700,00	10	0,00	10	0,00	10	0,00
11	0,00	11	0,00	11	0,00	11	0,00
12	0,00	12	0,00	12	0,00	12	0,00
13	-2.606,70	13	0,00	13	0,00	13	0,00
14	0,00	14	0,00	14	0,00	14	0,00
15	-1.133,30	15	0,00	15	0,00	15	0,00
16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00
17	0,00	17	0,00	17	0,00	17	0,00
18	-598,00	18	0,00	18	0,00	18	0,00
19	0,00	19	0,00	19	0,00	19	0,00
20	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,00
21	-566,70	21	-100,00	21	-500,00	21	-1.000,00

Tabela 26 – Desvio de potência – Fraude na Barra 8, com erro na leitura de tensão da barra 2 de 1%

Fraude na Barra 8							
PNT de 0W		PNT de 100W		PNT de 500W		PNT de 1.000W	
Barra	Potência Calculada (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)
1	-262.919,16	1	104,33	1	522,06	1	1.045,09
2	359.757,25	2	-9,49	2	-47,57	2	-95,37
3	-78.531,19	3	7,25	3	36,27	3	72,61
4	-1.312,70	4	0,00	4	0,00	4	0,00
5	0,00	5	0,00	5	0,00	5	0,00
6	0,00	6	0,00	6	0,00	6	0,00
7	0,00	7	0,00	7	0,00	7	0,00
8	-6.346,70	8	-100,00	8	-500,00	8	-1.000,00
9	0,00	9	0,00	9	0,00	9	0,00
10	-1.700,00	10	0,00	10	0,00	10	0,00
11	0,00	11	0,00	11	0,00	11	0,00
12	0,00	12	0,00	12	0,00	12	0,00
13	-2.606,70	13	0,00	13	0,00	13	0,00
14	0,00	14	0,00	14	0,00	14	0,00
15	-1.133,30	15	0,00	15	0,00	15	0,00
16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00
17	0,00	17	0,00	17	0,00	17	0,00
18	-598,00	18	0,00	18	0,00	18	0,00
19	0,00	19	0,00	19	0,00	19	0,00
20	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,00
21	-566,70	21	0,00	21	0,00	21	0,00

Tabela 27 – Desvio de potência – Fraude na Barra 13, com erro na leitura de tensão da barra 2 de 1%

Fraude na Barra 13							
PNT de 0W		PNT de 100W		PNT de 500W		PNT de 1.000W	
Barra	Potência Calculada (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)
1	-262.919,16	1	103,22	1	516,45	1	1.033,82
2	359.757,25	2	-9,29	2	-46,54	2	-93,30
3	-78.531,19	3	7,15	3	35,77	3	71,60
4	-1.312,70	4	0,00	4	0,00	4	0,00
5	0,00	5	0,00	5	0,00	5	0,00
6	0,00	6	0,00	6	0,00	6	0,00
7	0,00	7	0,00	7	0,00	7	0,00
8	-6.346,70	8	0,00	8	0,00	8	0,00
9	0,00	9	0,00	9	0,00	9	0,00
10	-1.700,00	10	0,00	10	0,00	10	0,00
11	0,00	11	0,00	11	0,00	11	0,00
12	0,00	12	0,00	12	0,00	12	0,00
13	-2.606,70	13	-100,00	13	-500,00	13	-1.000,00
14	0,00	14	0,00	14	0,00	14	0,00
15	-1.133,30	15	0,00	15	0,00	15	0,00
16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00
17	0,00	17	0,00	17	0,00	17	0,00
18	-598,00	18	0,00	18	0,00	18	0,00
19	0,00	19	0,00	19	0,00	19	0,00
20	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,00
21	-566,70	21	0,00	21	0,00	21	0,00

Tabela 28 – Desvio de potência – Fraude na Barra 21, com erro na leitura de tensão da barra 2 de 1%

Fraude na Barra 21							
PNT de 0W		PNT de 100W		PNT de 500W		PNT de 1.000W	
Barra	Potência Calculada (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)	Barra	Desvio (W)
1	-262.919,16	1	102,94	1	515,13	1	1.031,30
2	359.757,25	2	-9,29	2	-46,57	2	-93,43
3	-78.531,19	3	7,14	3	35,71	3	71,50
4	-1.312,70	4	0,00	4	0,00	4	0,00
5	0,00	5	0,00	5	0,00	5	0,00
6	0,00	6	0,00	6	0,00	6	0,00
7	0,00	7	0,00	7	0,00	7	0,00
8	-6.346,70	8	0,00	8	0,00	8	0,00
9	0,00	9	0,00	9	0,00	9	0,00
10	-1.700,00	10	0,00	10	0,00	10	0,00
11	0,00	11	0,00	11	0,00	11	0,00
12	0,00	12	0,00	12	0,00	12	0,00
13	-2.606,70	13	0,00	13	0,00	13	0,00
14	0,00	14	0,00	14	0,00	14	0,00
15	-1.133,30	15	0,00	15	0,00	15	0,00
16	0,00	16	0,00	16	0,00	16	0,00
17	0,00	17	0,00	17	0,00	17	0,00
18	-598,00	18	0,00	18	0,00	18	0,00
19	0,00	19	0,00	19	0,00	19	0,00
20	0,00	20	0,00	20	0,00	20	0,00
21	-566,70	21	-100,00	21	-500,00	21	-1.000,00

Conforme esperado, nos casos em que o valor da fraude aplicada é nulo verifica-se que as potências calculadas assumem valores diferentes do real. Tal efeito é devido exclusivamente ao erro na leitura de tensão da barra 2. A partir deste resultado é que os desvios de potência são calculados quando se aplica um valor não nulo de fraude nas barras 8, 13 e 21.

Após a aplicação do Método QV no sistema de baixa tensão pode-se afirmar que o mesmo se mostrou preciso no cálculo das potências consumidas em cada uma das barras, permitindo que os desvios de potências fossem observados e, conseqüentemente, auxiliando na detecção de barras suspeitas de fraude. Tal resultado pode ser constatado atentando-se para as linhas que estão em destaque nas tabelas 23 a 28, que evidenciam a potência calculada na ausência de fraude e os desvios de potência encontrados para cada situação de fraude nas barras 8, 13 e 21. A precisão do método mesmo para o sistema de baixa tensão deve ser, também, destacada uma vez que o mesmo apresentou resultados praticamente exatos no que diz respeito ao desvio de potência nas barras quando da

ocorrência de fraudes (100W, 500W e 1.000W) em todas as três barras testadas. Além disso, vale ressaltar que quando há a ocorrência de fraudes surgem também variações nas potências calculadas para as barras 2 e 3 do sistema. Isto se deve ao fato de que a barra 2 é a barra em que ocorre o erro na leitura de tensão e devido ao fato de a barra 3 ser próxima a mesma.

5 Conclusões

No decorrer deste trabalho, pôde-se verificar a grande importância do assunto perdas elétricas no setor elétrico mundial, principalmente quando se trata de perdas não técnicas de energia. Ao estudar o assunto é evidente que muito esforço tem sido realizado por parte dos especialistas na área de perdas de energia para que as perdas não técnicas sejam identificadas e amenizadas, uma vez que as concessionárias de energia têm encontrado dificuldades ao tratar dessa deficiência no setor de distribuição.

A fim de amenizar esse entrave, estudos cada vez mais aprofundados são elaborados na tentativa de identificar as causas do problema das perdas não técnicas. Estas, por sua vez, são em grande número e de naturezas variadas, compreendendo desde aspectos sociais e econômicos de uma sociedade até princípios morais da mesma, como visto em [3]. Torna-se, portanto, imprescindível a adoção de um conjunto de medidas técnicas e administrativas para que a prática, principalmente, de atividades ilegais no uso da energia seja eficazmente combatida.

Com este objetivo, vários métodos de estimativa, ou cálculo, e identificação de perdas foram elaborados. Neste sentido, o advento de novas tecnologias como os medidores inteligentes traz um novo impulso no desenvolvimento de ferramentas preciosas, que permitirão identificar com exatidão os locais onde as perdas não técnicas ocorrem e determinar seus valores com precisão.

Neste contexto as concessionárias de energia poderão contar com bancos de dados de potência ativa, reativa, tensão e energia em todos os pontos em que os medidores estiverem instalados e por este motivo o Método QV terá, certamente, os dados necessários para que a real potência consumida seja calculada e as eventuais fraudes, identificadas. Isto devido ao fato de que para a aplicação do Método QV as barras de carga devem ser modeladas como injeção de potência reativa e tensão fixas (barras QV), diferentemente da formulação convencional para o cálculo do fluxo de potência, que considera as barras de carga como injeções fixas de potência ativa e reativa (barras PQ) [14].

Embora os sistemas elétricos utilizados neste trabalho sejam de tamanho reduzido e de pouca complexidade, em comparação aos sistemas reais de distribuição de energia elétrica, vale ressaltar que o Método QV foi eficiente quando aplicado aos sistemas de média e baixa tensão, descritos nas seções 4.1 e 4.3 respectivamente, possibilitando a identificação de barras suspeitas de fraudes em

ambos os sistemas estudados. Tal feito reafirma a eficácia do mesmo uma vez que os resultados esperados foram obtidos de forma satisfatória.

Quando há a presença de erros na leitura de tensão de uma determinada barra, considerada sempre como sendo a barra sobre a qual o erro teria maior influência no resultado do método, verifica-se que os valores de potência calculados diferem dos valores de potência reais. Essa diferença aparece principalmente nos valores de potências das barras que se encontram perto da barra que apresenta tal erro. Contudo, mesmo com este fenômeno o método se mostrou apto a indicar as barras suspeitas de fraude e a calcular os desvios de potência, que representam a quantidade de energia consumida não contabilizada pela concessionária de energia, com precisões menores do que 1W para todos os casos simulados no sistema de baixa tensão em que a barra em que a fraude foi simulada não coincide com a barra que apresenta erro na leitura de tensão.

Vale destacar que mesmo quando a barra em que a fraude foi simulada é a mesma que apresenta erro na leitura de tensão, situações simuladas no sistema de média tensão e cujos resultados estão apresentados nas tabelas 18 e 20, o Método QV foi capaz de identificar as barras suspeitas de fraude com exatidão, tendo apenas os valores de desvios de potência afetados pelo mesmo.

Pode-se afirmar, portanto, que o novo método tem grande potencial de aplicação em sistemas elétricos compostos por medidores inteligentes e se constitui de grande utilidade para a localização de áreas onde provavelmente há perdas não técnicas de energia elétrica, podendo apresentar grande precisão no cálculo do montante de energia não contabilizado pela concessionária de energia desde que a fraude ocorra em barras que não apresentem erros na leitura de tensão. Deste modo, o método se afirma como importante ferramenta no combate ao problema recorrente das perdas não técnicas de energia em um cenário em que o setor elétrico conta com a instalação massiva de medidores inteligentes.

5.1 Trabalhos Futuros

Os bons resultados apresentados pelo método QV motivam o seu aperfeiçoamento e aplicação em situações mais próximas da realidade. Estas situações compreendem a consideração dos seguintes fatores e que podem impactar na precisão e sensibilidade do método:

- Flutuações normais de tensão verificadas em um período de operação do sistema elétrico;
- Erros nominais dos medidores;

- Erros nos dados das linhas necessários para o cálculo do fluxo de carga. Exemplos desses erros abrangem informações imprecisas a respeito das resistências, reatâncias ou comprimentos das linhas;
- Erros no sincronismo de diferentes medidores.

A investigação dos impactos dos itens listados anteriormente constitui uma linha de pesquisa interessante, que pode se desdobrar em futuros projetos de iniciação científica, trabalhos de conclusão de curso e dissertações de Mestrado. Portanto, até mesmo a constatação de que o método proposto pode ser aperfeiçoado também pode ser tratada como uma importante contribuição deste trabalho.

6 Referências

- [1] A. H. Nizar, Z. Y. Dong and Pei Zhang, “Detection Rules for Non Technical Losses Analysis in Power Utilities,” in *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, Pittsburgh, United States, July, 2008, 8 p.
- [2] C. A. Dortolina and R. Nadira, “The Loss that is Unknown is No Loss at All: A Top-Down/Bottom-Up Approach for Estimating Distribution Losses,” in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 1119-1125, May, 2005.
- [3] T. B. Smith, “Electricity Theft: a comparative analysis,” *Energy Policy*, vol. 32, no. 18, pp. 2067-2076, August, 2003.
- [4] A. N. de Souza, P. S. Silva, A. M. Oltremari, M. G. Zago, F. L. do Amaral e P. da C. Junior, “Desenvolvimento de um Sistema Especialista para Detecção de Pontos Potenciais de Perdas Comerciais,” Trabalho de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) realizado com apoio da Manaus Energia, 2005.
- [5] C. C. O. Ramos, A. N. Souza, J. P. Papa and A. X. Falcão, “Fast Non-Technical Losses Identification through Optimum-Path Forest,” in *15th International Conference on Intelligent System Applications to Power Systems*, November, 2009, 5 p.
- [6] R. V. Cruz, C. V. Quintero and F. Perez, “Detecting Non-Technical Losses in Radial Distribution System Transformation Point through the Real Time State Estimation Method,” in *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America (TDC 06)*, August, 2006, 5 p.
- [7] A. P. Feltrin, M. E. de Oliveira. “Gestão das Perdas de Energia em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica”. Em: Universidade Federal de Juiz de Fora; Sociedade Brasileira de Automática. (Org.). *Tutoriais do XVII Congresso Brasileiro de Automática*, 1 ed. Campinas, Book Editora, 2008, v. 1, p. 35-35.
- [8] A. H. Nizar, Z. Y. Dong, M. Jalaluddin and M. J. Raffles, “Load Profiling Method in Detecting non-Technical Loss Activities in a Power Utility,” in *Power and Energy Conference (PECon 06)*, 2006. IEEE International, pp. 82-87, November, 2006.
- [9] J. Nagi, A. M. Mohammad, K. S. Yap, S. K. Tiong and S. K. Ahmed, “Non-Technical Loss Analysis for Detection of Electricity Theft using Support Vector Machines,” in *2nd International Conference on Power and Energy (PECon 08)*, Johor Bahru, December, 2008, pp. 907-912.

- [10] C. LaPlace, B. Hughes. “Applications of Transformer and Feeder Monitoring with AGInodes”, *White Paper*, Sep. 2009, 20 p.
- [11] R. Alves, P. Casanova, E. Quirogas, O. Ravelo and W. Gimenez, “Reduction of Non-Technical Losses by Modernization and Updating of Measurement Systems,” in *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America*, Caracas, August, 2006, 5 p.
- [12] A. R. Abaide, L.N Canha, A. Barin and Cassel G, “Assessment of the Smart Grids applied in reducing the Cost of Distribution System Losses,” in *2010 7th International Conference on the European Energy Market (EMM)*, Madrid, Spain, June, 2010, 6 p.
- [13] Yuan-Liang Lo, Shih-Che H. and Chan-Nan Lu, “Non-Technical Loss Detection Using Smart Distribution Network Measurement Data,” in *2012 IEEE Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)*, Tianjin, China, May, 2012, 5 p.
- [14] A. J. Monticelli, *Fluxo de Carga em Redes de Energia Elétrica*. São Paulo: Edgard Blücher, 1983.
- [15] W. H. Kersting, “Radial distribution test feeders,” in *2001 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*, Columbus, United States, February, 2001, v. 2, pp. 908-912.
- [16] R. Torquato, “Desenvolvimento de Metodologias de Análise Sistêmica de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica com Geração Ultra-Dispersa,” *Dissertação de Mestrado*, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

7 Apêndice A – Dados do Sistema Elétrico – Média Tensão

O sistema elétrico de média tensão utilizado neste trabalho é baseado no sistema IEEE 13 Barras, porém trata-se de um sistema mais simples quando comparado ao sistema IEEE citado. No sistema IEEE 13 Barras [15], as barras 671 e 692 estão separadas apenas por uma chave. Tal trecho foi desconsiderado na montagem do sistema em estudo. Por esta razão, as barras 692 e 675 foram consideradas como uma única barra e, por isso, o sistema em estudo apresenta um total de 12 barras.

Dentre as modificações feitas destaca-se que apenas uma fase foi considerada para o estudo do método QV. Neste caso, foi considerada a média aritmética das impedâncias trifásicas para o equivalente monofásico. As potências consideradas em cada barra foram, via de regra, a soma das potências trifásicas do sistema IEEE 13 Barras. As barras 4, 9 apresentavam cargas distribuídas no sistema apresentado em [15]. Esta carga foi dividida igualmente e atribuída a cada dessas barras. É importante destacar que no final deste processo, as cargas das barras 9 e 10 tiveram seus valores diminuídos, de modo a melhor se adequarem a este estudo.

Os dados referentes às linhas de distribuição do sistema de média tensão em estudo e os valores de potência atribuídos a cada barra do mesmo estão contidos nas tabelas 29 e 30, respectivamente.

Tabela 29 – Dados do Sistema de Média Tensão

Barra Origem	Barra Destino	Comprimento (mi)	Resistência (Ω)	Susceptância (Ω)
4	3	0,09470	0,08375	0,08535
4	5	0,09470	0,07083	0,11335
5	6	0	0,00367	0,00667
3	2	0,05680	0,05023	0,05119
1	4	0,37880	0,12947	0,39149
8	11	0,15150	0,06779	0,02587
4	9	0,37880	0,12947	0,39149
9	8	0,05680	0,05023	0,05119
9	12	0,18940	0,06474	0,19574
8	7	0,05680	0,02517	0,02551
9	10	0,09470	0,07530	0,04093

Tabela 30 – Potências Ativa (P) e Reativa (Q) – Sistema de Média Tensão

	P (kW)	Q (kvar)
Barra 1 (Tipo V0)	Desconhecido	Desconhecido
Barra 2 (Tipo QV)	230	132
Barra 3 (Tipo QV)	170	125
Barra 4 (Tipo QV)	100	58
Barra 5 (Tipo QV)	0	0
Barra 6 (Tipo QV)	400	290
Barra 7 (Tipo QV)	170	80
Barra 8 (Tipo QV)	0	0
Barra 9 (Tipo QV)	665	435
Barra 10 (Tipo QV)	750	350
Barra 11 (Tipo QV)	128	86
Barra 12 (Tipo QV)	0	0

8 Apêndice B – Dados do Sistema Elétrico – Baixa Tensão

O sistema elétrico de baixa tensão utilizado neste trabalho é baseado no sistema utilizado em [16]. Contudo, simplificações semelhantes às aplicadas para o sistema de média tensão foram realizadas neste sistema. Isto é, o sistema foi modelado para admitir apenas uma fase. Para tanto, fez-se uso da componente de sequência positiva da impedância trifásica. A média aritmética das cargas do sistema mostrado em [16] foi utilizada como potência do sistema equivalente monofásico.

Os dados referentes às linhas de distribuição do sistema de baixa tensão em estudo e os valores de potência atribuídos a cada barra do mesmo estão contidos nas tabelas 31 e 32, respectivamente.

Tabela 31 – Dados do Sistema de Baixa Tensão

Barra Origem	Barra Destino	Comprimento (m)	Resistência (Ω)	Susceptância (Ω)
1	2	0	0.00217	0.00860
2	3	35,0	0.00650	0.01590
3	4	30,0	0.04800	0.01380
3	5	35,0	0.00650	0.01590
5	6	35,0	0.02200	0.02200
6	7	35,0	0.02200	0.02200
7	8	30,0	0.01890	0.01880
6	9	20,0	0.02000	0.01150
9	10	20,0	0.02000	0.01150
5	11	35,0	0.00650	0.01590
11	12	35,0	0.00650	0.01590
12	13	30,0	0.04800	0.01380
12	14	35,0	0.00650	0.01590
14	15	30,0	0.03000	0.01720
14	16	35,0	0.00650	0.01590
16	17	35,0	0.00650	0.01590
17	18	30,0	0.03000	0.01720
17	19	35,0	0.00650	0.01590
19	20	15,0	0.01500	0.00860
20	21	15,0	0.01500	0.00860

Tabela 32 – Potências Ativa (P) e Reativa (Q) – Sistema de Baixa Tensão

	P (W)	Q (VAr)
Barra N1 (Tipo V0)	Desconhecido	Desconhecido
Barra N2 (Tipo QV)	0	0
Barra N3 (Tipo QV)	0	0
Barra N4 (Tipo QV)	1312,7	803,6
Barra N5 (Tipo QV)	0	0
Barra N6 (Tipo QV)	0	0
Barra N7 (Tipo QV)	0	0
Barra N8 (Tipo QV)	6346,7	3934
Barra N9 (Tipo QV)	0	0
Barra N10 (Tipo QV)	1700	1053,6
Barra N11 (Tipo QV)	0	0
Barra N12 (Tipo QV)	0	0
Barra N13 (Tipo QV)	2606,7	1615,6
Barra N14 (Tipo QV)	0	0
Barra N15 (Tipo QV)	1133,3	702,4
Barra N16 (Tipo QV)	0	0
Barra N17 (Tipo QV)	0	0
Barra N18 (Tipo QV)	598	400,4
Barra N19 (Tipo QV)	0	0
Barra N20 (Tipo QV)	0	0
Barra N21 (Tipo QV)	566,7	351,2