

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

TESE DE DOUTORADO

**"UMA PROPOSIÇÃO DE NOVOS PROTOCOLOS
DE MEDIÇÃO SOB A ÓTICA DA
QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA"**

por DÉLVIO FRANCO BERNARDES

Tese submetida à Coordenação da Pós-Graduação em Engenharia Elétrica-CPG-E, da UNIFEI, como requisito para obtenção do título de Doutor em Ciências em Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alberto Mohallem Guimarães

Itajubá - 2003

Estas páginas são dedicadas a quem tanto me amou: meus pais e tios,

Mary e João

Dulce e Levy.

AGRADECIMENTOS DO AUTOR

Ao professor Carlos Alberto Mohallem Guimarães, pelo empenho, brilhantismo e, sobretudo, pela coragem com que abraçou a árdua tarefa de me orientar.

Ao professores Hector Arango e Antonio Eduardo Hermeto, pelas sempre presentes e imprescindíveis sugestões.

Aos professores Alexander Eigeles Emanuel e José Policarpo G. de Abreu, que em Worcester, com indescritível presteza, me receberam e me estimularam a envidar esforços nesta empreita.

Aos professores Francisca Aparecida de Camargo Pires, Carlos Márcio Vieira Tahan, Lucia Regina Horta Rodrigues Franco e Edson da Costa Bortoni, que fizeram parte da banca do exame de qualificação e que tão prontamente fizeram diversas sugestões primorosas.

À FAPEMIG, pela inestimável colaboração na aquisição de equipamentos que foram muito importantes na comprovação dos resultados encontrados.

Também, não posso me furtar a reconhecer aos amigos Zeca, Pamela, Jocélio e Gilson, pelas mais diversas formas de apoio e atenção com que me cercaram, todas muito importantes, durante a realização deste trabalho.

A todos, o meu cordial muito obrigado!

Certamente há outros mais a quem agradecer; a cada um destes, que lá dentro do seu coração tem a certeza de ter contribuído para tornar real este empreendimento, peço sinceras desculpas pela omissão e rogo-lhes que aceitem meu autêntico agradecimento.

RESUMO

Atualmente, a maioria dos problemas de engenharia elétrica está relacionada com o tema *Qualidade da Energia Elétrica*. Diversos são os procedimentos que são efetuados nos equipamentos elétricos para produzir e manter a forma de onda de sinais de tensões e correntes o mais próximo possível da senoidal. No entanto, são diversas as razões que fazem com que surjam distorções nestes sinais. A retificação de corrente alternada e outros tipos de cargas não lineares produzem correntes não senoidais. Por ação destas cargas aparecem quedas de tensão distorcidas nos sistemas de distribuição.

Ademais, apesar dos esforços que geralmente são empregados, as concessionárias de energia não conseguem manter as tensões equilibradas. Cargas desequilibradas usualmente prejudicam o desempenho do sistema.

Neste contexto, esta tese de doutorado trata da definição de potência aparente em sistemas trifásicos, suas componentes ativa e não-ativas.

Mostra uma solução não convencional de levar-se em conta o modo como o fator de potência é afetado pela não linearidade e pelo desequilíbrio; na presença de sinais não senoidais e desequilibrados, o fator de potência global pode ser definido como sendo o produto de três termos: o fator de potência de deslocamento, o fator de potência de distorção e o fator de potência de desequilíbrio.

Para avaliar se o método proposto é tecnicamente factível e para verificar e validar as considerações teóricas, foi construído um protótipo. O comportamento deste protótipo manteve-se dentro das expectativas e os resultados que dele foram obtidos conservaram-se em conformidade com os calculados através do MatLab.

ABSTRACT

Nowadays most of the problems in electrical engineering are related to Power Quality concerning subjects. Usually, several measures are adopted in power devices to produce and maintain alternating voltages and currents as close as possible to sinusoidal waveforms. However, a number of causes tend to distort these signals. Rectification of alternating current and other kind of non-linear load produces a non-sinusoidal current. The presence of non-linear loads in the networks also distorts voltages across the terminals of linear elements, producing non-linear voltage drops in the power distribution systems.

Further, despite the usual employed efforts, the utilities are not able to keep the voltages balanced. The load unbalance usually deteriorates the performance of the electrical systems.

In the circumstances in which these two undesirable power phenomena happen, this doctorate thesis deals with the definition of apparent power in three-phase systems and its active and non-active power components.

It is shown a no conventional solution to take in account how the power factor is affected by no linearity and unbalance; in the presence of non-sinusoidal waveforms and unbalanced signals, the global power factor can be defined as a product of three terms: displacement power factor, the distortion power factor and the unbalance power factor.

In order to evaluate the technical feasibility of the proposed measurement method and to verify the validity of the theoretical considerations, a prototype has been assembled. The behavior of the prototype was the expected and results of the measurements were in agreement with the results of the simulation by means of the MatLab program.

CAPÍTULO 1

DISTORÇÃO E DESEQUILÍBRIO DE SINAIS NO CONTEXTO DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

1.1 - Considerações Gerais

É notório nos dias de hoje que o uso da eletricidade tem campeado por níveis de desenvolvimento que, até bem pouco tempo atrás, sequer poderia ser concebido. Mais expressivo torna-se este avanço à medida que se observa a velocidade com que significativas transições têm ocorrido no dia-a-dia do homem contemporâneo. O desenvolvimento da eletrônica de potência tem possibilitado que obstáculos técnicos possam ser transpostos, permitindo assim atingir metas de elevada produção e alta qualidade no setor industrial; também, este mesmo desenvolvimento tem proporcionado mais conforto e bem estar para a população. Porém, na maioria das vezes, tais avanços implicam em desvantagens para o sistema alimentador. O sistema elétrico, como um todo, tem sido levado a experimentar situações inusitadas. Como exemplo, pode-se mencionar o acréscimo do conteúdo harmônico nos sinais de tensão e corrente verificado nas redes de média e baixa tensão [Fi94]. Este conteúdo harmônico tem sido fonte de preocupações contemporâneas para especialistas do setor elétrico uma vez que pode ser o causador de numerosos problemas.

Determinados equipamentos elétricos têm por característica inerente ao seu funcionamento o fato de provocarem distorções na forma de onda da corrente, ou seja, ainda que estejam submetidos a uma tensão senoidal fazem com que a corrente assuma formas de onda não senoidais. Embora não tenha sido encontrada durante o período de desenvolvimento deste trabalho, excetuando-se uma breve menção [Ie92], nenhuma referência que explicitasse esta condição, parece ser uma conformidade dos profissionais do setor elétrico denominar os

equipamentos com estas características por "cargas não-lineares". Provavelmente este consenso deriva do conceito de "carga linear", concebido décadas atrás, e que foi atribuído a equipamentos que, quando submetidos a uma tensão senoidal, em regime permanente, farão com que se estabeleça uma circulação de corrente com forma de onda também senoidal [Ka60].

As cargas não-lineares podem ser reunidas em três grupos básicos [Em97]:

– *conversores eletrônicos*

Incluem-se neste grupo os retificadores e os inversores eletrônicos. Como exemplo, dentre outros, podem ser citados os acionamentos elétricos controlados, computadores, diversos eletrodomésticos modernos, carregadores de baterias;

– *dispositivos ferromagnéticos*

Deste grupo fazem parte os transformadores e os indutores com núcleo de material ferromagnético. Geralmente tais equipamentos são projetados de modo a operar, no estado de tensão nominal, na condição correspondente ao início do processo de saturação do núcleo, condição esta que corresponde à região conhecida como "joelho" da curva de magnetização. Assim, a relação entre a corrente de excitação, responsável pela indução do fluxo magnético, e o fluxo magnético resultante, é não-linear. Ademais, esta relação é dependente do histórico magnético do núcleo, ou seja, uma vez submetido a um processo de magnetização, estes núcleos ferromagnéticos não retornam espontaneamente ao estado primitivo; assim sendo, quando este núcleo é submetido a uma tensão alternada, seu comportamento magnético dá origem ao denominado "ciclo (ou laço) de histerese". Deste modo, a reunião destes dois fenômenos conduz a um comportamento do circuito eletro-magnético tal que: para que a imposição de uma tensão senoidal conduza à formação de um fluxo magnético também senoidal, é necessário que a corrente seja distorcida;

– *dispositivos formadores de arco elétrico*

Incluem-se neste grupo equipamentos para solda elétrica e fornos a arco. Tais equipamentos são potenciais produtores de harmônicos de corrente, uma vez que possuem uma característica tensão / corrente fortemente não-linear.

Por vezes, um sistema alimentador pode “enxergar” um consumidor como sendo a combinação de dois ou mais elementos pertencentes a diferentes grupos. Um exemplo bastante comum desta situação é uma indústria metalúrgica que possui fornos a arco e laminadores controlados por dispositivos eletrônicos.

É de se esperar que grandes geradores síncronos, onde suas dimensões cooperam para que haja uma boa distribuição de fluxo magnético, sejam capazes de produzir uma energia sob condições tais que a forma de onda da tensão gerada seja senoidal. Na verdade, é exatamente isto que ocorre com estes geradores responsáveis pela produção da maior parte da energia elétrica demandada, ou seja, a observação da forma de onda da tensão em pontos eletricamente próximos aos locais de geração denota baixos níveis de deformação. Assim, quando cargas de características lineares são conectadas a este sistema gerador, ainda que localizadas em pontos eletricamente distantes, as correntes serão também senoidais e, conseqüentemente, produzirão quedas de tensão também senoidais. Como resultado, a forma de onda da tensão mantém-se senoidal embora seu valor eficaz possa ser alterado dependendo da natureza da carga linear.

Para que se compreenda o modo como um consumidor pode afetar um sistema elétrico e vice-versa, é necessário observar que o fluxo de energia elétrica é sustentado pelo fluxo da corrente elétrica. Esta corrente, percorrendo um sistema elétrico, faz com que surjam quedas de tensão em condutores e transformadores. O valor da tensão medida no ponto de entrada de um determinado consumidor depende de diversos parâmetros, tais como: a tensão

nominal do sistema, o dimensionamento de cabos e transformadores, o grau de ocupação dos equipamentos envolvidos no processo de geração e distribuição.

Este último parâmetro, ou seja, o grau de ocupação dos dispositivos vinculados com o fenômeno de transferência de energia, está comprometido com a intensidade e com a natureza da corrente que flui pelo sistema alimentador. Naturalmente, este alimentador poderá suprir outros consumidores e a queda de tensão resultante é determinada pela superposição de cada um dos efeitos causados por cada uma das correntes individuais. Como a energia total demandada pelos consumidores é variante em função do tempo, a tensão a que cada um dos consumidores alimentados fica submetido é também fortemente afetada pela característica dos outros consumidores [Em97].

Deste modo, se um determinado consumidor suprido por um dado alimentador possui equipamentos capazes de distorcer a corrente, a forma de onda da tensão, em maior ou em menor grau, também será afetada. Assim, os demais consumidores que forem também atendidos por este alimentador, ainda que possuam tão somente cargas de características lineares, ficarão sujeitos a uma tensão distorcida [Em97].

A análise desenvolvida no último parágrafo evidencia que a qualidade de energia não pode ser vista como sendo de responsabilidade restrita aos sistemas de geração e distribuição. Através das características de suas cargas, bem como da demanda de potência, os consumidores têm uma participação efetiva no valor eficaz e na forma de onda da tensão.

É importante ressaltar que, a menos de algumas poucas exceções, a maior parte dos equipamentos utilizados em sistemas elétricos é projetada para operar com tensões e correntes senoidais. Como exemplo, podem ser mencionados os medidores convencionais de energia, ou seja, aqueles que possuem disco de indução. Estes equipamentos foram concebidos para serem calibrados e

utilizados sob condições nas quais tanto a tensão como a corrente sejam senoidais [Ar97]. Já os medidores digitais de energia, de concepção mais atual, foram desenvolvidos de modo a permitir a operação, com erros compatíveis com sua classe de exatidão, em condições de sinais distorcidos [Mu94]. Não obstante, testes recentemente realizados em equipamentos deste tipo evidenciaram haver situações em que se mostram inadequados e imprecisos, apresentando erros inaceitáveis. Alguns dos resultados obtidos nesses testes estão mostrados no Anexo I deste trabalho [Ce99].

Outro aspecto também relevante, merecedor portanto de uma análise crítica, é a situação imposta a sistemas elétricos quando suprindo cargas que apresentem diferentes impedâncias em pelo menos uma das fases. Tais cargas são conhecidas por “cargas desequilibradas”. Dois fenômenos devem ser levados em conta:

- desequilíbrio de tensão e;
- ocupação do sistema elétrico.

O uso de cargas desequilibradas sempre, em maior ou menor grau, faz com que um sistema elétrico originalmente equilibrado mostre diferentes valores de tensão nas suas fases. Em outras palavras, o desequilíbrio intrínseco de uma determinada carga provoca o desequilíbrio de tensões em um sistema inicialmente equilibrado. O suprimento de cargas com tensões desequilibradas já foi objeto de inúmeros estudos que comprovaram não ser esta uma condição ideal de operação. Neste sentido, destaca-se o trabalho desenvolvido por Gafford [Ga59] e o realizado por Shenkman [Sh99]. Estes artigos tratam sobre o sobreaquecimento que ocorre em motores de indução trifásicos quando operando sob condições desequilibradas da rede de alimentação. Também, ainda tratando de efeitos perniciosos causados por desequilíbrios, são merecedores de atenção os trabalhos de Balda [Ba92] e Hu [Hu97] que discorrem sobre o aparecimento de harmônicos não característicos em conversores estáticos quando funcionando em condições de desequilíbrio.

Com relação às perdas por sobreaquecimento de máquinas rotativas, é sabido que uma parcela significativa da energia elétrica produzida é, em todo o mundo, consumida por motores de indução trifásicos. O Brasil não é exceção; esta característica de consumo de energia elétrica pode ser observada na Tabela 1.1 que mostra, em valores percentuais, o modo como se apresenta a estrutura de consumo nos principais setores do mercado consumidor.

Tabela 1.1: Estrutura de consumo de energia por setor

Industrial		Residencial		Comercial		Público e Rural
Motores Elétricos	51%	Refrigeração (geladeiras e freezers)	32%	Refrigeração	17%	Iluminação Pública
Processos Eletroquímicos	21%	Aquecimento de Água	26%	Condicionamento Ambiental	20%	
Aquecimento	20%	Outros	18%	Iluminação	44%	Saneamento
Refrigeração	6%			Outros	19%	
Iluminação	2%					
% do total do consumo no Brasil						
45%		26,9%		13,4%		14,5%

FONTE: [PROCEL, 1998]

Também, é notório [Sc63] que a parcela ativa da potência entregue a um motor de indução pelo componente de seqüência negativa da fonte de tensão, é totalmente convertida em calor, não sendo, portanto, capaz de produzir conjugado que possa ser aproveitado pelo acionamento. A título de exemplo, um componente de seqüência negativa de tensão de apenas 3,5% do de seqüência positiva, pode resultar em um aumento da temperatura do motor em até 25% [El88].

Ainda, a alimentação de cargas desequilibradas coloca o sistema elétrico em uma condição operacional que restringe sua capacidade de suprir outras cargas. Em outras palavras, suprir cargas desequilibradas traz para o sistema elétrico uma

ocupação adicional que, embora de natureza totalmente diferente, pode ter seu efeito comparado à ocupação adicional oriunda da defasagem entre a tensão e a corrente. Essa ocupação adicional, qualquer que seja a sua natureza, será neste trabalho chamada de *potência não-ativa*. Em ambos os casos, quando existe potência não-ativa de deslocamento ou potência não-ativa de desequilíbrio, o sistema tem sua capacidade de atendimento limitada, obrigando, em determinadas condições, o concessionário a realizar novos investimentos de modo a propiciar um aumento na sua capacidade, a fim de poder fornecer um produto de qualidade satisfatória a seus consumidores.

1.2 - Norteamento e Objetivo

A relevância dos temas abordados no item "Considerações Gerais", corroborada pela atenção que lhes têm sido prestada pela comunidade acadêmica e por setores que comercializam a energia elétrica, já é, por si só, motivação suficiente para a elaboração deste trabalho. Além disso, norteou os esforços no sentido do desenvolvimento de uma tese de doutorado com o tema escolhido, a pequena quantidade encontrada de trabalhos que estudassem protocolos de medição de energia elétrica e que abrangessem, simultaneamente, ambientes com sinais distorcidos e desequilibrados.

É o objetivo essencial deste trabalho buscar um modo de discriminar, qualificar e quantificar minuciosamente as parcelas de potência / energia elétrica na presença de sinais não senoidais e na carência de equilíbrio de tensões e/ou de correntes.

Além de viabilizar o estabelecimento de um roteiro que permita conhecer e analisar com a devida profundidade todas as parcelas que fazem parte da potência aparente, esta tese também aspira contribuir com uma filosofia de uma tarifação mais justa. Para tanto, espera que os desenvolvimentos nela apresentados munam os órgãos responsáveis pelas diretrizes da política tarifária,

com conceitos modernos e sintonizados com a tecnologia contemporânea. Assim, estará facultando a instauração de uma política de comercialização da energia elétrica mais justa e contribuindo para que haja uma repartição mais equânime dos ônus associados à ocupação improdutiva de redes elétricas.

É evidente que no decorrer dos próximos capítulos haverá uma abordagem mais abrangente dos temas aqui considerados, no entanto é importante que, desde já, seja salientado que o modo como o mote *Energia Elétrica em Ambientes Desequilibrados e com Sinais Não Senoidais* será enfocado é inovador, haja vista que, até a presente data, nenhum dos trabalhos já publicados trata os dois fenômenos, desequilíbrio e distorção de sinais, de forma integrada. Apesar disso, embora com um outro enfoque, cabe frisar que o tema já foi objeto de investigação em pesquisa desenvolvida tendo como propósito determinar a influência de distorções e desequilíbrios na vida útil de motores de indução [Ab02].

CAPÍTULO 2

ESTADO DA ARTE

2.1 - Introdução

Devido às atuais tendências da política energética, a energia elétrica tem sido tratada como uma mercadoria e, assim sendo, deve ser submetida às exigências clássicas do mercado consumidor onde, habitualmente, boas qualidades são requeridas para qualquer produto. Como consequência, tem-se tornado cada vez mais necessário atentar para essa qualidade. Nesta vertente, destacam-se como quesitos fundamentais *a qualidade do produto, a qualidade do serviço e a qualidade do atendimento* [Co97] [De97].

A perda da qualidade do produto energia elétrica está sempre associada a fenômenos elétricos que se manifestam nos sinais de tensão e corrente. Em sistemas elétricos, a deformação da forma de onda destes sinais, originalmente tidos como senoidais, concorre para que haja o surgimento de efeitos geralmente indesejáveis, tais como: a flutuação da amplitude da tensão, o desequilíbrio, ressonâncias harmônicas, o aumento de perdas e o consequente incremento nas solicitações térmicas, operação anormal de equipamentos sensíveis, etc. [Cz96].

Quanto à qualidade do serviço entende-se, sobretudo, como sendo a continuidade do fornecimento e garantia de entrega do produto, qualquer que seja a quantidade demandada pelo cliente, desde que dentro dos limites contratados. Do ponto de vista do consumidor, tão melhor será a qualidade do serviço adquirido quanto menor for a duração e a frequência das interrupções.

Por sua vez, a qualidade do atendimento está relacionada com a presteza com que a concessionária atende às solicitações do cliente.

Por outro lado, com particularidades que diferem-na de uma mercadoria comprada em uma loja, a qualidade do produto energia elétrica não depende tão somente de seu fornecedor, a concessionária, mas também de seu consumidor, o cliente. Neste sentido, para balizar o comportamento do cliente no que tange a procedimentos que de alguma forma possam influenciar a qualidade da energia elétrica, desde há muito foram criados preceitos que têm regrado o relacionamento entre fornecedores e consumidores. Dentre outros, encontram-se bem delineados e aceitos os conceitos de *Demanda* e de *Fator de Potência*. No entanto, apesar da busca por uma maior eficiência operacional do sistema elétrico ter se tornado, nos dias de hoje, um ponto de convergência de esforços de todos os segmentos deste setor, alguns obstáculos apresentam-se como um embaraço a este propósito. Dentre outros obstáculos, pode-se destacar a maneira rápida e ininterrupta com que as cargas não-lineares estão se proliferando e a falta de estímulos mais eficazes para a redução dos índices de desequilíbrio ora observados, que procurem minorar os efeitos que cargas desequilibradas causam em sistemas de distribuição. Esses obstáculos têm dificultado alcançar-se uma condição de melhor eficiência, podendo inclusive estar cooperando para que vultosos investimentos sejam demandados resultando em consideráveis perdas de receita. Portanto, é hoje plenamente aceitável afirmar que as balizas legais disponíveis são incompletas para bem gerir o comércio da energia elétrica e tornar mais justo o relacionamento entre fornecedor e consumidor.

Faz-se necessário, então, o desenvolvimento de um estudo cuja abrangência alcance os principais fenômenos que, sendo provenientes de setores que estejam sob a responsabilidade da concessionária ou sendo oriundos de equipamentos e/ou instalações do cliente, venham a deteriorar a eficiência do sistema fornecedor de energia elétrica.

Com este propósito, evidenciam-se os esforços que, em diversos países, têm sido realizados. Tanto a comunidade acadêmica quanto cientistas do setor empresarial têm, principalmente nos últimos anos, buscado idealizar conceitos

físicos e expressões matemáticas que sejam suficientemente sólidos e incontestáveis para que resistam aos evidentes interesses e pressões impostas pelo mercado. Por outro lado, é também desejável que tais conceitos sejam flexíveis o bastante de modo a permitir que se instaure uma política de comercialização da energia elétrica mais justa, ainda que tais transações aconteçam em ambientes não senoidais e desequilibrados.

2.2 - Conceitos

As características das potências envolvidas em circuitos elétricos são bem definidas e conhecidas, especialmente em sistemas onde as formas de onda da corrente e da tensão são senoidais. Porém, como já discutido anteriormente, há uma forte tendência de que tais formas de onda deixem de ser senoidais o que faz com que as propriedades destas potências tornem-se de certo modo obscuras.

Ainda com relação a sistemas não distorcidos, encarar o desequilíbrio como uma condição que concorre para o aumento da potência aparente, mesmo que sendo a carga do tipo linear e que não possua caráter indutivo ou capacitivo, é um aspecto bastante controverso [Em99].

Sendo a definição de potência aparente algo ainda muito polêmico, a aceitação universal de um enunciado consistente que bem a caracterize passa obrigatoriamente pela aceitação das definições individuais das diversas potências não-ativas. A propósito, a investigação e o entendimento dos fenômenos elétricos que produzem potências não-ativas merecem uma deferência especial, haja vista que este é o caminho pelo qual se pode alcançar definições aceitáveis para essas mesmas potências e, como consequência, para a potência aparente.

2.2.1 – Potências em ambientes senoidais

Inicialmente, não obstante as tendências citadas no parágrafo anterior, é interessante fazer uma breve análise dos conceitos de potências em ambientes não distorcidos [Ka60].

Quando a forma de onda é senoidal, os valores instantâneos de corrente (i) e de tensão (v) podem ser respectivamente representados pelas seguintes expressões:

$$i = \sqrt{2} \cdot I \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \varphi) \quad (2.1)$$

$$v = \sqrt{2} \cdot V \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \quad (2.2)$$

onde:

I – valor eficaz da corrente;

V – valor eficaz da tensão;

ω - frequência angular;

t – tempo;

φ - ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente.

A fonte é a responsável pela manutenção dos valores eficazes da tensão e da corrente (V e I), ou seja, pela *potência aparente* (S). Essa potência é definida pelo Dr. Alexander Emanuel, em sua nota de aula "Apparent Power: Part I - Components and Physical Interpretation", Worcester Polytechnic Institute, Worcester - MA - USA, como sendo a máxima potência ativa que pode ser fornecida por uma fonte enquanto mantiver-se invariante a sua tensão de saída e constante suas perdas internas. Seu valor é expresso em volt-ampère e, geralmente, define o valor da potência nominal da fonte que, em sistemas monofásicos, é dado por:

$$S = V \cdot I \quad (2.3)$$

Naturalmente, a potência em um circuito de com sinais alternados é também alternada. Seu valor em um instante escolhido arbitrariamente, denominado *potência instantânea* (p), pode ainda ser obtido a partir de:

$$p = v \cdot i \quad (2.4)$$

Se os sinais de tensão e de corrente são senoidais, então seus valores instantâneos podem ser expressos conforme as equações (2.1) e (2.2), e então a potência instantânea será dada por:

$$p = 2 \cdot V \cdot I \cdot \text{sen}(\omega \cdot t) \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \varphi) \quad (2.5)$$

Por outro lado, lançando mão da conhecida relação trigonométrica dada por:

$$\text{sen } a \cdot \text{sen } b = \frac{1}{2} \cdot \cos(a - b) - \frac{1}{2} \cdot \cos(a + b)$$

Conseqüentemente, tem-se:

$$\text{sen}(\omega \cdot t) \cdot \text{sen}(\omega \cdot t - \varphi) = \frac{1}{2} \cdot \cos \varphi - \frac{1}{2} \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t - \varphi)$$

$$p = V \cdot I \cdot \cos \varphi - V \cdot I \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t - \varphi) \quad (2.6)$$

A figura 2.1 mostra, para dois sinais senoidais arbitrários de mesma frequência, as formas de onda da tensão (em vermelho), da corrente (em azul) e da potência instantânea (em verde) em função do tempo.

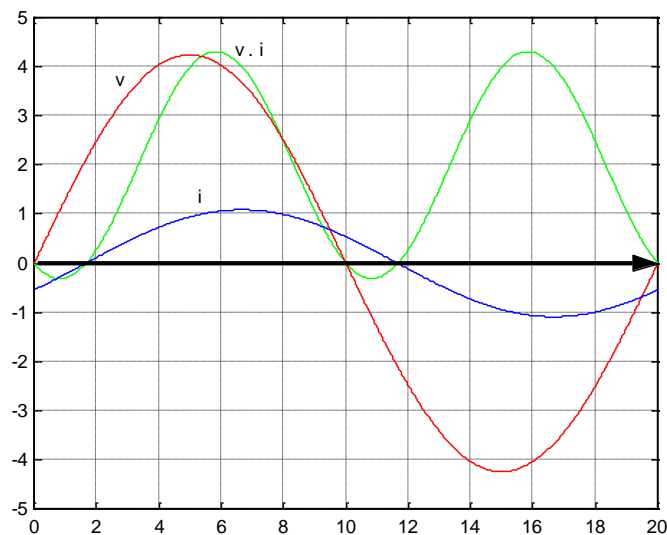


Figura 2.1 - Formas de onda da tensão (em vermelho), da corrente (em azul) e da potência instantânea (em verde).

Uma parcela da potência aparente, denominada por *potência ativa* (P), é a responsável pela realização de trabalho. Essa parcela corresponde ao valor médio da potência instantânea e pode ser calculado pela expressão:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v \cdot i \cdot dt \quad (2.7)$$

Quando a tensão e a corrente são senoidais, o valor médio da potência instantânea, a chamada ativa, corresponde à parcela da potência instantânea, expressa em (2.6), que não varia no tempo, ou seja:

$$P = V \cdot I \cdot \cos \varphi \quad (2.8)$$

Se a carga é um resistor ideal, então $\varphi = 0$, e a potência instantânea (p) e a energia (w) são:

$$p = V \cdot I \cdot [1 - \cos(2 \cdot \omega \cdot t)] \quad (2.9)$$

$$w = \int_0^t p \cdot dt = V \cdot I \cdot t - \frac{V \cdot I}{2 \cdot \omega} \sin(2 \cdot \omega \cdot t) \quad (2.10)$$

Como pode ser observado em (2.9), em qualquer momento que se analise a potência instantânea verifica-se que seu valor é sempre maior ou igual a zero. Este resultado é bastante significativo uma vez que mostra que embora a corrente e a tensão tenham formas de onda alternadas o fluxo de energia mantém-se sempre na mesma direção, obviamente da fonte para a carga.

Para o caso geral expresso pela equação (2.6), quando $\varphi \neq 0$, a potência instantânea é alternada assumindo valores positivos e negativos. Conseqüentemente a energia também flui em ambas as direções. Por exemplo, no

intervalo de tempo onde $k\pi < \omega t < (k\pi + \varphi)$, para $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, a energia flui da carga para a fonte.

A raiz quadrada da diferença entre os valores ao quadrado da potência aparente e da potência ativa é denominada por *potência reativa de deslocamento* (Q) e pode ser interpretada como sendo uma parcela da potência aparente que, apesar de não produzir trabalho, contribui com o aumento do valor eficaz da corrente da fonte. Este fenômeno foi explicado em 1888, ocasião em que foi denominado *deslocamento de fase da corrente* [Sh88] [St88]. Esta parcela adicional de potência deve-se a características da carga que faz com que seja estabelecido um fluxo recíproco de potência: ora fluindo da fonte para a carga, ora no sentido inverso. Seu valor pode ser calculado através da expressão:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.11)$$

ou ainda:

$$Q = V \cdot I \cdot \text{sen } \varphi \quad (2.12)$$

A taxa de variação da energia que é transferida entre a fonte e a carga, em função do tempo, define a grandeza conhecida por *potência instantânea* (p) que é dada por:

$$p = \frac{dw}{dt} \quad (2.13)$$

onde $\frac{dw}{dt}$ é a taxa de variação da energia no tempo.

Embora esteja em perfeito acordo com o conceito físico de potência, a potência instantânea, sendo função do tempo, não se mostra conveniente para retratar o fenômeno de transferência de energia. Contudo, ela pode ser decomposta em duas parcelas, também senoidais, mostradas na figura 2.2.

Para tanto, toma-se a equação da potência instantânea expressa em (2.6) e fazendo uso da conhecida relação trigonométrica dada por:

$$\cos(a + b) = \cos a \cdot \cos b - \operatorname{sen} a \cdot \operatorname{sen} b$$

obtém-se:

$$p = V \cdot I \cdot \cos \varphi - V \cdot I \cdot [\cos(2 \cdot \omega \cdot t) \cdot \cos \varphi - \operatorname{sen}(2 \cdot \omega \cdot t) \cdot \operatorname{sen} \varphi] \quad (2.14)$$

ou

$$p = P - P \cdot \cos(2 \cdot \omega \cdot t) - Q \cdot \operatorname{sen}(2 \cdot \omega \cdot t) \quad (2.15)$$

Uma das parcelas, ora designada por p_{un} (cujo aspecto está mostrado em vermelho na figura 2.2), é a unidirecional. Seu valor médio corresponde à potência ativa que flui da fonte para a carga. É dada por:

$$p_{un} = P \cdot (1 - \cos 2 \cdot \omega \cdot t) \quad (2.16)$$

A outra, ora denominada por p_{al} (cujo aspecto está mostrado em azul na figura 2.2), é a alternada. Seu valor de pico corresponde à potência reativa trocada entre a carga e fonte. É dada por:

$$p_{al} = Q \cdot \operatorname{sen} 2 \cdot \omega \cdot t \quad (2.17)$$

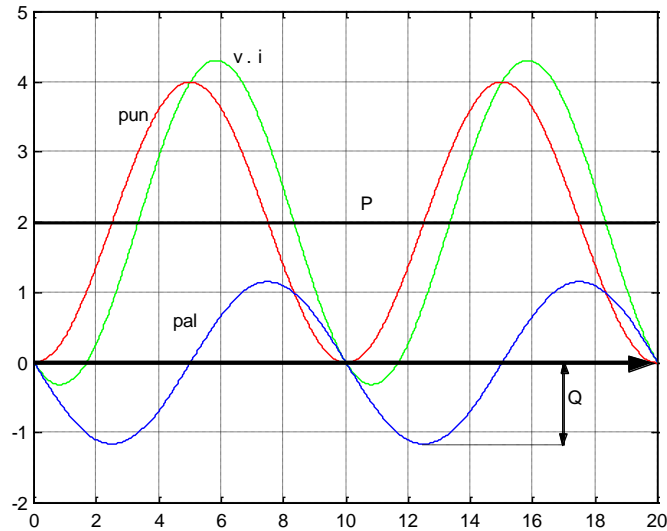


Figura 2.2 - Formas de onda das parcelas da potência instantânea.

A abrangência destes conceitos pode ser facilmente estendida para sistemas trifásicos equilibrados, resultando em:

$$S = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \quad (2.18)$$

$$P = S \cdot \cos \varphi \quad (2.19)$$

$$Q = S \cdot \sin \varphi \quad (2.20)$$

onde:

V – valor eficaz das tensões entre fases;

I – valor eficaz das correntes de linha

2.2.2 – Potências em ambientes não senoidais

Quando as formas de onda da tensão e da corrente são periódicas e não senoidais mantêm-se os mesmos conceitos que a potência ativa e a aparente tinham quando as formas de onda eram senoidais. Apenas a relação mostrada na equação (2.11) perde o significado original, ou seja, o valor da potência reativa (Q) daí obtido não pode mais ser geralmente interpretado como sendo o valor de pico da parcela alternada da potência instantânea. Como será visto posteriormente, somente em casos especiais, quando a tensão e a corrente têm a

mesma forma de onda (ainda que não senoidais), o conceito original de potência reativa pode ser preservado.

Para facilitar a análise de potências em sistemas com sinais não senoidais, será tomado como exemplo um circuito de um retificador trifásico não controlado, sem perdas, alimentado por um sistema capaz de manter a tensão senoidal. Como é bem conhecido, quando este circuito alimenta cargas que mantêm alisado o sinal da corrente DC, há uma solicitação de Volt-Ampère aproximadamente 5% maior que os Watts demandados. Como neste caso não há deslocamento da corrente em relação à tensão, não existe a correspondente potência reativa de deslocamento. Deste modo, para que seja possível equacionar o incremento da potência aparente presente no sistema em virtude da existência de distorção de sinais, faz-se mister que um novo conceito de potência seja inserido nesta análise. Este acréscimo na potência aparente deve-se às características inerentes da carga que provocam a deformação da forma de onda da corrente em relação à forma de onda da tensão. Esta grandeza, denominada de *potência de distorção* (D), foi, na década de 20, inicialmente tratada por Budeanu e pode ser definida como sendo [Cz90]:

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (2.21)$$

A potência não-ativa de distorção tem sido objeto de discussão de vários organismos de padronização internacionais entre os quais cita-se o IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers) e o IEC (International Electrical Committee). Também, desde há muito anos, a formulação de uma expressão da potência aparente que levasse em conta a potência de distorção tem sido objeto de estudos de diversos pesquisadores, como relatado a seguir.

No início do século passado, Budeanu [Bu27] propôs uma equação para o cálculo da potência de distorção. Esta expressão toma por parâmetros os componentes harmônicos da série de Fourier e seus respectivos ângulos. Se

tomados os cuidados necessários com os índices do somatório que faz parte da expressão, para que o resultado não seja dúplice, a expressão resultante, de ora em diante denominada *Budeanu Modificada*, conduz a resultados validados experimentalmente, conforme será mostrado no Capítulo 5.

Em 1931, Fryze [Fr31] sugeriu uma equação de potência aparente baseada na decomposição da corrente em duas parcelas ortogonais no domínio do tempo. Sempre foi enfatizada por Fryze a necessidade de se definir potência sem que se lançasse mão de componentes harmônicos. Naquele momento da história da engenharia elétrica esta premissa era de importância singular, uma vez que a medição dos valores eficazes de tensões e correntes harmônicas, assim como seus respectivos ângulos de fase, apresentava-se como uma tarefa com enormes dificuldades. Embora tenha alcançado sua meta e ainda, apresentado de certa forma um avanço no trato de sinais não senoidais, Fryze, com sua equação, tão somente determinou o incremento de carga que a fonte ficaria submetida.

Em 1971 Kimbark [Ki71] sugeriu uma formulação para a potência aparente da forma como está indicada a seguir:

$$S = \sqrt{P^2 + Q_K^2 + D_K^2} \quad (2.22)$$

onde a potência não-ativa de deslocamento (Q_K) e de distorção (D_K) são definidas como:

$$Q_K = V_1 \cdot I_1 \cdot \text{sen } \varphi_1 \quad (2.23)$$

$$D_K = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_K^2} \quad (2.24)$$

sendo:

V_1 – valor eficaz da parcela fundamental da tensão;

I_1 – valor eficaz da parcela fundamental da corrente;

φ_1 – ângulo de defasagem entre V_1 e I_1 .

Desta forma, Kimbark assumiu que apenas as parcelas fundamentais de tensão e de corrente produzem potência reativa de deslocamento. Mais ainda, admitiu também que todas as outras potências não-ativas de deslocamento associadas aos demais componentes harmônicos seriam de mesma natureza que a potência não-ativa de distorção, podendo portanto serem agregadas em um único fator.

Em 1972, Shepherd e Zakikhani [Sh72] sugerem a decomposição da corrente em duas parcelas ortogonais: uma delas em fase com a tensão da fonte e a outra defasada de 90° . A equação de potência aparente daí resultante apresenta a desvantagem de não explicitar a potência ativa e, por esta razão, foi vigorosamente criticada.

Utilizando uma estratégia parecida às que foram empregadas por Fryze e Shepherd, em 1979 Depenbrock [De79] apresentou uma equação de potência aparente baseada na decomposição da corrente. No entanto, de acordo com a teoria de Depenbrock nem toda a tensão da fonte seria utilizada no seu desenvolvimento. Usou apenas uma parcela correspondente à fundamental e outra, correlata a todos os demais componentes harmônicos. Embora original e interessante, a equação de Depenbrock apresenta problemas quanto à sua implementação, principalmente quando para a correção do fator de potência.

Respectivamente, em 1984 e em 1986, Filipiski [Fi84] e Czarnecki [Cz86] apresentaram expressões para o cálculo da potência de distorção, também baseadas em componentes harmônicas obtidas com uso da série de Fourier.

Finalmente, Yildirim e Fuchs [Yi99] comparam cinco formulações diferentes (Budeanu, Filipiski, Czarnecki, IEEE e Budeanu Modificada). Destas comparações se constata que, apesar da aparente divergência de grafia, as

expressões empregadas conduzem ao mesmo valor para a potência de distorção. Porém, os autores concluem que a expressão de Budeanu Modificada seria, rigorosamente, a mais correta.

2.2.3 – Potências em ambientes não equilibrados

Da mesma forma que a potência de distorção “D”, mais recentemente, a potência de desequilíbrio “A” tem despertado fortes interesses. Não obstante, apesar de sua similaridade com a potência D, ela não fora até então discutida, talvez pela provável dificuldade da assimilação de seu conceito ou, até mesmo, pela complexidade de sua medição.

Para a determinação da potência aparente S, durante muito tempo na história da engenharia elétrica, considerou-se o sistema trifásico como a composição de três monofásicos resultando na conhecida expressão:

$$S = \left| \dot{S}_{(\text{antigo})} \right|$$

$$\dot{S}_{(\text{antigo})} = \dot{V}_{AN} \dot{I}_A^* + \dot{V}_{BN} \dot{I}_B^* + \dot{V}_{CN} \dot{I}_C^* \quad (2.25)$$

onde:

$\dot{S}_{(\text{antigo})}$ - é a potência aparente determinada pelo processo convencional;

\dot{V}_{AN} , \dot{V}_{BN} , e \dot{V}_{CN} - são fasores das tensões de fase;

\dot{I}_A^* , \dot{I}_B^* e \dot{I}_C^* - são os fasores conjugados das correntes de linha.

Da expressão (2.25) resulta que:

$$P = V_{AN} I_A \cdot \cos \varphi_A + V_{BN} I_B \cdot \cos \varphi_B + V_{CN} I_C \cdot \cos \varphi_C \quad (2.26)$$

$$Q = V_{AN} I_A \cdot \sin \varphi_A + V_{BN} I_B \cdot \sin \varphi_B + V_{CN} I_C \cdot \sin \varphi_C \quad (2.27)$$

Em 1922, Buchholz sugeriu um modo diferente de conceituar a potência aparente. Segundo esta nova conceituação, um circuito trifásico com tensões e/ou correntes desequilibradas deveria poder ser representado por um circuito equivalente com tensões e/ou correntes equilibradas que promovessem o mesmo fluxo de potência ativa.

É nesta condição, onde as correntes e as tensões são equilibradas, que o processo de transporte de uma dada quantidade de energia apresenta uma maior eficiência. Em outras palavras, é com tensões e com correntes equilibradas que acontece a minimização das perdas que são inerentes a qualquer processo de transmissão de energia elétrica.

O equacionamento da conceituação proposta por Buchholz pode ser desenvolvido conforme se segue, a partir dos circuitos indicados nas figuras 2.3 e 2.4.

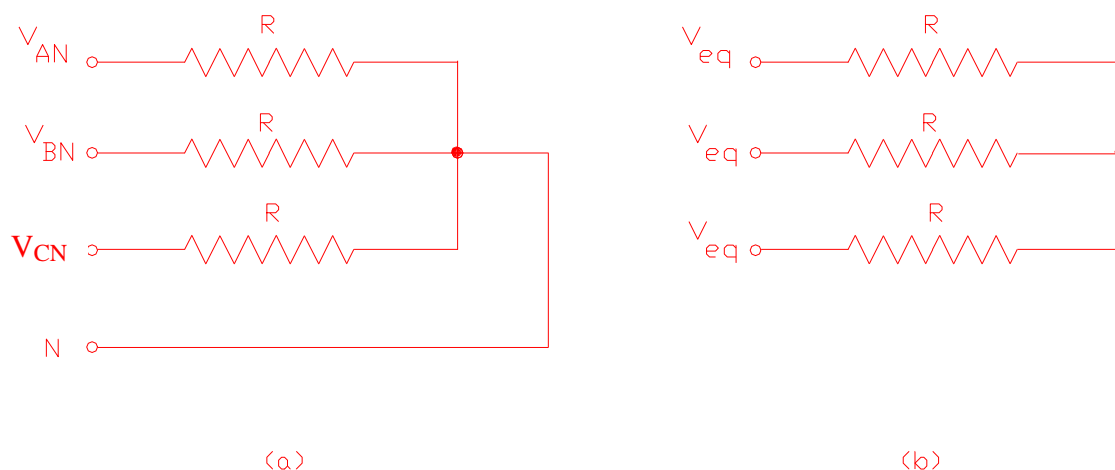


Figura 2.3 - Circuitos de tensões trifásicos qualquer (a) e equilibrado (b).

A potência desenvolvida no circuito com tensões quaisquer (equilibradas ou não) é dada por:

$$P = \frac{V_{AN}^2}{R} + \frac{V_{BN}^2}{R} + \frac{V_{CN}^2}{R} \quad (2.28)$$

A potência desenvolvida no circuito com tensões equilibradas é dada por:

$$P = 3 \cdot \frac{V_{EQ}^2}{R} \quad (2.29)$$

Igualando-se as duas expressões de P, obtém-se:

$$\frac{V_{AN}^2}{R} + \frac{V_{BN}^2}{R} + \frac{V_{CN}^2}{R} = \frac{3 \cdot V_{EQ}^2}{R}$$

Que resulta em:

$$V_{EQ} = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \sqrt{V_{AN}^2 + V_{BN}^2 + V_{CN}^2} \quad (2.30)$$

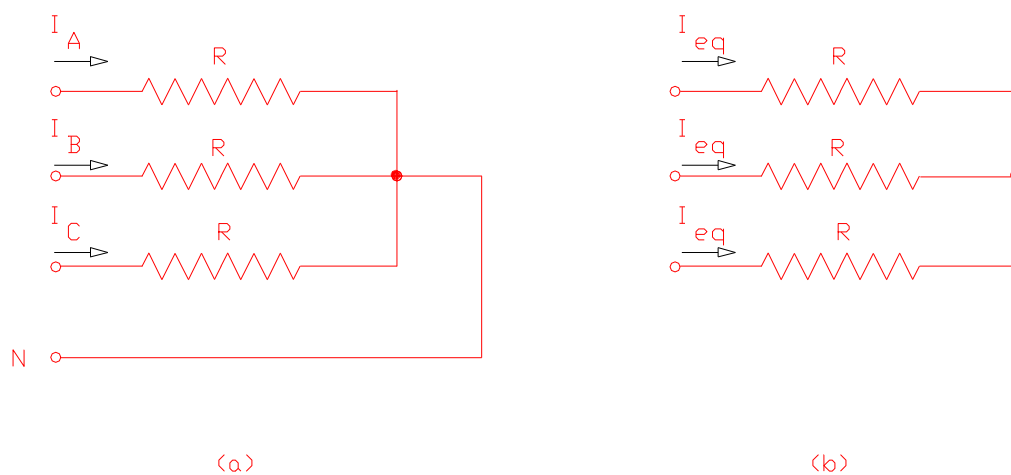


Figura 2.4 - Circuitos de correntes trifásicos qualquer (a) e equilibrado (b)

A potência desenvolvida no circuito com correntes quaisquer (equilibradas ou não) é dada por:

$$P = R \cdot I_A^2 + R \cdot I_B^2 + R \cdot I_C^2 \quad (2.31)$$

A potência desenvolvida no circuito com correntes equilibradas é dada por:

$$P = 3 \cdot R \cdot I_{EQ}^2 \quad (2.32)$$

Igualando-se as duas expressões de P, obtém-se:

$$R \cdot I_A^2 + R \cdot I_B^2 + R \cdot I_C^2 = 3 \cdot R \cdot I_{EQ}^2$$

Que resulta em:

$$I_{EQ} = \frac{\sqrt{3}}{3} \cdot \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2} \quad (2.33)$$

Enfim, a potência aparente correspondente aos sinais equilibrados de tensão e de corrente é dada por:

$$S = 3 \cdot V_{EQ} \cdot I_{EQ} \quad (2.34)$$

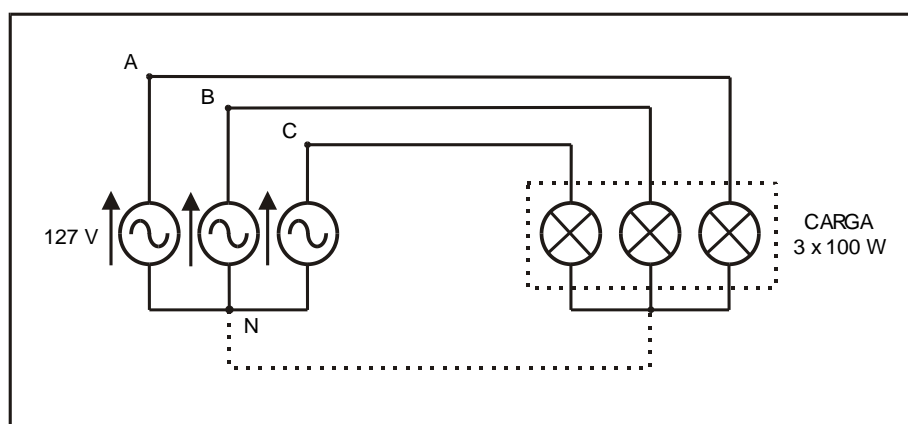
ou:

$$S = \sqrt{V_{AN}^2 + V_{BN}^2 + V_{CN}^2} \cdot \sqrt{I_A^2 + I_B^2 + I_C^2} \quad (2.35)$$

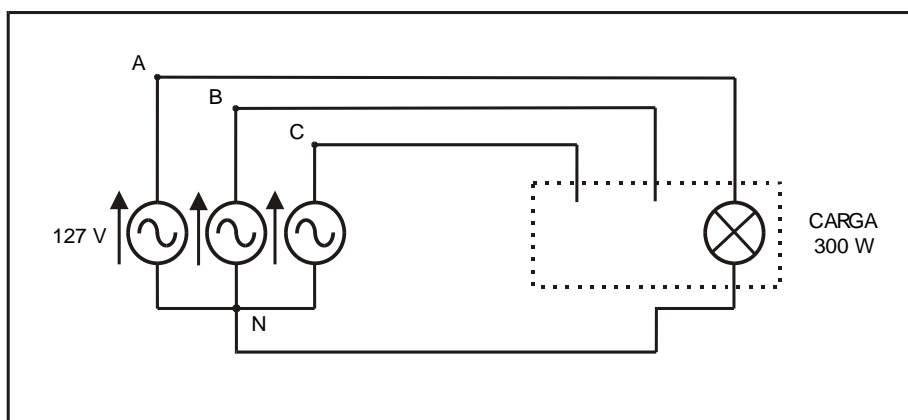
Neste caso, o cálculo da potência aparente leva em conta o efeito do desequilíbrio seja de tensão, de corrente, ou de ambos acontecendo simultaneamente. Mais tarde, em 1995, o IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situation [Ie95] adotou esta vertente. Assim, concordando com esta conceituação, neste trabalho o cálculo de S será efetuado com uso da equação (2.35).

As expressões (2.25) e (2.35) conduzem a resultados idênticos da potência aparente quando o sistema em análise é equilibrado e possui sinais de tensão e corrente senoidais. Porém, apresentam resultados diversos quando estas características de equilíbrio e pureza não estão presentes.

Para elucidar, como exemplo, tomem-se dois alimentadores trifásicos idênticos com tensões equilibradas, de 127 V (tensão fase-neutro), conforme estão mostrados nas figuras 2.5a e 2.5b.



(2.5a)



(2.5b)

Figura 2.5 – a) sistema alimentador equilibrado com carga equilibrada;
b) sistema alimentador equilibrado com carga desequilibrada.

O primeiro alimenta uma carga equilibrada constituída por três cargas puramente resistivas, de 100 W, cada uma conectada entre uma das fases e o neutro, perfazendo deste modo uma potência ativa total de 300 W. O segundo supre uma carga de 300 W concentrada em apenas uma das fases, estando as outras duas fases em vazio.

Utilizando-se as expressões (2.25), (2.26) e (2.27) para os dois circuitos, resulta:

$$S = 300 \text{ VA} \qquad P = 300 \text{ W} \qquad Q = 0 \text{ VAr}$$

Desta forma, o *fator de potência* (FP) que é a relação entre a potência ativa e a potência aparente resulta unitário para ambos os circuitos. Porém, a aplicação da expressão (2.35) conduz a um resultado diverso: o primeiro circuito que é equilibrado apresenta, também neste caso, um fator de potência unitário. Já no caso do segundo circuito, desequilibrado, os resultados seriam:

$$S = \sqrt{3 \cdot (127)^2} \cdot \sqrt{\left(\frac{300}{127}\right)^2 + 0 + 0} \Rightarrow S = 519,6 \text{ VA}$$

$$P = 300 \text{ W} \quad Q = 0 \text{ VAr}$$

Esta outra maneira de calcular a potência aparente faz com que o segundo circuito apresente a um fator de potência dado por:

$$FP = \frac{300}{519,6} \Rightarrow FP = 0,5774 \quad \text{ou} \quad FP = \frac{\sqrt{3}}{3}$$

Nota-se que nos dois circuitos apresentados no exemplo não há potência reativa de deslocamento (Q), uma vez que as cargas são puramente resistivas. Da mesma forma, não existe potência não-ativa de distorção (D), uma vez que as cargas são inerentemente lineares. Porém, há o aparecimento de uma outra

espécie de potência não-ativa que faz aumentar o valor da potência aparente (S) sem que, obviamente, incremente o valor da potência ativa (P). Esta potência será ora em diante denominada *potência não-ativa de desequilíbrio*.

Historicamente, por décadas este fenômeno tem sido relevado, mas doravante, em se tratando da elaboração de um novo protocolo de medição para uma política equânime de tarifação, este fenômeno deverá ocupar também seu lugar, como está se fazendo para o fenômeno harmônico.

CAPÍTULO 3

PROPOSTA DE DISCRIMINAÇÃO DAS PARCELAS NÃO-ATIVAS DA POTÊNCIA APARENTE

3.1 - Introdução

O principal objetivo deste capítulo é apresentar uma modelagem que permita discriminar as parcelas de potências não-ativas a fim de que seja possível separar o efeito causado por cada uma delas. Para tanto, serão inicialmente tecidas algumas considerações a respeito de política tarifária e das potências compreendidas pelo processo de comercialização da energia elétrica.

3.2 – Considerações gerais

Qualquer que seja a política tarifária que se pretenda aplicar à comercialização da energia elétrica são sempre necessários dois instrumentos: um legal e um físico. O primeiro diz respeito à filosofia desta política no que tange a parâmetros, balizas e procedimentos e ao correspondente embasamento legal, enquanto que o segundo relaciona-se com a capacidade técnica de tornar exequível a implementação prática desta política, mantendo-se os custos dentro de limites que não venham a obstruir sua aplicação. Estes dois instrumentos podem ser definidos pelo conjunto de regras que prescrevem a tarifação. É indubitável que o segundo instrumento deva possuir características tais que possibilitem a aplicação dos preceitos definidos no primeiro. Por outro lado, o primeiro instrumento, o legal, deve ser suficientemente simples e transparente de modo a tornar factível a fabricação e a utilização do segundo, o físico. Além disso, os dois instrumentos devem, sobretudo, ser equânimes o bastante a fim de que seja possível preservar os direitos das partes envolvidas no processo de comercialização da energia.

3.3 - Tarifação sensível à qualidade da energia elétrica

Feuerbach [Fe47], ilustre penalista alemão, criou a seguinte máxima jurídica:

“NULLUM CRIMEN, NULLA POENA SINE PRAEUIA LEGE.”

(Não há crime sem lei anterior que o defina e
não há pena sem prévia fixação legal de limites.)

Tendo em vista os problemas que afetam o setor elétrico, uma das maiores questões despontadas recentemente, indubitavelmente, é: como estabelecer até que ponto a presença de harmônicos e/ou de desequilíbrios nos sinais de tensão, de corrente ou de ambos os sinais são simplesmente ocupação de potência, como é o caso da potência reativa provocada por deslocamento entre os sinais; ou, até onde causam danos substanciais ao sistema, ocasionando, dentre outros, sobretensões harmônicas, ressonâncias, quebra no fornecimento em virtude de atuação imprópria do sistema de proteção, além de perdas vultosas no faturamento da energia?

Conforme McEachern [Mc95], de um modo geral, a tarifação tradicional de energia e demanda deixa a desejar quando da contabilização destes efeitos. Resulta, então, a obrigatoriedade do rateamento por todos os consumidores, tanto dos custos associados à exigência de novos investimentos, conduzida pela ocupação desnecessária da capacidade do sistema elétrico, bem como do ônus agregado à fragilidade do processo de medição tradicional quando exposto a ambientes com sinais distorcidos.

A hipótese jurídica sintetizada por Feuerbach mostra ser imprescindível que se disponha de parâmetros regulamentados por lei para que seja possível desestimular e, quando cabível, punir o comportamento mostrado nos dias de

hoje pela maioria dos setores que participam do comércio da energia elétrica que, sem dúvida, até por falta de padrões, não tem como nortear seu procedimento.

Uma proposta de tarifação sensível à qualidade da energia deve possuir características tais que lhe permitam estabelecer e definir princípios que orientem a comercialização da energia elétrica. Dentre outras particularidades, esta proposta de tarifação deve ser apta a:

- estabelecer uma definição para a energia aparente que tenha uma boa receptividade pela maioria partes envolvidas no comércio e uso da energia elétrica. Essa definição deverá ter como alvo maior contabilizar a ocupação total do sistema elétrico, levando em conta, inclusive, aquela causada por cargas não lineares e ou desequilibradas;
- estabelecer o modelo que regerá a discriminação das parcelas de potência não-ativas a fim de se separar o efeito causado por cada uma delas. Entende-se por potências não-ativas todas aquelas capazes de ocupar o sistema elétrico sem realizar trabalho. Além disto, discernir as parcelas ativas indesejáveis (não úteis) na transferência de energia;
- da mesma forma que para a potência reativa de deslocamento, definir Fatores de Referência para a injeção harmônica por cargas não lineares e para desequilíbrios por cargas desequilibradas a partir dos quais tolera-se um determinado nível de ocupação excedente;
- definir a direção dos fenômenos não-ativos para que se possa, ou não, imputar ônus ao cliente.

3.4 - A potência aparente

Desde há muito, tem-se discutido sobre a melhor forma de definir o que é potência aparente, pois daí deriva toda a noção de ocupação do sistema elétrico por uma determinada carga.

Parte dos profissionais que trabalham no setor elétrico já reconhecem que a potência aparente deva ser calculada pela multiplicação da *tensão trifásica*

equivalente pela *corrente trifásica equivalente*, como mostrado na equação (2.35). Paulatinamente, o uso desta expressão tem alcançado maior penetração já que representa uma significativa evolução no cálculo da potência aparente, uma vez que considera os efeitos de ocupação causados pelas potências não-ativas de distorção e de desequilíbrio e ainda, o sistema trifásico é visto como um todo e não como três sistemas monofásicos independentes, como é tratado quando se faz uso da equação (2.25) para o cálculo da potência aparente.

Por outro lado, a potência aparente é a composição de todas as potências envolvidas na ocupação do sistema elétrico e é expressa por:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2 + A^2} \quad (3.1)$$

onde,

P - potência ativa

Q - potência não-ativa de deslocamento

D - potência não-ativa de distorção

A - potência não-ativa de desequilíbrio

3.5 - Potências em análise

Para que seja possível determinar a expressão de cada uma das potências, ativa e não-ativas, é necessário discriminar cada componente harmônica dos sinais elétricos envolvidos na medição. Sendo assim, inicialmente a transformada discreta de Fourier, que é uma ferramenta básica para se efetue esta tarefa a contento, será aplicada aos sinais trifásicos de tensão e de corrente de um circuito elétrico. Desta forma, estes sinais podem ser caracterizados pelas expressões a seguir:

Tensões

$$v_A(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{An} \sin(n\omega t + \phi_{An}) \quad (3.2)$$

$$v_B(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{Bn} \sin(n\omega t + \phi_{Bn}) \quad (3.3)$$

$$v_C(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{Cn} \sin(n\omega t + \phi_{Cn}) \quad (3.4)$$

Correntes

$$i_A(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{An} \sin(n\omega t + \phi_{An}) \quad (3.5)$$

$$i_B(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{Bn} \sin(n\omega t + \phi_{Bn}) \quad (3.6)$$

$$i_C(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{Cn} \sin(n\omega t + \phi_{Cn}) \quad (3.7)$$

onde V_{An} , V_{Bn} , V_{Cn} , e I_{An} , I_{Bn} , I_{Cn} são, respectivamente, os valores eficazes dos harmônicos de ordem “n” das tensões e correntes nas fases A, B e C.

O valor médio dos sinais de tensão e corrente não foram representados porque os componentes não alternados a eles correlatos serem, na grande maioria das vezes, inexistentes na rede com sinais alternados em regime permanente.

3.5.1 - A potência ativa “P”

A potência ativa total P é definida como o valor médio da potência em função do tempo. No caso do sistema trifásico é expressa como:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T v_A(t) i_A(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T v_B(t) i_B(t) dt + \frac{1}{T} \int_0^T v_C(t) i_C(t) dt \quad (3.8)$$

Por outro lado, sabe-se que os harmônicos de ordens diferentes são regidos pelo princípio da ortogonalidade [Fe74], que pode ser traduzido por:

$$\frac{1}{T} \int_0^T \text{sen}(n\omega t + \theta_n) \cdot \text{sen}(m\omega t + \theta_m) dt = 0$$

onde:

T é o período da fundamental dos dois sinais harmônicos;

θ_n e θ_m são ângulos de fase quaisquer;

n e m são inteiros positivos e $n \neq m$.

Então, aplicando-se em (3.8) as expressões (3.2) a (3.7) e ainda, levando-se em conta o princípio da ortogonalidade entre harmônicos de tensão e corrente de ordens diferentes (ou seja, harmônicos de tensão e corrente de ordens diferentes não produzem potência ativa), obtém-se:

$$\begin{aligned} P = & V_{A1} I_{A1} \cos(\phi_{A1} - \varphi_{A1}) + V_{A2} I_{A2} \cos(\phi_{A2} - \varphi_{A2}) + \dots + \\ & V_{B1} I_{B1} \cos(\phi_{B1} - \varphi_{B1}) + V_{B2} I_{B2} \cos(\phi_{B2} - \varphi_{B2}) + \dots + \\ & V_{C1} I_{C1} \cos(\phi_{C1} - \varphi_{C1}) + V_{C2} I_{C2} \cos(\phi_{C2} - \varphi_{C2}) + \dots \end{aligned} \quad (3.9)$$

A equação (3.9) pode ser simplificada resultando em:

$$P = P_{A1} + P_{A2} + \dots + P_{B1} + P_{B2} + \dots + P_{C1} + P_{C2} + \dots \quad (3.10)$$

o que resulta em:

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} P_{An} + \sum_{n=1}^{\infty} P_{Bn} + \sum_{n=1}^{\infty} P_{Cn} = \sum_{\substack{n=1 \\ j=A,B,C}}^{\infty} P_{jn} \quad (3.11)$$

Neste ponto do desenvolvimento cabe ressaltar que em sistemas elétricos é usual que a tensão possua uma forte característica senoidal, ou seja, as distorções

nos sinais de tensão são pequenas e, portanto, normalmente os valores das potências ativas dos harmônicos ($P_{A2}, P_{A3}, \dots, P_{B2}, P_{B3}, \dots, P_{C2}, P_{C3}, \dots$) são também pequenos podendo muitas vezes ser desprezados. Apesar disto, neste trabalho, em uma primeira análise, eles serão considerados.

3.5.2 - A potência não-ativa de deslocamento “Q”

Analogamente à potência ativa “P”, a potência não-ativa de deslocamento “Q” pode ser expressa por:

$$\begin{aligned} Q = & V_{A1} I_{A1} \text{sen}(\phi_{A1} - \varphi_{A1}) + V_{A2} I_{A2} \text{sen}(\phi_{A2} - \varphi_{A2}) + \dots + \\ & V_{B1} I_{B1} \text{sen}(\phi_{B1} - \varphi_{B1}) + V_{B2} I_{B2} \text{sen}(\phi_{B2} - \varphi_{B2}) + \dots + \\ & V_{C1} I_{C1} \text{sen}(\phi_{C1} - \varphi_{C1}) + V_{C2} I_{C2} \text{sen}(\phi_{C2} - \varphi_{C2}) + \dots \end{aligned} \quad (3.12)$$

A equação (3.12) que pode ser simplificada resultando em:

$$Q = Q_{A1} + Q_{A2} + \dots + Q_{B1} + Q_{B2} + \dots + Q_{C1} + Q_{C2} + \dots \quad (3.13)$$

Então;

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} Q_{An} + \sum_{n=1}^{\infty} Q_{Bn} + \sum_{n=1}^{\infty} Q_{Cn} = \sum_{\substack{n=1 \\ j=A,B,C}}^{\infty} Q_{jn} \quad (3.14)$$

Vale observar que as parcelas de potência de deslocamento são grandezas oriundas do mesmo fenômeno elétrico, ou seja, o deslocamento angular entre a tensão e a corrente de mesma ordem harmônica, para uma mesma fase, refletindo portanto a mesma natureza. Desta forma, o valor total da grandeza é obtido pela soma escalar das parcelas, da mesma maneira que as parcelas da potência ativa.

Igualmente como acontece com a potência ativa, devido ao fenômeno da ortogonalidade entre os harmônicos, a potência de deslocamento não contém

termos cruzados entre harmônicos de tensão e corrente de ordens diferentes. Como exemplo, pode ser citado que: um 3º harmônico do sinal de tensão de uma determinada fase não produz potência ativa e nem potência de deslocamento com o 5º harmônico do sinal de corrente da mesma fase.

3.5.3 - A potência não-ativa de distorção “D”

Uma maneira de se chegar à expressão que possibilite o cálculo da potência não-ativa de distorção (D) consiste em partir de um sistema monofásico fazendo, portanto, com que a potência não-ativa de desequilíbrio (A) seja naturalmente igual a zero. Lançando-se mão das expressões (2.3) e (2.21), resulta:

$$S^2 = V^2 \cdot I^2 \Rightarrow S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (3.15)$$

$$D^2 = V^2 \cdot I^2 - P^2 - Q^2$$

onde:

V e I são os valores eficazes totais dos sinais de tensão e corrente do circuito monofásico em questão.

Levando-se em conta a presença de harmônicos nos sinais de tensão e corrente, obtém-se:

$$V^2 = V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots \Rightarrow V^2 = \sum_{n=1}^{\infty} V_n^2 \quad (3.16)$$

$$I^2 = I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots \Rightarrow I^2 = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 \quad (3.17)$$

$$D^2 = (V_1^2 + V_2^2 + V_3^2 + \dots) \cdot (I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + \dots) - P^2 - Q^2$$

$$\begin{aligned}
D^2 = & \left(V_1^2 \cdot I_1^2 + V_2^2 \cdot I_2^2 + V_3^2 \cdot I_3^2 \right) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=m+1}^{\infty} \left(V_m^2 \cdot I_n^2 + V_n^2 \cdot I_m^2 \right) + \\
& - \left(P_1^2 + P_2^2 + P_3^2 + \dots + 2 \cdot P_1 \cdot P_2 + 2 \cdot P_1 \cdot P_3 + 2 \cdot P_2 \cdot P_3 + \dots \right) + \\
& - \left(Q_1^2 + Q_2^2 + Q_3^2 + \dots + 2 \cdot Q_1 \cdot Q_2 + 2 \cdot Q_1 \cdot Q_3 + 2 \cdot Q_2 \cdot Q_3 + \dots \right)
\end{aligned}$$

Tem-se que:

$$V_1^2 \cdot I_1^2 - P_1^2 - Q_1^2 = 0$$

$$V_1^2 \cdot I_1^2 - P_1^2 - Q_1^2 = 0$$

$$2 \cdot P_1 \cdot P_2 = 2 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \gamma_1 \cdot V_2 \cdot I_2 \cdot \cos \gamma_2 \quad (3.18)$$

$$2 \cdot Q_1 \cdot Q_2 = 2 \cdot V_1 \cdot I_1 \cdot \sen \gamma_1 \cdot V_2 \cdot I_2 \cdot \sen \gamma_2 \quad (3.19)$$

Somando as equações 3.18 e 3.19 resulta em:

$$2 \cdot (P_1 \cdot P_2 + Q_1 \cdot Q_2) = 2 \cdot V_1 \cdot I_2 \cdot V_2 \cdot I_1 \cdot (\cos \gamma_1 \cdot \cos \gamma_2 + \sen \gamma_1 \cdot \sen \gamma_2)$$

$$2 \cdot (P_1 \cdot P_2 + Q_1 \cdot Q_2) = 2 \cdot V_1 \cdot I_2 \cdot V_2 \cdot I_1 \cdot \cos(\gamma_1 + \gamma_2)$$

$$2 \cdot V_m \cdot I_n \cdot V_n \cdot I_m \cdot \cos(\gamma_m - \gamma_n)$$

O que resulta na expressão da potência de distorção para uma única fase:

$$D_{(\text{uma fase})}^2 = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=m+1}^{\infty} V_m^2 I_n^2 + V_n^2 I_m^2 - 2 V_m I_n V_n I_m \cos(\gamma_m - \gamma_n) \quad (3.20)$$

onde:

γ_m e γ_n são os ângulos formados entre a tensão e a corrente de mesma ordem harmônica:

$$\begin{aligned}\gamma_m &= \phi_m - \varphi_m \\ \gamma_n &= \phi_n - \varphi_n\end{aligned}\quad (3.21)$$

De maneira idêntica àquela que ocorre com as outras potências (P e Q), as parcelas de potência de distorção são grandezas oriundas do mesmo fenômeno elétrico, ou seja, a distorção na tensão e / ou na corrente refletindo, portanto, a mesma natureza. Desta forma, o valor total da grandeza trifásica pode ser obtido pela soma escalar das parcelas das outras fases. Em outras palavras, seria dizer o mesmo que agrupar todas as parcelas de potência de distorção de todas as fases no mesmo eixo cartesiano. Assim, a expressão trifásica desta potência pode ser escrita como:

$$D = \sum_{k=A,B,C} \sqrt{\sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=m+1}^{\infty} V_{km}^2 I_{kn}^2 + V_{kn}^2 I_{km}^2 - 2 \cdot V_{km} I_{kn} V_{kn} I_{km} \cos(\gamma_{km} - \gamma_{kn})} \quad (3.22)$$

Na expressão (3.22) a potência de distorção é função apenas dos harmônicos de tensão, de corrente e dos respectivos ângulos. Em razão disto, ela permite que o valor desta potência seja calculado diretamente, sem que haja a necessidade de que sejam calculados os valores das potências aparente (S), ativa (P) e reativa de deslocamento (Q). O cálculo adicional destas potências, evidentemente, seria imprescindível se fosse utilizada a equação (2.21).

Nota-se ainda que nas parcelas da expressão (3.22), não existem termos onde m seja igual a n, bem como que, uma vez efetuado o produto entre um harmônico de tensão por um de corrente, este produto não mais se repete. Em outras palavras, por exemplo, ocorrendo $m = 3$ e $n = 5$, não mais ocorrerá $m = 5$ e $n = 3$, o que poderia levar a erros de duplicidade de contabilização [Yi99].

3.5.4 - A potência não-ativa de desequilíbrio “A”

Para facilitar o entendimento inicial e o posterior modelagem deste fenômeno, há a necessidade de que seja considerada a existência de um sistema trifásico desequilibrado dotado de sinais senoidais, isto é, sem nenhuma distorção. Para que mais tarde possam ainda ser agregados os efeitos dos harmônicos, de modo a possibilitar a análise simultânea dos resultados da presença de sinais distorcidos em circuitos desequilibrados, será necessário tratar cada ordem harmônica separadamente (por exemplo: 3º harmônico de tensão e 3º de corrente, para as três fases) como um sistema trifásico desequilibrado e distorcido, no qual os harmônicos de ordens diferentes são desacoplados entre si. Ao final, os resultados das potências de desequilíbrio, um para cada ordem harmônica, são reunidos para formar a potência de desequilíbrio total.

Inicialmente, considera-se um sistema onde todos os sinais são senoidais, porém desequilibrado tanto em tensão quanto em corrente. Como no sistema considerado existem somente as componentes fundamentais dos sinais envolvidos, a partir de (3.2) a (3.7), (3.11) e (3.14), pode-se escrever:

$$\begin{aligned} S_1^2 &= V_{EQ1}^2 \cdot I_{EQ1}^2 \\ S_1^2 &= (V_{A1}^2 + V_{B1}^2 + V_{C1}^2) \cdot (I_{A1}^2 + I_{B1}^2 + I_{C1}^2) \\ S_1^2 &= P_1^2 + Q_1^2 + A_1^2 \end{aligned} \quad (3.23)$$

onde;

$$\begin{aligned} P_1^2 &= (P_{A1} + P_{B1} + P_{C1})^2 \\ P_1^2 &= [V_{A1} I_{A1} \cos(\phi_{A1} - \varphi_{A1}) + V_{B1} I_{B1} \cos(\phi_{B1} - \varphi_{B1}) + V_{C1} I_{C1} \cos(\phi_{C1} - \varphi_{C1})]^2 \end{aligned} \quad (3.24)$$

e;

$$\begin{aligned} Q_1^2 &= (Q_{A1} + Q_{B1} + Q_{C1})^2 \\ Q_1^2 &= [V_{A1} I_{A1} \sin(\phi_{A1} - \varphi_{A1}) + V_{B1} I_{B1} \sin(\phi_{B1} - \varphi_{B1}) + V_{C1} I_{C1} \sin(\phi_{C1} - \varphi_{C1})]^2 \end{aligned} \quad (3.25)$$

Aplicando-se (3.24) e (3.25) em (3.23) chega-se a:

$$A_1 = \sqrt{\Lambda_1 + \Gamma_1 + \Psi_1 + \Theta_1} \quad (3.26)$$

onde:

$$\Lambda_1 = V_{A1}^2 I_{B1}^2 + V_{A1}^2 I_{C1}^2 + V_{B1}^2 I_{A1}^2 + V_{B1}^2 I_{C1}^2 + V_{C1}^2 I_{A1}^2 + V_{C1}^2 I_{B1}^2$$

$$\Gamma_1 = -2 \cdot V_{A1} V_{B1} I_{A1} I_{B1} \cos(\gamma_{A1} - \gamma_{B1})$$

$$\Psi_1 = -2 \cdot V_{B1} V_{C1} I_{B1} I_{C1} \cos(\gamma_{B1} - \gamma_{C1})$$

$$\Theta_1 = -2 \cdot V_{C1} V_{A1} I_{C1} I_{A1} \cos(\gamma_{C1} - \gamma_{A1})$$

Com relação à expressão (3.26), pode-se concluir que:

- para o seu desenvolvimento considerou-se apenas a presença de sinais senoidais; desta forma, os resultados dela obtidos não levam em conta a potência não-ativa de desequilíbrio resultante de sinais distorcidos;
- a expressão revela que a potência de desequilíbrio (A) é oriunda do produto cruzado dos sinais de tensão e corrente de fases diferentes;
- para um sistema com carga equilibrada, ou seja, com impedâncias idênticas em cada fase o resultado da potência de desequilíbrio é nulo, independente do equilíbrio das tensões;
- os ângulos γ foram definidos na expressão (3.21), ou seja, $\gamma_{(A,B,C)n} = \phi_{(A,B,C)n} - \varphi_{(A,B,C)n}$, onde $\phi_{(A,B,C)n}$ é o ângulo da tensão harmônica de ordem n , e $\varphi_{(A,B,C)n}$ é o ângulo da corrente harmônica de ordem n . No caso particular da expressão em pauta, $n = 1$.

Caso existam harmônicos desequilibrados de tensão e ou de corrente, o mesmo fenômeno se repetirá igualmente para cada ordem harmônica de maneira independente, devido ao princípio da ortogonalidade. Pelo fato de serem

fenômenos de mesma natureza, a potência fundamental de desequilíbrio e as harmônicas de desequilíbrio (A_1, A_2, \dots) podem ser agrupadas cartesianamente na mesma dimensão, portanto, podem ser somadas aritmeticamente. Disto resulta então a expressão (3.27) que fornece a potência total de desequilíbrio envolvendo harmônicos.

$$A = A_1 + A_2 + A_3 + \dots = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{\Lambda_n + \Gamma_n + \Psi_n + \Theta_n} \quad (3.27)$$

onde:

$$\Lambda_n = V_{A_n}^2 I_{B_n}^2 + V_{A_n}^2 I_{C_n}^2 + V_{B_n}^2 I_{A_n}^2 + V_{B_n}^2 I_{C_n}^2 + V_{C_n}^2 I_{A_n}^2 + V_{C_n}^2 I_{B_n}^2$$

$$\Gamma_n = -2 \cdot V_{A_n} V_{B_n} I_{A_n} I_{B_n} \cos(\gamma_{A_n} - \gamma_{B_n})$$

$$\Psi_n = -2 \cdot V_{B_n} V_{C_n} I_{B_n} I_{C_n} \cos(\gamma_{B_n} - \gamma_{C_n})$$

$$\Theta_n = -2 \cdot V_{C_n} V_{A_n} I_{C_n} I_{A_n} \cos(\gamma_{C_n} - \gamma_{A_n})$$

É interessante observar que a potência de desequilíbrio pode ser interpretada como de uma natureza oscilatória. Para que esta característica possa ser mais bem compreendida, tome-se, por exemplo, uma carga trifásica equilibrada e constituída somente por resistores. O sistema de suprimento é também equilibrado e o valor eficaz da tensão em cada uma das fases é de 100 V. O valor eficaz da corrente de fase é de 10 A. As potências instantâneas de cada uma das fases (p_a, p_b, p_c) e a potência instantânea total (p_t) são dadas por:

$$p_a = v_a \cdot i_a ; \quad p_b = v_b \cdot i_b ; \quad p_c = v_c \cdot i_c$$

$$p_t = v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c$$

e estão mostradas a seguir na figura 3.1.

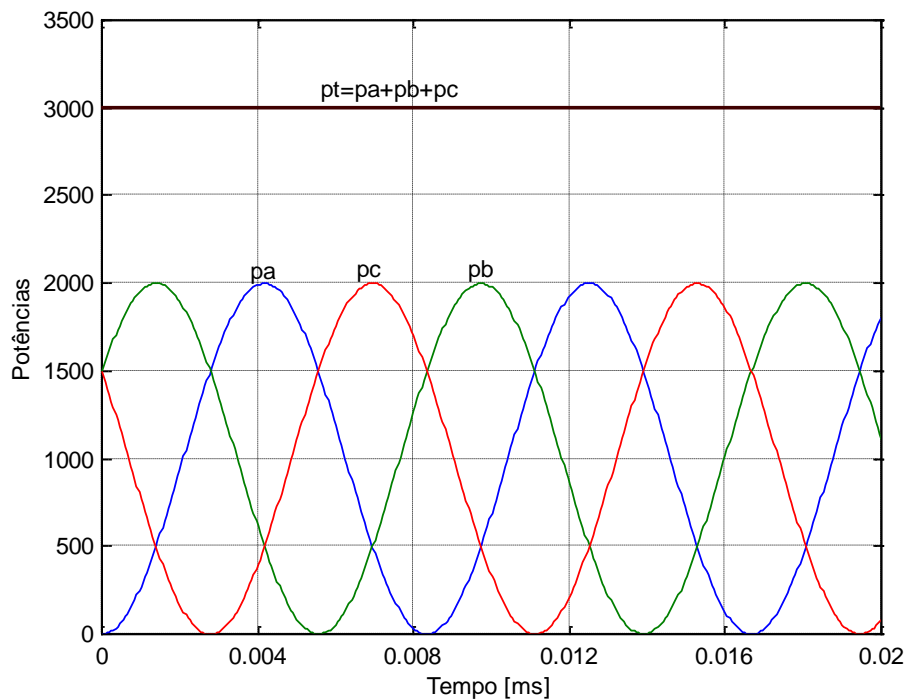


Figura 3.1 – Potências instantâneas em um sistema equilibrado.

Nesta condição, obviamente, a potência não-ativa de desequilíbrio é nula e, como a carga é puramente resistiva, não há a ocorrência de nenhuma potência oscilante. Vale ainda salientar que a potência total dada pelo somatório das potências de cada uma das fases é invariante no tempo.

Suponha-se agora que o sistema alimentador permaneça nas mesmas condições anteriores e que a carga seja agora desequilibrada, por exemplo, alterando a corrente na fase C, de 10 para 2,5 A. As potências instantâneas de cada uma das fases, a potência instantânea total e a potência média (P) estão mostradas na figura 3.2.

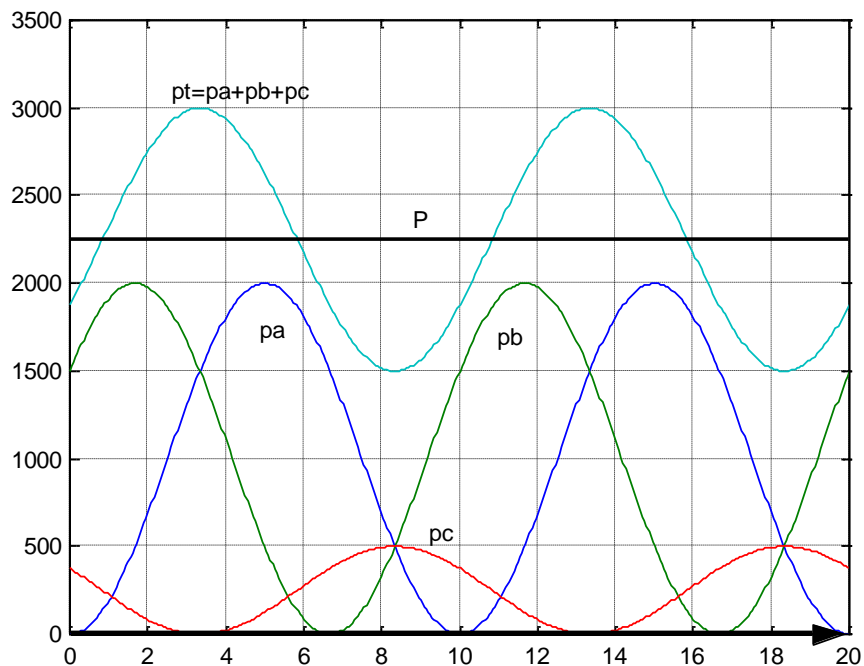


Figura 3.2 - Potências instantâneas em um sistema desequilibrado.

Na figura 3.3 estão mostradas apenas as curvas da potência média e a parcela oscilante (p_{osc}) da potência total.

Neste caso, a natureza da potência oscilatória difere fundamentalmente daquela que ocorre quando a carga é indutiva ou capacitiva, uma vez que na circunstância em estudo, não há como existir armazenamento de energia na carga.

O surgimento desta potência oscilante, conforme expõe o Dr. Alexander Emanuel em sua nota de aula "Apparent Power: Part I - Components and Physical Interpretation", Worcester Polytechnic Institute, Worcester - MA - USA, pode ser explicado como sendo o resultado da interação entre as componentes de seqüência positiva da tensão da fonte, com as componentes de seqüência não-positiva da corrente, estas últimas, advindas do desequilíbrio causado pela carga.

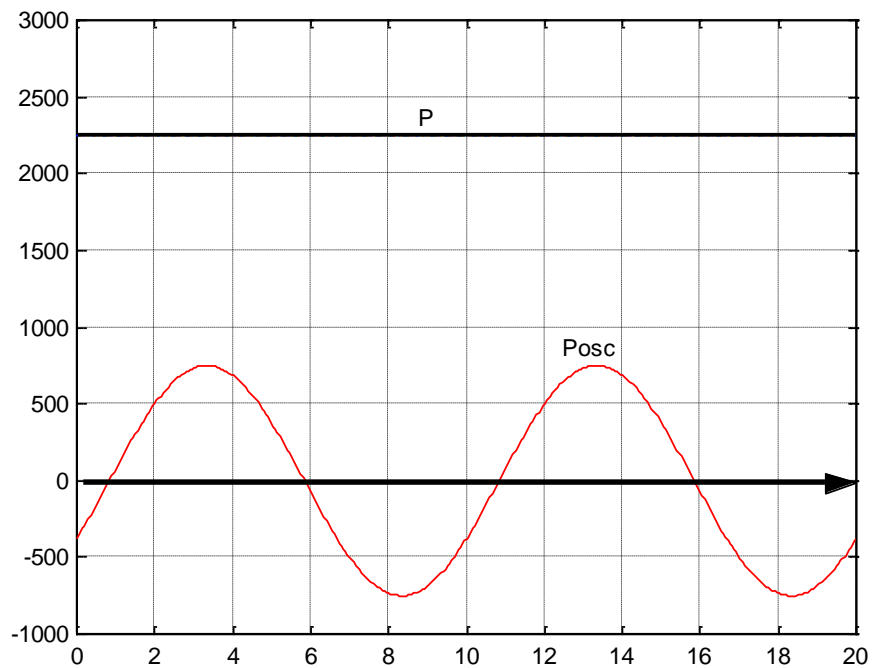


Figura 3.3 - Potência média e a parcela oscilante da potência total.

A modelagem desenvolvida neste capítulo possibilita discriminar satisfatoriamente as parcelas não convencionais de potências não-ativas. Apresentar e analisar amplamente um modo como cada uma destas parcelas podem interferir no processo de faturamento da energia elétrica é o principal objetivo do próximo capítulo.

CAPÍTULO 4

PROPOSTA DE NOVOS PROTOCOLOS DE MEDIÇÕES

4.1 - Introdução

Considerar a existência de outras parcelas de potências não-ativas na composição da potência aparente, além da já universalmente sancionada potência reativa de deslocamento, induz naturalmente ao estudo do modo como estas parcelas possam interferir no processo de faturamento da energia elétrica. Mostrar que esta intervenção é viável, através do uso do conceito de fator de potência, estabelecer um roteiro para o cálculo de novos fatores de potência que estejam associados a estas outras parcelas de potências não-ativas e discutir a aplicação destes fatores buscando uma tarifação mais justa são os principais objetivos deste capítulo.

4.2 - Fatores de Potência

O fator de potência, desde quando foi instituído, tem sido utilizado por empresas concessionárias do setor elétrico como um instrumento que propicia meios para estimular o consumidor a praticar um uso mais racional e conveniente de instalações elétricas. Na verdade, sua conceituação, que data do final do século retrasado, foi desenvolvida buscando uma forma de diferenciar o custo da energia demandada por consumidores que eram intrinsecamente distintos. Já nessa época, observou-se que o retorno do capital empregado em investimentos realizados no setor dependia, dentre outros fatores, também da intensidade do defasamento que o consumidor causava entre os sinais de tensão e corrente.

Deste modo, este fator tem sido historicamente abordado como sendo a eficiência em se realizar um trabalho, com uma potência ativa “P”, exigindo uma

ocupação do sistema elétrico. Esta ocupação é geralmente expressa em volts-ampères e representada como potência aparente “S”.

4.2.1 - Fator de potência de deslocamento

Desde há muito tempo, devido à pequena representatividade do montante da energia consumida por cargas não lineares bem como em virtude da costumeira despreocupação no tocante à presença de cargas desequilibradas, o fator de potência tem sido calculado através da expressão (4.1).

$$FP_Q = \frac{P}{S} = \cos(\phi - \varphi) \quad (4.1)$$

onde:

FP_Q é o fator de potência de deslocamento;

ϕ é o ângulo da tensão;

φ o ângulo da corrente.

Nos dias atuais, ainda que a presença de cargas que provocam a distorção da corrente seja muito mais relevante e que os recursos disponíveis para superdimensionar o sistema elétrico de modo a torná-lo menos vulnerável estejam cada vez mais reduzidos, este simplismo no cálculo do fator de potência ainda prevalece. Talvez explique esta situação o desconforto trazido pela implementação de novos conceitos e o bem-estar próprio da manutenção do *status quo*.

Particularmente, para o caso de um sistema trifásico, uma vez que os ângulos entre tensão e corrente em cada fase podem ser diferentes, definiu-se o *fator de potência fasorial* mostrado na expressão (4.2), utilizada em protocolos de medição e de tarifação clássicos:

$$FP_Q = \frac{P_A + P_B + P_C}{\sqrt{(P_A + P_B + P_C)^2 + (Q_A + Q_B + Q_C)^2}} \quad (4.2)$$

4.2.2 - Fator de potência global

Embora ainda sendo largamente utilizado, o índice calculado conforme mostrado em (4.2) é inadequado para assinalar os efeitos da presença de sinais distorcidos e / ou as influências de desequilíbrios de tensões e correntes.

Neste sentido, procurando suprimir esta deficiência, propõe-se o uso de outro índice, sensível à presença de sinais distorcidos e às influências do desequilíbrio de tensões e correntes, sem perder, obviamente, a capacidade de sinalizar a demanda de potência reativa resultante do defasamento entre tensões e correntes. Desta forma, sugere-se utilizar o índice denominado, neste trabalho, *fator de potência global* (FP_G) que é capaz de contabilizar também os efeitos de distorção e de desequilíbrio. A expressão (4.3) mostra como deve ser calculado este índice.

$$FP_G = FP_Q \cdot FP_D \cdot FP_A \quad (4.3)$$

onde FP_D e FP_A são respectivamente o fator de potência de distorção e o fator de potência de desequilíbrio. Estes fatores de potência serão definidos a seguir.

Como a potência é, por definição, o trabalho realizado ou a energia transferida por unidade de tempo, pode-se aplicar diretamente a modelagem desenvolvida levando-se em conta as energias envolvidas. Assim, para a medição de cada fator de potência separadamente há a necessidade de se conhecer as energias não-ativas. As energias não-ativas W_D e W_A deverão ser contabilizadas da mesma forma como se faz atualmente com W_Q , porém utilizando-se os protocolos de medição de potência definidos e mostrados ao longo deste capítulo. Igualmente à atual política, o critério de horo-sazonalidade também poderá ser aplicado.

Para o cálculo do fator de deslocamento adota-se atualmente o equivalente à expressão (4.4):

$$FP_Q = \frac{\sqrt{W_s^2 - W_Q^2}}{W_s} \Rightarrow FP_Q = \sqrt{1 - \left(\frac{W_Q}{W_s}\right)^2} \quad (4.4)$$

A expressão (4.4) é uma outra maneira de representar o fator de potência de deslocamento a partir da própria energia (ou potência) em análise. Observa-se que na completa ausência da energia de deslocamento ($W_Q = 0$) o fator de potência de deslocamento é unitário. Assim, de modo análogo, pode-se escrever:

$$FP_D = \frac{\sqrt{W_s^2 - W_D^2}}{W_s} \Rightarrow FP_D = \sqrt{1 - \left(\frac{W_D}{W_s}\right)^2} \quad (4.5)$$

$$FP_A = \frac{\sqrt{W_s^2 - W_A^2}}{W_s} \Rightarrow FP_A = \sqrt{1 - \left(\frac{W_A}{W_s}\right)^2} \quad (4.6)$$

No entanto, uma vez que se propõe que a energia aparente (W_s) deixe de ser função apenas da energia reativa de deslocamento (W_Q), além é claro da energia que realmente realiza trabalho (W_P), é conveniente que esta última passe a ser tomada como referência no cálculo dos fatores de potência. Desta forma resulta:

$$FP_Q = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_Q}{W_P}\right)^2}} \quad (4.7)$$

$$FP_D = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_D}{W_P}\right)^2}} \quad (4.8)$$

$$FP_A = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{W_A}{W_P}\right)^2}} \quad (4.9)$$

As políticas tarifárias atuais, geralmente, estabelecem um *gatilho* denominado *fator de referência* (FR) através do qual o cliente é abonado com uma “folga” de ocupação do sistema. No caso do Brasil, para a Potência de Deslocamento, este fator foi definido na portaria 1569/93 do DNAEE [De93] e referendado pela resolução da Agência Nacional de Energia Elétrica N^o 456, de 29 de novembro de 2000, como sendo 0,92. Para o cálculo do valor da multa a ser fixada quando da ultrapassagem desta referência, adota-se a expressão (4.10):

$$MULTA_Q = K_Q \cdot \left(\frac{FR_Q}{FP_Q} - 1 \right) \cdot W_P \quad (4.10)$$

Em conseqüência, seria razoável e equânime adotar o mesmo princípio para as outras potências não-ativas:

$$MULTA_D = K_D \cdot \left(\frac{FR_D}{FP_D} - 1 \right) \cdot W_P \quad (4.11)$$

$$MULTA_A = K_A \cdot \left(\frac{FR_A}{FP_A} - 1 \right) \cdot W_P \quad (4.12)$$

onde FR_Q , FR_D e FR_A são respectivamente os fatores de referência para o deslocamento, a distorção e o desequilíbrio, K_Q , K_D e K_A as ponderações para o cálculo do valor devido a cada multa e W_P a energia ativa medida (para isto utiliza-se o protocolo para a potência P já definido anteriormente). Nota-se que a contabilização da multa começa somente após a violação de $FR_{Q,D,A}$ por $FP_{Q,D,A}$, ou seja, quando $FP_{Q,D,A} < FR_{Q,D,A}$.

4.3 - Fatores de referência

Em estudo recentemente desenvolvido, Ribeiro e Carpinelli [Rb01] discutem a natureza variante no tempo de harmônicos em sistemas de potência, questionam a conveniência do uso dos índices utilizados em normas - em especial a IEEE Standard 519 - e sugerem soluções para lidar com os aspectos probabilísticos deste fenômeno. Em revisões recentes, outras normas já incorporaram esta natureza variante em seus limites harmônicos. A IEC 1000-3-6 [Ic96], por exemplo, usa limites probabilísticos para harmônicos de corrente e de tensão. Deste modo, pode-se presumir que existe uma tendência em adotar-se índices numéricos estatísticos como valores de referência para limites harmônicos. Embora de natureza diferente, o fenômeno do desequilíbrio é também influenciado por variáveis que conferem aos harmônicos esta característica variante no tempo. A título de exemplo, podem ser citadas as contínuas alterações na configuração do sistema e as modificações nos níveis de utilização de cargas lineares e não lineares. Desta forma, é razoável pressupor que os índices limítrofes dos níveis aceitáveis de desequilíbrio venham a ser estabelecidos seguindo a mesma tendência.

Apesar da relevância do tema, não faz parte do escopo deste trabalho buscar metodologias para estabelecer índices referenciais. Assim, tendo por objetivo obter valores de fatores de referência para dar seguimento à proposição, será adotada a seguinte linha de raciocínio: da mesma forma como é aceito hoje um excedente não-ativo de deslocamento, balizado por um *fator de referência de deslocamento* (FR_Q), alterado em 1993 de 0,85 para 0,92, este trabalho adota como sendo igualmente defensável o uso de fatores de referência para a distorção e o desequilíbrio. É sabido que até 20% de distorção harmônica total de corrente (THD_i) é um valor geralmente bem tolerado por sistemas elétricos de distribuição [Ie92]. O índice THD_i é definido como sendo:

$$\text{THD}_i = \frac{I_h}{I_1} = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}}{I_1} \quad (4.13)$$

Para o THDi igual a 0,20, chega-se ao *fator de referência de distorção* (FR_D) de 0,98, pois:

$$\text{FR}_D = \frac{I_1}{I} = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots}} = \frac{I_1}{\sqrt{I_1^2 + I_h^2}} = 0,98 \quad (4.14)$$

No consenso de profissionais do setor de distribuição elétrica, em termos de desequilíbrio, tem-se tomado 20% como um valor aceitável para a relação entre a componente de seqüência negativa e de seqüência positiva da corrente ($\frac{I^-}{I^+}$). Sendo assim, o *fator de referência de desequilíbrio* (FR_A), definido como sendo a relação entre a componente de seqüência positiva e o valor eficaz da corrente ($\frac{I^+}{I}$), é idêntico ao FR_D , ou seja, 0,98.

O novo *fator de referência global* seria então igual a:

$$\text{FR}_G = 0,92 \cdot 0,98 \cdot 0,98 = 0,884$$

Os dois últimos fatores de referência (FR_D e FR_A) não são atualmente contemplados. Especificamente no Brasil, a resolução N^o 456 da Agência Nacional de Energia Elétrica, publicada em 29 de novembro de 2000, considera apenas o fator de referência de deslocamento (FR_Q). Caso seja feita uma opção por um fator de referência global, um cuidado especial deve ser dedicado à escolha deste índice. Supondo-se, por exemplo, que se adotasse o mesmo valor para o *fator de referência geral* (0,92), a margem de bonificação do consumidor ficaria reduzida. Se forem guardadas as mesmas proporções, ter-se-ia:

$$FR_G = FR_Q \cdot FR_D \cdot FR_A = 0,92$$

$$FR_G = FR_Q \cdot \left(\frac{0,98}{0,92} \cdot FR_Q \right) \cdot \left(\frac{0,98}{0,92} \cdot FR_Q \right) = 0,92$$

$$FR_Q = 0,932; \quad FR_D = 0,993; \quad FR_A = 0,993$$

4.4 – Considerações relativas às multas

Como este trabalho propõe procedimentos inovadores no modo como a energia elétrica é transacionada entre os produtores/distribuidores e os consumidores, inclusive sugerindo que multas venham a ser imputadas, é sobejamente importante que os conceitos relacionados a tais procedimentos sejam muito bem ponderados de modo a evitar-se que injustiças venham a ser cometidas.

Com respeito à potência ativa, tanto o aspecto relativo à direção com que o fenômeno harmônico se manifesta (doravante, neste trabalho, tratado por *direcionalidade*), como aquele referente à natureza do conjugado resultante em máquinas elétricas devido à presença de componentes simétricas de seqüência negativa e zero, devem ser investigados minuciosamente.

Da mesma forma e pelas mesmas razões, uma análise crítica deve ser também desenvolvida com relação às potências não-ativas envolvidas no processo.

4.4.1 – Considerações concernentes à direcionalidade

Nesta vertente, existem dois casos a serem examinados. No primeiro, considera-se a situação mostrada na figura 4.1 em que o consumidor injeta potência ativa harmônica de volta à rede para suprir as perdas harmônicas da rede que o alimenta. O sinal de tensão da fonte é senoidal.

Neste caso o fluxo da potência ativa harmônica é do cliente em direção à rede. Portanto, a potência harmônica tem sentido contrário à potência útil solicitada pelo consumidor, participando então como subtração na potência total P_1 (estabelecida apenas pelas componentes fundamentais de tensão e corrente), pois o cliente devolve potência ativa à rede. Porém, devido à natureza da potência que está sendo devolvida para a rede, constituída tão somente por componentes harmônicas, é evidente que tal energia é indesejável sendo, até mesmo, considerada como um fator poluidor da rede elétrica.

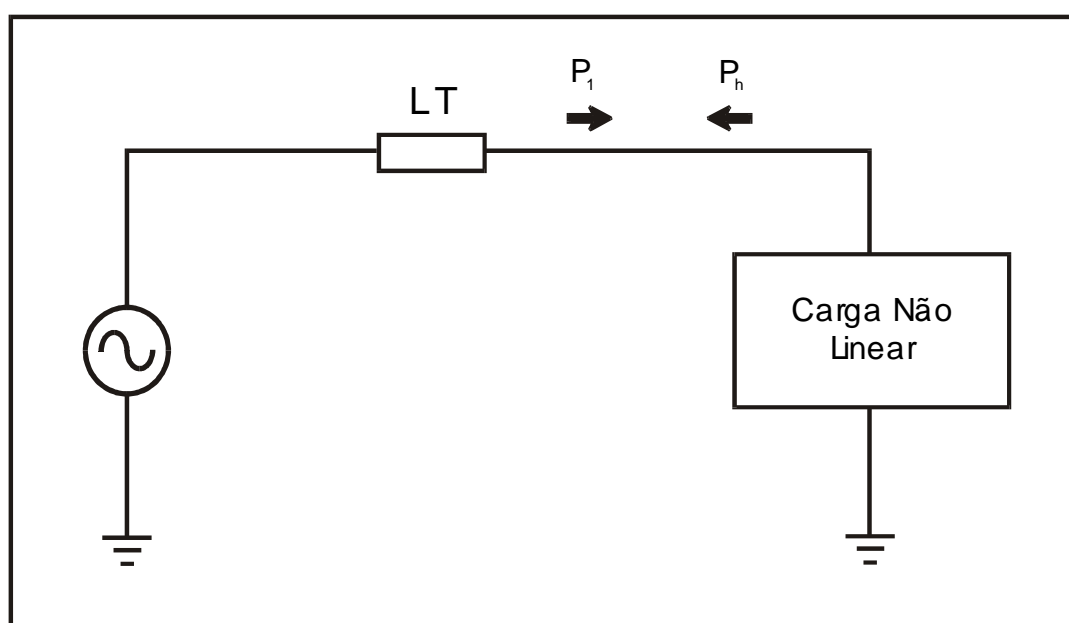


Figura 4.1 – A potência harmônica é proveniente do consumidor.

Assim, sob esta ótica, apresenta-se como um procedimento justo que seja contabilizada para fins de faturamento, apenas a potência fundamental P_1 que está sendo entregue à carga, desconsiderando-se quaisquer outras parcelas harmônicas.

No segundo caso, considera-se a situação em que a tensão de alimentação é deformada no Ponto de Acoplamento Comum (PAC), por exemplo, devido à circulação de correntes harmônicas pela impedância do alimentador, conforme está mostrado na figura 4.2.

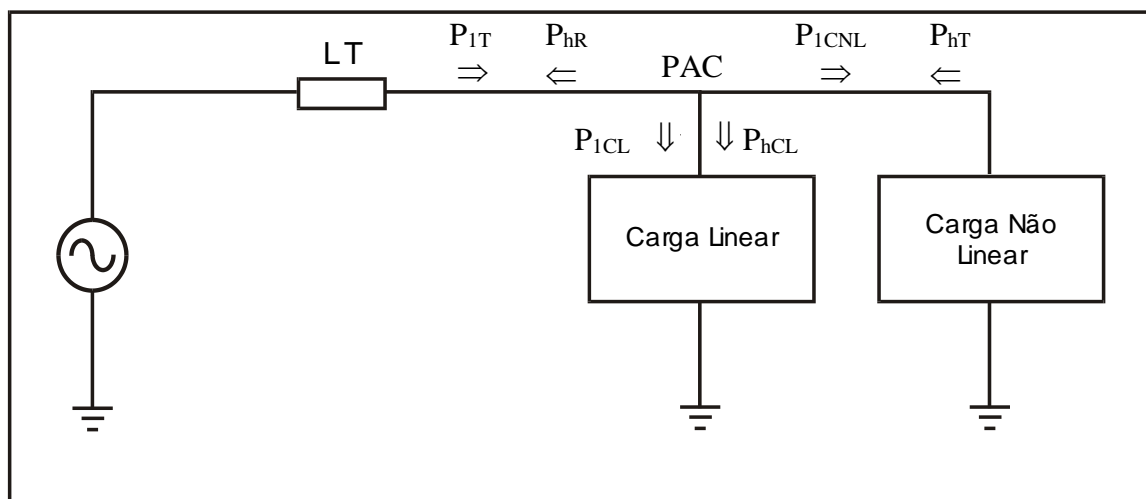


Figura 4.2 - A potência harmônica é entregue ao consumidor.

Com isto, o cliente que está conectado a esta barra (PAC) com a tensão deformada é obrigado, a contragosto, a consumir potência ativa harmônica. Numa comparação muito feliz, Simmonds [Si94], textualmente, argúi, alerta e comenta: *“Como você se sentiria se seu vizinho começasse a bombear a água do esgoto dele para dentro de sua caixa d’água? Piorando ainda mais a situação, qual seria seu comportamento se a companhia de abastecimento de água de sua região lhe informasse que você seria obrigado a pagar por esta água? Concessionárias de energia elétrica, em todo o mundo, em breve estarão fazendo justamente isto. Felizmente, elas fornecem eletricidade e não água”*.

Neste caso, para a carga linear, a potência harmônica tem o mesmo sentido que a potência útil solicitada pelo consumidor. Contudo, excetuando-se casos esporádicos nos quais a energia elétrica destina-se apenas a ser dissipada, em resistores, na forma de calor, esta potência harmônica é inconveniente causando, dentre outros, estorvos tais como o surgimento de conjugados trepidantes e sobreaquecimento em motores elétricos alimentados com corrente alternada. Desta forma, a contabilização apenas da parcela fundamental da potência ativa, também aparenta ser a forma mais equânime de medição da energia em pauta.

Pelos motivos expostos nas considerações anteriores, propõe-se a não utilização das parcelas de potência ativa harmônica na composição de P , ficando esta potência sendo composta somente pelas potências ativas vinculadas às componentes fundamentais de tensão e de corrente em cada uma das fases ($P_{A1} + P_{B1} + P_{C1}$), ponto de vista também defendido por Czarnecki [Cz96].

4.4.2 – Considerações relativas às potências ativas de seqüência negativa e zero

Quando a fonte está desequilibrada, correntes de seqüência negativa e, dependendo do caso, também de seqüência zero, circulam por todos os ramos supridos pelo alimentador. Principalmente em máquinas elétricas rotativas, a circulação destas correntes produz perdas que podem levar a condições de sobreaquecimento e reduzem a capacidade de realização de trabalho útil. Além destas características indesejáveis, é igualmente importuno o aumento do montante da energia absorvida [Wa33]. Por estas razões sugere-se que as parcelas de potência ativa de seqüência negativa e zero não sejam contabilizadas na composição de P , ficando esta potência sendo composta somente pelas potências ativas vinculadas às componentes de seqüência positiva, fundamentais de tensão e de corrente ou $P_1^+ = 3 \cdot V_1^+ \cdot I_1^+ \cdot \cos \phi_1^+$.

4.4.3 – Considerações relativas à potência reativa de deslocamento

A potência reativa de deslocamento calculada conforme (3.14) leva em conta todas as potências de deslocamento, incluindo aquelas oriundas da interação de componentes harmônicas de tensão e corrente quando de mesma ordem. Estas potências não-ativas de deslocamento originadas pelos sinais harmônicos, apesar de poderem estar presentes no sistema elétrico, representam uma parcela geralmente insignificante da potência reativa de deslocamento total e, exigiriam um projeto complexo e caro para que pudessem ser compensadas individualmente. Nesta vertente, seria levada em conta apenas a parcela

fundamental ($Q_1 = Q_1^+ + Q_1^- + Q_1^0$) da potência reativa de deslocamento. Ainda, as parcelas relativas às componentes de seqüência negativa e zero ($Q_1^- + Q_1^0$) só se farão presentes se o sistema alimentador for desequilibrado em tensão. Desta forma, propõe-se que apenas a parcela Q_1^+ seja levada em consideração no cálculo da potência reativa de deslocamento total.

4.4.4 – Considerações relativas à potência não-ativa de desequilíbrio

Com relação à potência não-ativa de desequilíbrio, cabe salientar que o seu valor, calculado a partir da expressão (3.25), pode ser afetado por condições da própria rede que alimenta a carga desequilibrada. Para mostrar esta circunstância, tome-se uma carga monofásica, puramente resistiva, alimentada por um sistema de tensões trifásico, conforme mostrado na figura 4.3. Cabe ressaltar que esta condição (carga monofásica alimentada por um sistema trifásico) corresponde à condição mais severa de desequilíbrio.

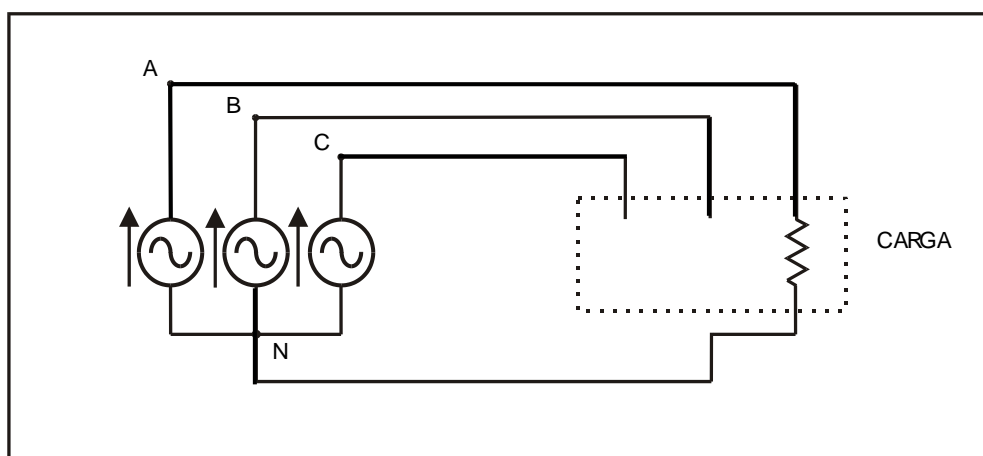


Figura 4.3 – Carga monofásica alimentada por um sistema trifásico.

Para o caso representado na figura 4.3, se a fonte for perfeitamente equilibrada, conforme comentado em 2.2.3, o fator de potência de desequilíbrio é $\frac{\sqrt{3}}{3}$. No entanto, quando a fonte é também desequilibrada, o valor do fator de potência é dependente também do grau de desequilíbrio desta fonte. Mais ainda,

é dependente também do valor da tensão da fase que foi eleita para alimentar a carga.

Considerando ainda o caso da figura 4.3, a título de exemplo, estão mostradas na tabela 4.1 as condições possíveis, em número de vinte e sete, de se efetuar combinações entre três tensões. No caso em pauta, foram tomadas as tensões correspondentes a 348, 372 e 396 V. Destes três valores, os que correspondem aos máximo e mínimo de tensão são limítrofes da região onde estão os chamados *limites adequados de variação de tensão* para a tensão nominal de 380 V, conforme está indicado no Quadro II do anexo à portaria nº 4, de 10 de Janeiro de 1989, do DNAEE. Atualmente estes limites são estabelecidos pela Resolução ANEEL nº 505, de 26 de novembro de 2001. Também estão mostrados, para cada caso, o fator de potência de desequilíbrio (FPA), o fator de desequilíbrio de tensão (FDT) e o fator de desequilíbrio de corrente (FDC).

Tabela 4.1 – Combinações para três valores de tensão.

Caso N ^o	FPA	V _A [V]	V _B [V]	V _C [V]	FDT [%]	FDC [%]
1	0,5278	348	396	396	4,2105	100
2	0,5394	348	372	396	3,7248	100
3	0,5394	348	396	372	3,7248	100
4	0,5509	348	348	396	4,3956	100
5	0,5509	348	396	348	4,3956	100
6	0,5517	348	372	372	2,1978	100
7	0,5533	372	396	396	2,0619	100
8	0,5641	348	348	372	2,2472	100
9	0,5641	348	372	348	2,2472	100
10	0,5649	372	372	396	2,1053	100
11	0,5649	372	396	372	2,1053	100
12	0,5766	372	348	396	3,7248	100
13	0,5766	372	396	348	3,7248	100
14	0,5774	348	348	348	0,0000	100
15	0,5774	372	372	372	0,0000	100
16	0,5774	396	396	396	0,0000	100
17	0,5890	396	372	396	2,0619	100
18	0,5890	396	396	372	2,0619	100
19	0,5898	372	348	372	2,1978	100
20	0,5898	372	372	348	2,1978	100
21	0,6006	396	348	396	4,2105	100
22	0,6006	396	396	348	4,2105	100
23	0,6014	396	372	372	2,1053	100
24	0,6030	372	348	348	2,2472	100
25	0,6137	396	348	372	3,7248	100
26	0,6137	396	372	348	3,7248	100
27	0,6269	396	348	348	4,3956	100

Na tabela 4.1 existem aspectos que merecem ser destacados, a saber:

- as combinações contidas nos casos de 1 a 13 resultaram em FPAs menores que $\sqrt{3}/3$;
- nos casos 14 a 16, as tensões eram equilibradas e, por esta razão, os FPAs foram iguais a $\sqrt{3}/3$;
- as combinações contidas nos casos de 17 a 27 resultaram em FPAs maiores que $\sqrt{3}/3$;
- os casos 12 e 25 apresentaram o mesmo FDT. Na realidade, o conjunto de tensões é exatamente o mesmo (348, 372 e 396 V), porém, combinado de formas diferentes. Resultaram, no entanto, em FPAs díspares.

A figura 4.4 mostra, graficamente, o resultado da simulação de 2744 (14^3) possibilidades onde as tensões foram variadas desde 348 até 396 V, com acréscimos de 3,429 V. Os valores encontrados de FPA foram ordenados em ordem crescente e as combinações que resultaram em valores de FPAs iguais foram retirados para que não surgissem “plataformas” na curva, restando então apenas 200 casos.

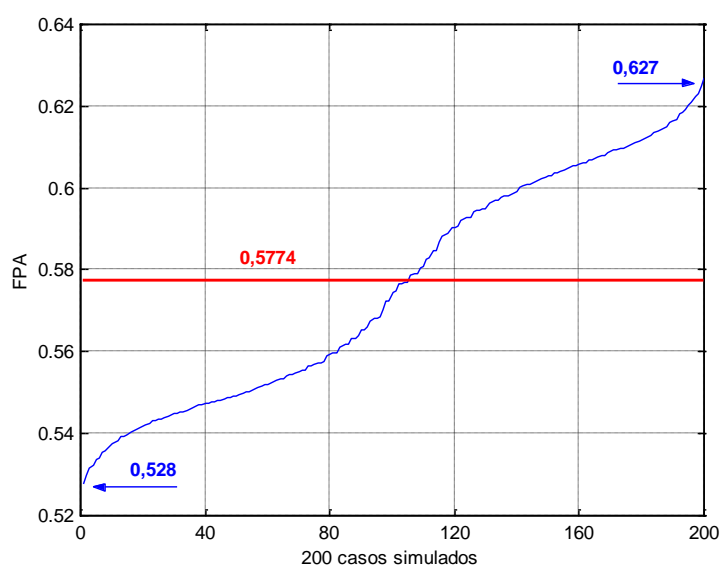


Figura 4.4 – Variação do FPA em função das combinações das tensões de fase.

Como este trabalho propõe que o FPA seja um fator que deva ser levado em conta quando do faturamento da energia comercializada, não parece justo que o mesmo seja dependente das condições de desequilíbrio da tensão do sistema alimentador. Pelo contrário, o fornecedor de energia elétrica deve ser estimulado a manter as tensões o mais próximo possível de uma condição de equilíbrio. Deste modo, não afigura-se como equânime que o FPA possa assumir valores menores que $\frac{\sqrt{3}}{3}$. Este deve ser o menor valor que o FPA poderia atingir e, somente seria alcançado em circunstâncias em que o sistema estivesse perfeitamente equilibrado em tensão.

Buscando satisfazer esta premissa, sugere-se que, para cada condição das tensões do sistema elétrico, seis FPAs sejam calculados a partir das seis possíveis combinações que podem ser obtidas através da permutação cíclica das três fases. Por exemplo, uma situação em que as tensões assumissem os valores de 348, 372 e 396 V daria origem aos seis casos indicados na tabela 4.2. Observe-se que, neste caso, como o conjunto de tensões é sempre o mesmo, o FDT também é sempre o mesmo para qualquer um dos seis casos indicados.

Tabela 4.2 - Combinações obtidas da permutação cíclica.

Caso N^o	FPA	V_A[V]	V_B [V]	V_C [V]	FDT [%]	FDC [%]
1	0,5394	348	372	396	3,7248	100
2	0,5394	348	396	372	3,7248	100
3	0,5766	372	348	396	3,7248	100
4	0,5766	372	396	348	3,7248	100
5	0,6137	396	348	372	3,7248	100
6	0,6137	396	372	348	3,7248	100

Para o conjunto de tensões que deu origem aos seis casos indicados na tabela 4.2, para efeito de contabilização, seria considerado o FPA dos casos número 5 ou 6 (FPA = 0,6137), que correspondem ao maior deles. Desta forma estaria resguardado o consumidor com carga desequilibrada quando da existência de um desequilíbrio de tensão.

A aplicação desta mesma estratégia para um conjunto com maior número de tensões resulta no gráfico mostrado na figura 4.5.

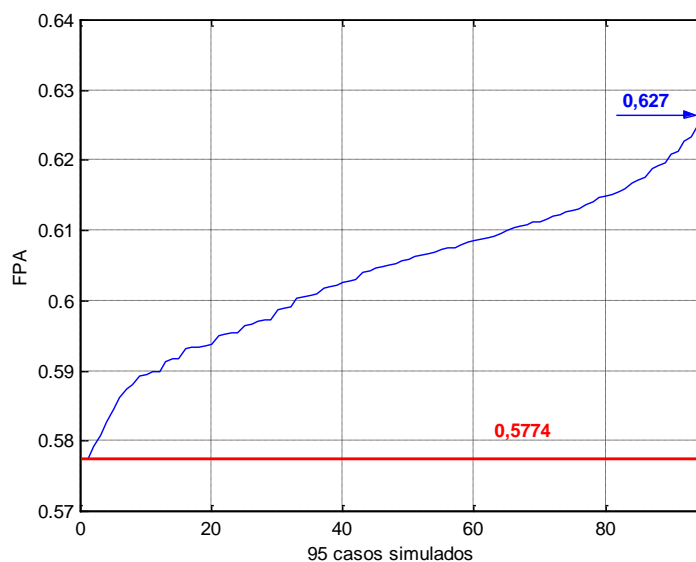


Figura 4.5 - Variação do FPA em função das combinações obtidas através da permutação cíclica das tensões de fase.

Observa-se que o aspecto da curva mostrada na figura 4.5 é semelhante ao apresentado na figura 4.4. Os maiores valores de fator de potência de não-ativa de desequilíbrio mantiveram-se o mesmo (FPA = 0,627), porém, como era desejado, o valor mínimo fica limitado a $\frac{\sqrt{3}}{3}$.

Ainda com relação ao cálculo da potência não-ativa de desequilíbrio desenvolvido a partir da equação (3.25), observa-se que são também levadas em conta as potências de desequilíbrio advindas da interação de componentes harmônicas de correntes e tensões ($A_2 + A_3 + A_4 + \dots$). Estas parcelas de potência só estarão presentes se houver distorções nos sinais de tensão. Desta forma, sugere-se que apenas a parcela correspondente à fundamental de tensão e corrente (A_1) seja levada em conta no cálculo da potência não-ativa de assimetria total.

4.5 – Síntese das considerações

Levando-se em conta as considerações tecidas de 4.4.1 a 4.4.4, uma nova equação para a potência aparente pode ser escrita, ou seja:

$$S = \sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2 + D^2 + (A_1)^2 + G^2} \quad (4.15)$$

onde:

P_1^+ - potência ativa total considerada para efeito de contabilização, dada por:

$$P_1^+ = 3 \cdot V_1^+ \cdot I_1^+ \cdot \cos \varphi_1^+ \quad (4.16)$$

Q_1^+ - potência reativa de deslocamento total considerada para efeito de contabilização, dada por:

$$Q_1^+ = 3 \cdot V_1^+ \cdot I_1^+ \cdot \sin \varphi_1^+ \quad (4.17)$$

A_1 - potência não-ativa de assimetria total considerada para efeito de contabilização, dada pela equação (3.24);

D - potência não-ativa de distorção, dada pela equação (3.20);

G - fator que compreende todas as potências não-ativas não levadas em consideração nos demais termos da equação (4.15), dado por:

$$G = \sqrt{\left(P_1^- + P_1^0 + \sum_{n=2}^{\infty} P_n^{+,-,0}\right)^2 + \left(Q_1^- + Q_1^0 + \sum_{n=2}^{\infty} Q_n^{+,-,0}\right)^2 + \left(\sum_{n=2}^{\infty} A_n\right)^2} \quad (4.18)$$

P_1^- - potência ativa da componente de seqüência negativa da fundamental;

P_1^0 - potência ativa da componente de seqüência zero da fundamental;

$\sum_{n=2}^{\infty} P_n^{+,-,0}$ - potência ativa das componentes harmônicas de seqüência zero,

negativa e positiva;

Q_1^- - potência reativa de deslocamento da componente de seqüência negativa da fundamental;

Q_1^0 - potência reativa de deslocamento da componente de seqüência zero da fundamental;

$\sum_{n=2}^{\infty} Q_n^{+,-,0}$ - potência reativa de deslocamento das componentes harmônicas

de seqüência zero, negativa e positiva;

O fator “G” da expressão (4.15) pode também encerrar outros fatores que também restringem a capacidade do sistema elétrico, tais como: ressonância harmônica, ferro-ressonância, sobre ocupação do condutor neutro, etc.

No desenvolvimento deste trabalho, pelos diversos motivos já expostos, a parcela G será tomada como nula. Porém, não se deve descartar a possibilidade de que venha a ser levada em conta em trabalhos futuros.

Para efeito da contabilização da energia, a potência aparente será expressa pela equação (4.19).

$$S = \sqrt{(P_1^+)^2 + (Q_1^+)^2 + D^2 + (A_1)^2} \quad (4.19)$$

Ela se assemelha à equação (3.1), porém, suas parcelas componentes foram devidamente “lapidadas” de modo a dar lugar a um faturamento mais justo. Mais ainda, a equação (4.19) possibilita que o consumidor tenha uma visão

ampla e transparente sobre cada um dos termos que compõem sua fatura, permitindo, desta forma, que sejam efetuados ajustes de modo a minimizar seus dispêndios neste insumo.

CAPÍTULO 5

IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA DOS PROTOCOLOS

5.1 - Introdução

Este capítulo tem por objetivo principal mostrar a viabilidade técnica de implementar-se os protocolos de medição desenvolvidos no capítulo 4 deste trabalho. Para tanto, foi utilizado um sistema de aquisição de dados (SAD) gerido por um PC (*Personal Computer*).

São diversas as vantagens de se usar um sistema como esse. Dentre outras, podem ser citadas:

- o erro metodológico é função apenas do equacionamento (protocolo de medição), podendo ser alterado, modificando-se tão somente o *software* utilizado;
- o *hardware* é sempre o mesmo para qualquer que seja o protocolo que se deseje implementar. Esse aspecto é particularmente interessante uma vez que evita a obsolescência prematura do medidor que poderia ser causada pela mudança do protocolo de medição, em virtude de alterações da política tarifária.

Além dessas vantagens, o arranjo ora proposto emula com perfeição os medidores eletrônicos desenvolvidos para utilizar a mais avançada tecnologia de aquisição digital de sinais e de processamento numérico em tempo real. Seguindo uma tendência moderna de neologismar quando se trata de dar nomes a equipamentos com tecnologia de ponta, os fabricantes destes instrumentos os têm chamados de "Medidores multigrandeza e multitarifa". Por empregarem um DSP - *Digital Signal Processor* dedicado para realizar a aquisição de sinais e um microprocessador dedicado para o processamento das grandezas medidas, estes

medidores são aptos a atender às mais diversas opções de medição de energia, sendo, portanto, cada vez mais utilizados na medição para faturamento e monitoramento de grandezas elétricas em instalações industriais.

Estes medidores, com preço cada vez mais competitivo, têm conseguido apresentar-se como uma opção a nichos do mercado consumidor especializado onde, até bem pouco tempo atrás só era disponível o uso de medidores de indução.

Além da retenção de dados na memória de massa (energia ativa e energias reativas indutiva e capacitiva), estes medidores digitais podem armazenar sinais elétricos, possibilitando assim que, além dos registros das grandezas para fins de faturamento, sejam também monitorados os sinais de tensão e corrente para análise da qualidade de fornecimento, verificação do balanceamento das cargas, etc.

A maneira como o conjunto SAD-PC foi montado bem como a forma como as equações foram implementadas no programa estão detalhadamente descritas a seguir.

5.2 - Descrição geral do sistema

Um sistema de aquisição de dados tem por finalidade amostrar, reter e tornar disponível uma massa de informações de sinais elétricos. Estes dados podem então ser armazenados em um computador na forma de vetores, permitindo, deste modo, que sejam realizados cálculos envolvendo a amostragem de sinais elétricos.

Com o objetivo de adequar os sinais de tensão e corrente, provendo-os de forma e valor apropriados ao SAD, foi utilizado um dispositivo de condicionamento de sinais. O condicionador foi projetado de modo a possuir três

entradas de tensão e três de corrente. As correntes de cada fase da alimentação foram amostradas através de transdutores de efeito Hall. Estes possuem um circuito eletrônico auxiliar de modo a transformar sinais de corrente em sinais de tensão proporcionais às correntes que lhe deram origem. As tensões das três fases foram reduzidas por um divisor resistivo e isoladas por meio de amplificadores operacionais de isolamento. Desta forma, entram na placa de aquisição de dados, localizada internamente no PC, seis sinais de tensão; três correspondentes às tensões de fase e outros três às correntes em cada fase.

A figura 5.1 mostra como os dispositivos foram agregados de modo a compor o sistema utilizado.

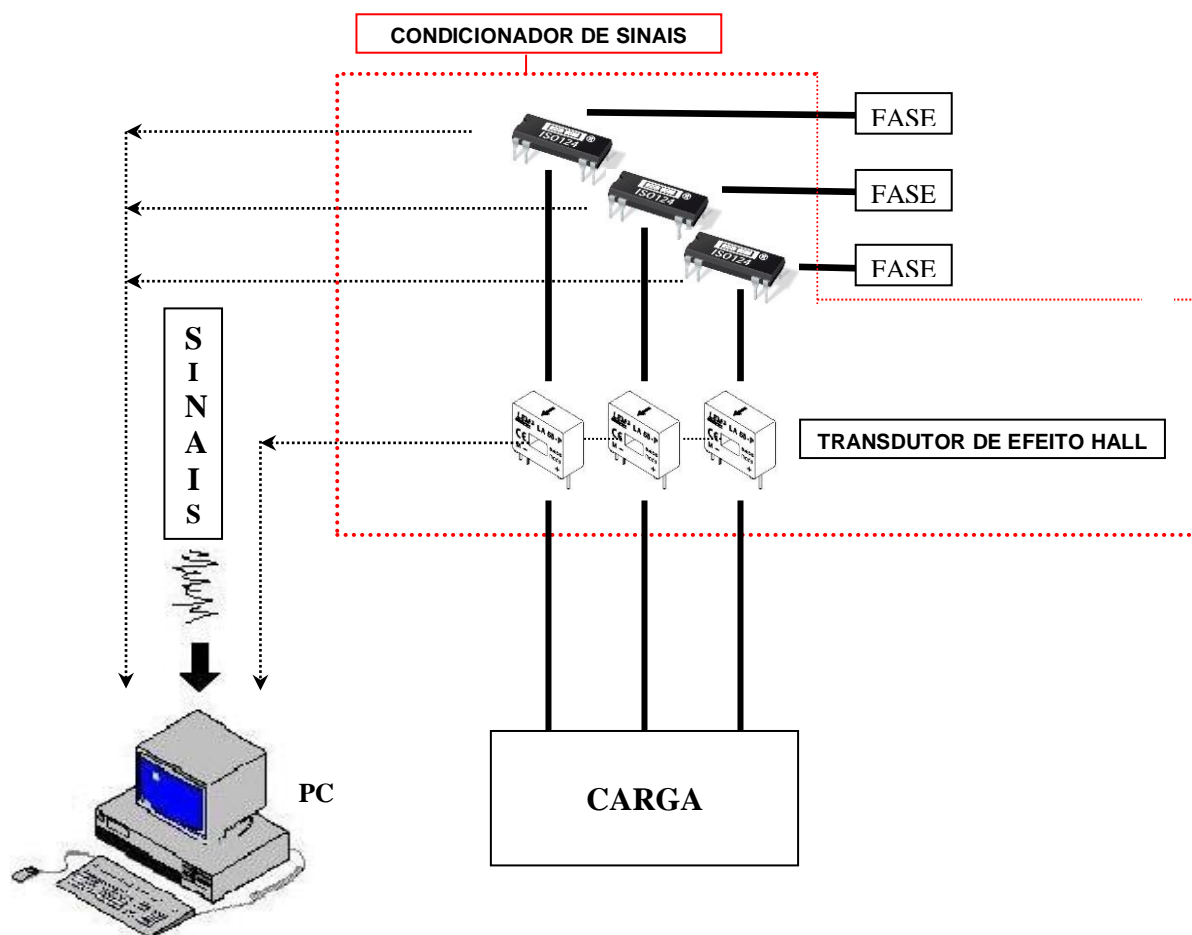


Figura 5.1 – Visão geral do conjunto.

5.3 - Descrição do *hardware* de aquisição

No caso específico do sistema montado para atingir os objetivos deste capítulo, foi utilizada a placa de aquisição de dados, modelo NI 6023 E, fabricada pela National Instruments. Esta placa de aquisição foi escolhida porque possui características que correspondem aos quesitos mínimos necessários à finalidade proposta. Tais características estão mostradas na tabela 5.1.

Tabela 5.1 – Principais* características da placa de aquisição NI 6023 E

CARACTERÍSTICAS	IDEAL	NI 6023 E
Resolução	12 bits	12 bits
Número de canais de entrada	6 single-ended	16 single-ended ou 8 diferenciais
Taxa de amostragem	> 165 kS/s	200 kS/s
Polaridade das entradas analógicas	Bipolar	Bipolar
Faixa dinâmica	± 10 V	± 10 V
Acoplamento	CC	CC
Impedância de entrada	Elevada	100G Ω em paralelo com 100 pF
Corrente de polarização das entradas	Nula	± 200 pA
CMRR	Elevada	85 dB
Tensão de <i>offset</i> das entradas	Nula	6,385 mV para ± 10 V

*Outras informações a respeito da placa NI 6023E encontram-se no Anexo II.

Esta placa de aquisição opera num modo chamado *interval-scanning mode*. Neste modo de aquisição, os canais de entrada analógica são aquisitados simultaneamente (todos os sinais são aquisitados durante um espaço de tempo fixo, no caso 50 ms, que representa três ciclos na frequência de 60 Hz), para evitar-se erros de fase.

O microcomputador escolhido para ser empregado neste sistema foi um AT Pentium S, de 150 MHz. A escolha embasou-se especificamente nos requisitos mínimos exigidos pelo *software* (LabView 4.1 - ambiente de programação de interface gráfica, da National Instruments,) utilizado para a implementação dos protocolos. Tanto a velocidade de processamento assim como a quantidade de memória RAM disponível, são consideradas satisfatórias às necessidades do *software*.

Os circuitos condicionadores de sinais convertem os sinais de corrente em seus equivalentes de tensão e ajusta-os a amplitudes adequadas. Além disso, foram projetados e construídos com o propósito de proteger a placa de aquisição. São compostos basicamente por três transdutores de efeito Hall, um para cada uma das correntes de fase e por três circuitos integrados (CI) isoladores, dotados de barreira capacitiva, para as tensões para as três tensões de fase.

O transdutor de efeito Hall, mostrado na figura 5.2, é um componente fabricado pela LEM, modelo LA55P/SP1, de *loop* fechado. É especialmente adequado para medição de sinais de corrente alternada, contínua e pulsada. Possui como características mais relevantes, alta linearidade, baixo desvio de temperatura (*drift* térmico), resposta para alta frequência (faixa dinâmica entre zero e 200 kHz), grande imunidade a interferências e alta precisão. Outras informações a respeito deste transdutor estão disponíveis nos anexo III.

Este sensor Hall reproduz o sinal da corrente que flui através do condutor que atravessa sua janela, por intermédio de uma forma de onda de tensão (V_{REP}), que é estabelecida sobre o resistor R_m . O sinal de tensão V_{REP} é proporcional ao da corrente enlaçada pelo sensor numa escala de 1:2000. Como o valor do resistor R_m é, em virtude de características de projeto do componente, restrito a um máximo de algumas centenas de ohms, foi necessário acoplar um amplificador operacional para que as tensões produzidas pelos sensores fossem elevadas para valores mais próximos aos valores da faixa dinâmica da placa de

aquisição. O componente escolhido para efetuar esse ajuste no valor das tensões foi o amplificador operacional, modelo OPA277, da linha de alta precisão dos fabricados pela Burr-Brown.

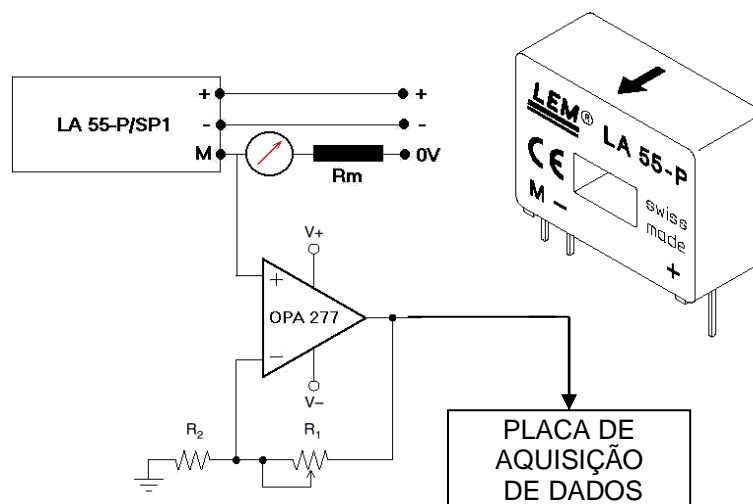


Figura 5.2 - Diagrama do circuito transdutor.

As saídas dos amplificadores operacionais foram conectadas diretamente aos respectivos canais de entrada da placa de aquisição de dados.

Para efetuar o desacoplamento galvânico dos sinais de tensão foi usado o CI ISO124, fabricado pela Burr-Brown. Este amplificador isolador de precisão opera com barreira capacitiva e utiliza uma técnica de isolamento baseada na modulação e demodulação de sinais em largura de pulso. Um sinal de tensão aplicado na entrada do CI é transferido à sua saída, digitalmente, através de uma barreira capacitiva de 2 pF. Este processo não interfere na integridade do sinal, resultando então em uma baixa distorção e alta imunidade a ruídos. O sinal, do outro lado da barreira, é idêntico ao sinal de entrada, porém, desacoplado galvanicamente daquele que lhe deu origem. Este amplificador isolador possui ganho unitário. A figura 5.3 ilustra como foi feito o condicionamento das tensões. Outras informações a respeito deste componente encontram-se no anexo IV.

Pelo fato da placa de aquisição de dados possibilitar que seja feito o ajuste individual de ganho para cada um dos canais através de alterações no *software*, não foi necessário usar outro amplificador operacional na saída do amplificador isolador. Também, pela mesma razão, evitou-se o uso de potenciômetros no divisor resistivo que poderiam prejudicar a precisão do condicionador.

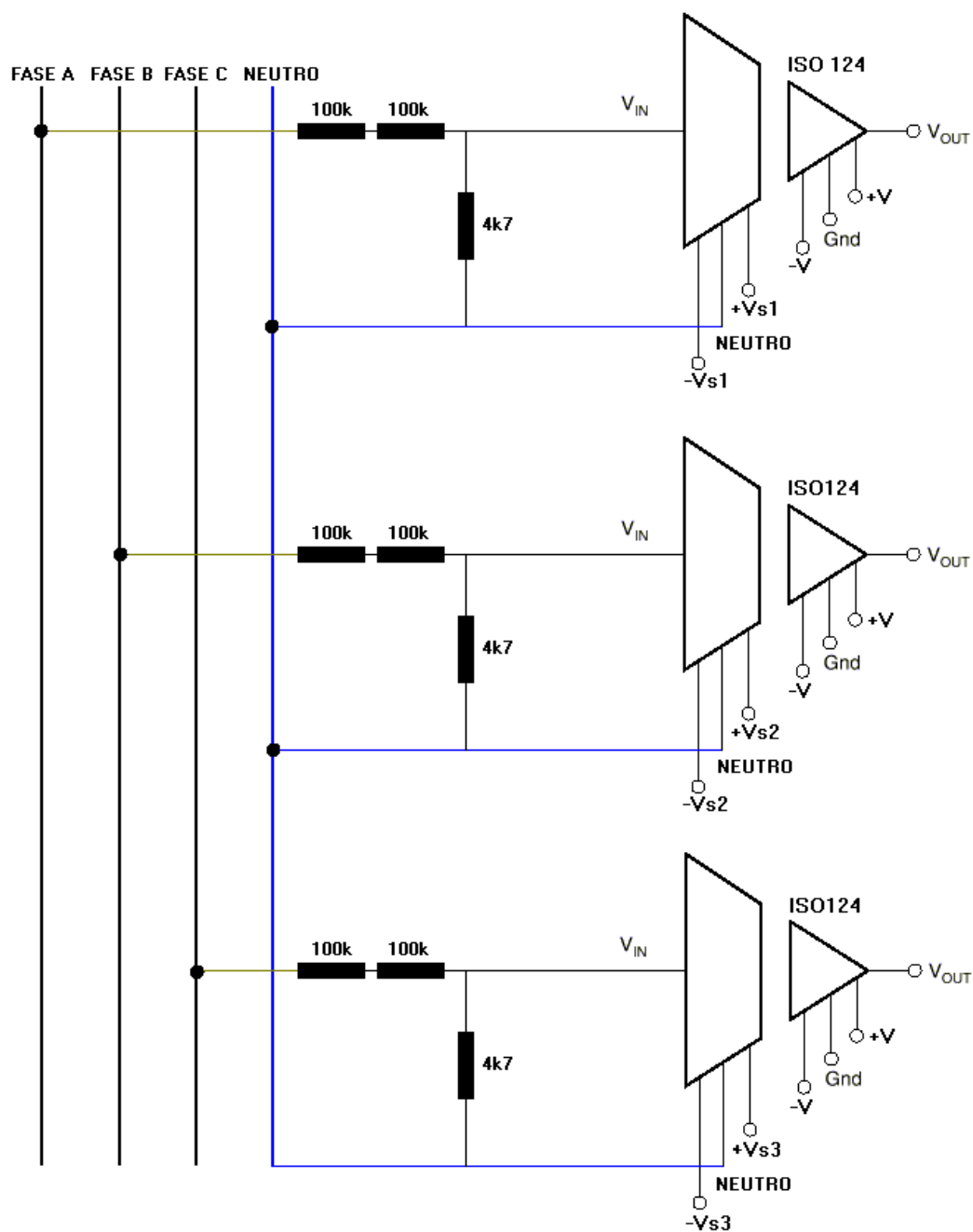


Figura 5.3 – Circuito de condicionamento das tensões.

Conforme está mostrado na figura 5.3, divisores de tensão resistivos foram usados para reduzir a tensão para valores compatíveis com o CI isolador.

Foram utilizadas três fontes de alimentação, cada uma isolada das demais, para suprir cada um dos circuitos de entrada dos três amplificadores isoladores. Os circuitos de saída foram alimentados por uma outra fonte, perfazendo, um total quatro fontes de alimentação para o circuito de condicionamento das tensões.

5.4 - Calibração do *hardware* do medidor

O *hardware* do medidor de protocolo aberto foi implementado em três conjuntos de placas de circuito impresso: um para os circuitos isoladores das tensões; um para suportar os transdutores Hall; e outro para as quatro fontes individuais de alimentação. Uma vez montado o condicionador, o próximo passo foi efetuar sua validação. Este procedimento deu-se segundo a seguinte ordem:

- verificar o nível de ruído das fontes de alimentação;
- ajustar o ganho individual de cada amplificador operacional OPA277 acoplado aos transdutores de efeito Hall;
- verificar o acoplamento na alimentação dos isoladores ISO124;
- gerar uma curva de calibração para o circuito de condicionamento das tensões, através de alterações no *software*.

Os instrumentos e *software* utilizados para a calibração foram os seguintes:

- gerador de formas de onda programável da California Instruments (EUA);
- *software* de controle do gerador de formas de onda;
- medidor padrão, fabricado pela Voltek, modelo PM 3000 (Inglaterra).

Para o ajuste do ganho dos operacionais dos transdutores Hall, fez-se passar simultaneamente uma mesma corrente senoidal pelos os transdutores e ajustou-se o ganho individual de cada operacional.

5.5 - Descrição do *software* utilizado no medidor de protocolo aberto

O ambiente de programação escolhido para a implementação do protocolo desenvolvido no Capítulo 4 deste trabalho foi o LabView, de interface gráfica, da National Instruments. Sua escolha foi determinada por definir a melhor plataforma atualmente disponível no mercado para aquisição de dados. Dentre outras características desejáveis destacam-se a agilidade de programação, os recursos matemáticos disponíveis, o rápido processamento de sinais, a interface gráfica, sua capacidade de depuração de resultados e, sobretudo, por integrar-se completa e perfeitamente com placas de aquisição de alta performance e confiabilidade.

Em termos gerais, sem que sejam considerados detalhes de programação, o aplicativo processa o seguinte algoritmo:

- adquirir tensões e corrente do circuito;
- finalizar aquisição;
- processar a transformada discreta de Fourier (DFT) em cada um dos seis sinais (três de tensão e três de corrente);
- calcular a potência ativa 'P' e a potência não-ativa de deslocamento Q;
- calcular a potência de desequilíbrio A;
- calcular a potência de distorção D;
- calcular a potência aparente S;
- mostrar resultados e encerrar o aplicativo.

Antes de ser dado prosseguimento aos testes com sinais reais, o aplicativo gerado no LabView foi alterado nas duas primeiras etapas do algoritmo

anteriormente mencionado. As rotinas de aquisição foram substituídas por rotinas responsáveis pela geração de sinais virtuais de corrente e tensão, simulados internamente no aplicativo. As rotinas de cálculo foram implementadas e o aplicativo de aquisição tornou-se, então, um simulador.

A figura 5.4 apresenta o ambiente típico de programação do LabView 4.1. O conteúdo da janela mostrada nesta figura corresponde à implementação da equação (3.27) desenvolvida para calcular o valor da potência não-ativa total de desequilíbrio.

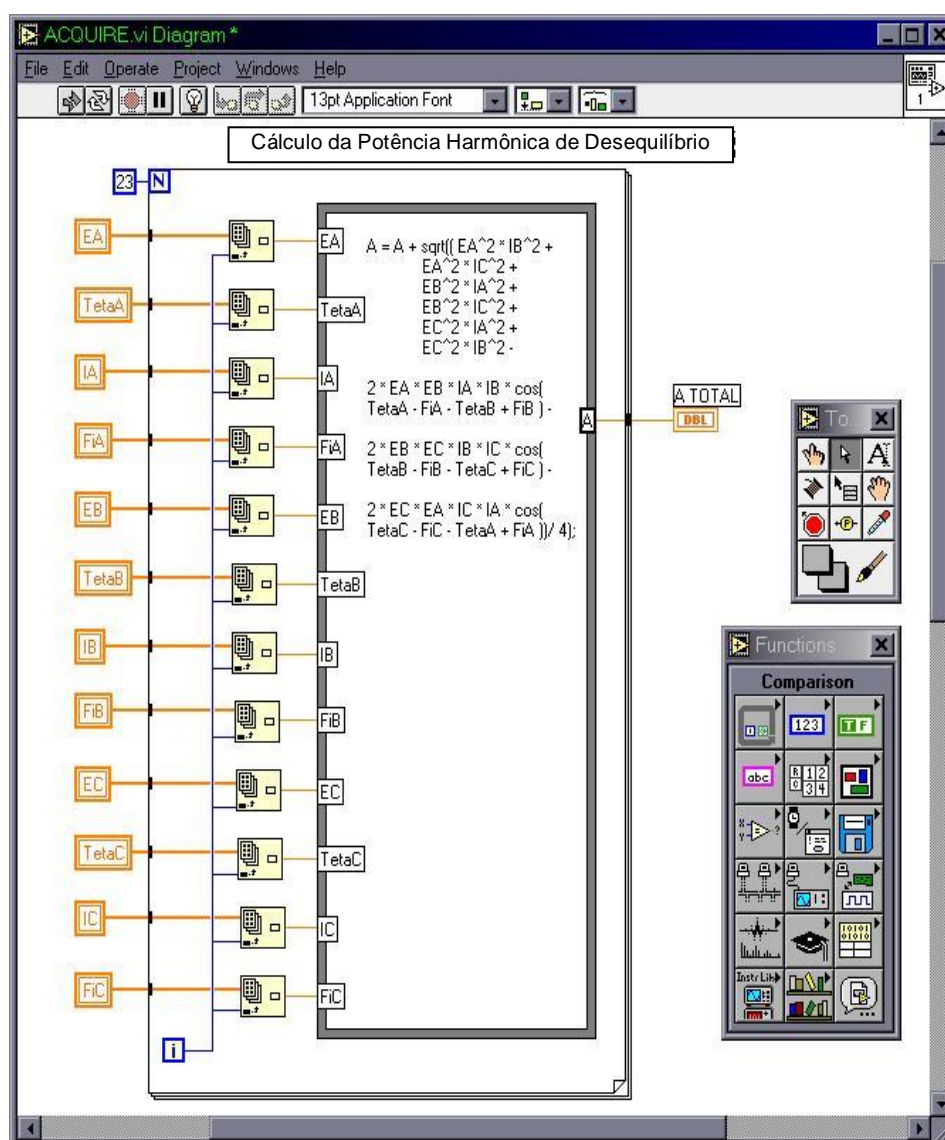


Figura 5.4 – Ambiente típico de programação do LabView 4.1.

5.6 - Implementação dos protocolos propostos

Uma vez concluído o desenvolvimento do *hardware* de aquisição do medidor, foi realizada uma série de testes de simulação, utilizando o próprio LabView. Estes testes foram realizados com o propósito de se avaliar os comportamentos do *software* e da metodologia empregada, frente a situações envolvendo desequilíbrios e/ou distorções nos sinais de tensão e corrente. Para tanto, optou-se em uma primeira etapa, pela utilização dos novos protocolos desenvolvidos e apresentados no capítulo 3. Deste modo, foram implementadas as seguintes equações:

- equação (3.1) – cálculo da potência aparente (S);
- equação (3.11) – cálculo da potência ativa (P);
- equação (3.14) - – cálculo da potência não-ativa de deslocamento (Q);
- equação (3.22) – cálculo da potência não-ativa de distorção (D);
- equação (3.27) – cálculo da potência não-ativa de desequilíbrio (A).

A seguir, estão apresentados na forma gráfica os códigos fonte que foram empregados para processar o algoritmo. As figuras 5.5 e 5.6 mostram respectivamente as rotinas de geração das formas de onda de corrente e de tensão.

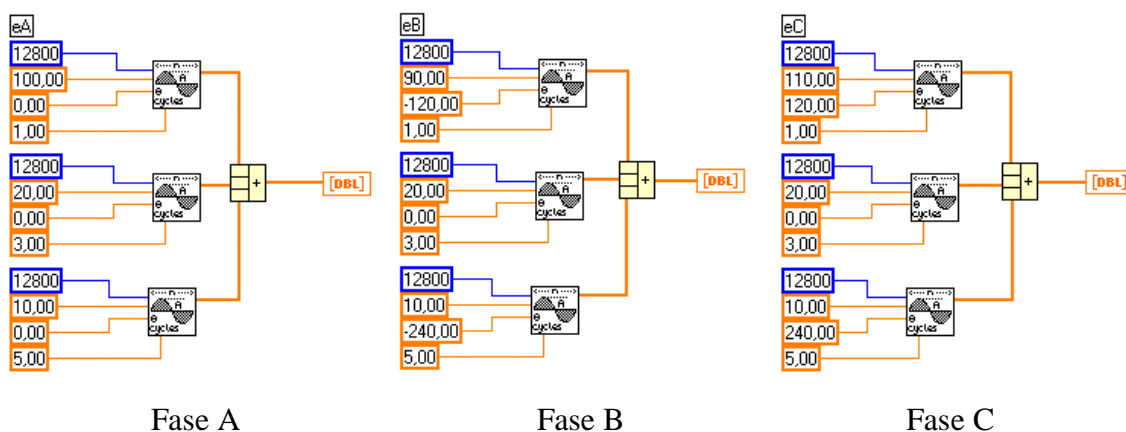


Figura 5.5 – Rotina de geração virtual dos sinais de tensão das fases A, B e C.

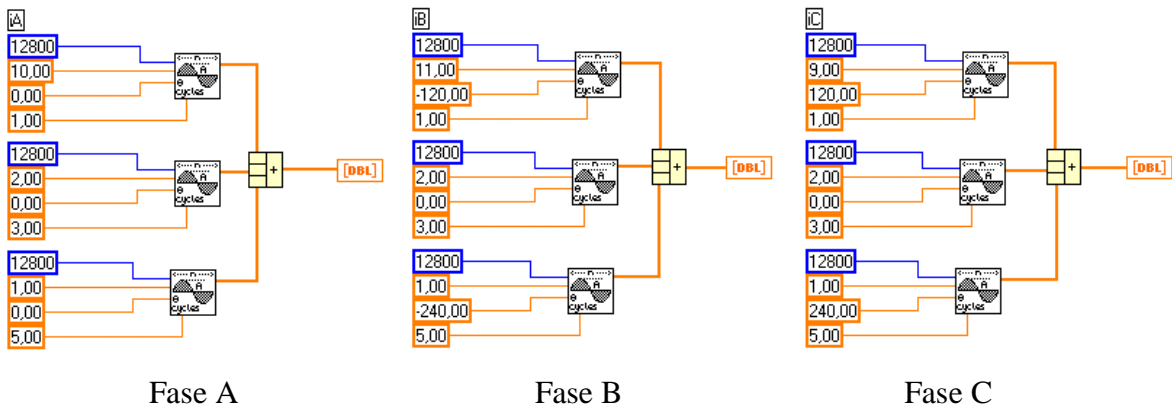


Figura 5.6 – Rotina de geração virtual dos sinais de corrente das fases A, B e C.

As figuras 5.7 e 5.8 mostram respectivamente o módulo responsável pelo processamento da DFT e a estrutura do modo como foi integrado às rotinas de geração das formas de onda de corrente e de tensão.

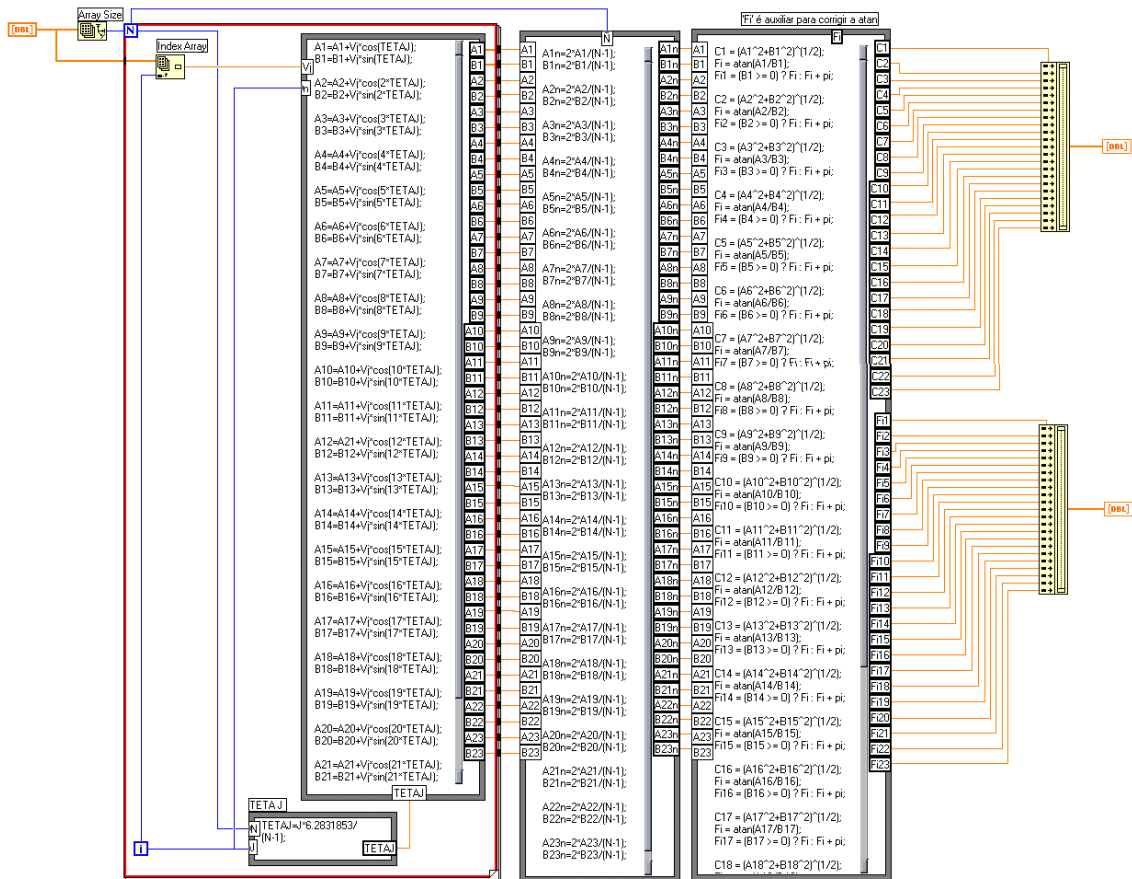


Figura 5.7 – Módulo de processamento da DFT.

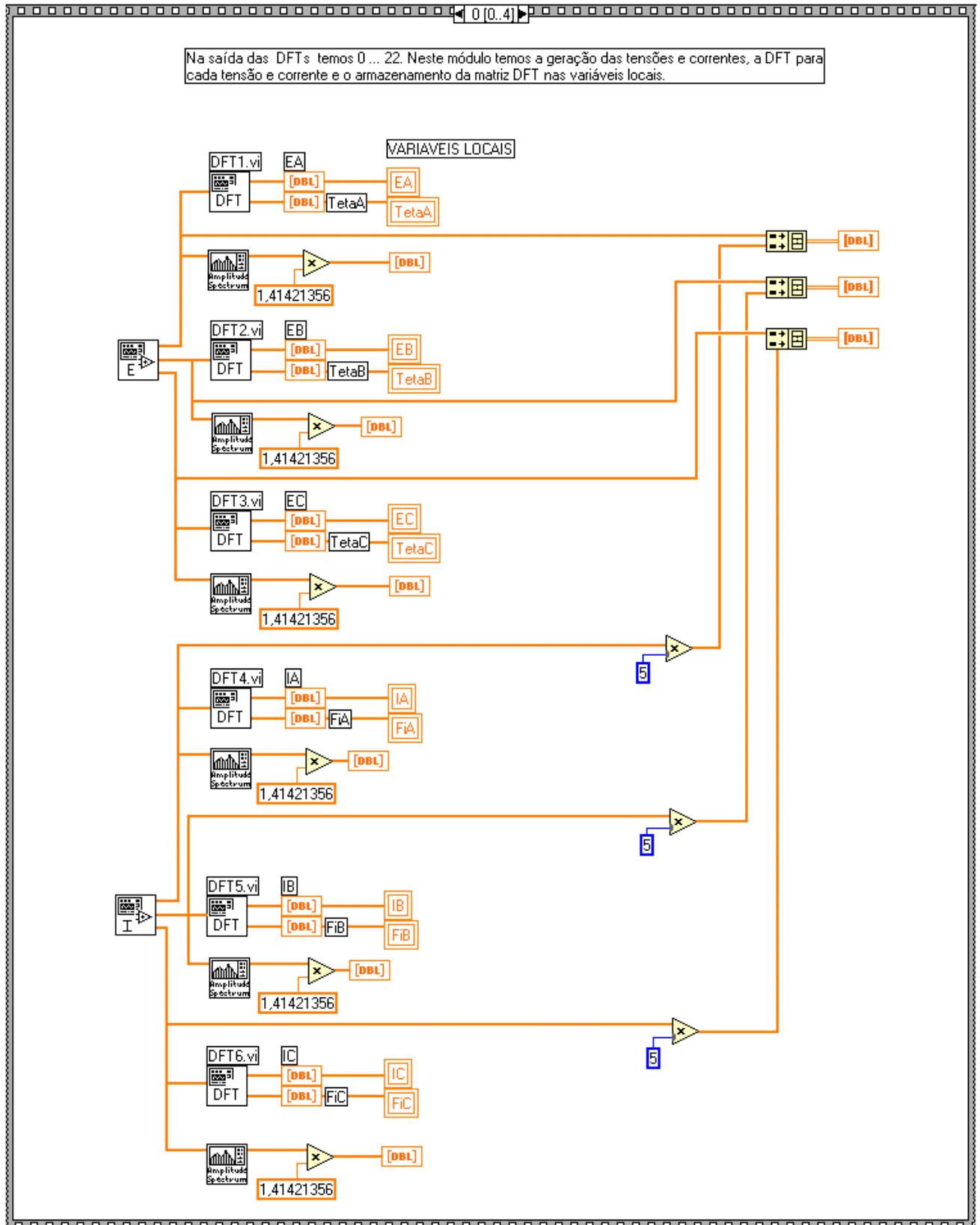


Figura 5.8 – Estrutura de integração do módulo de processamento da DFT às rotinas de geração de sinais virtuais.

A figura 5.9 mostra as rotinas para o cálculo da potência ativa (P) e da potência não-ativa de deslocamento (Q).

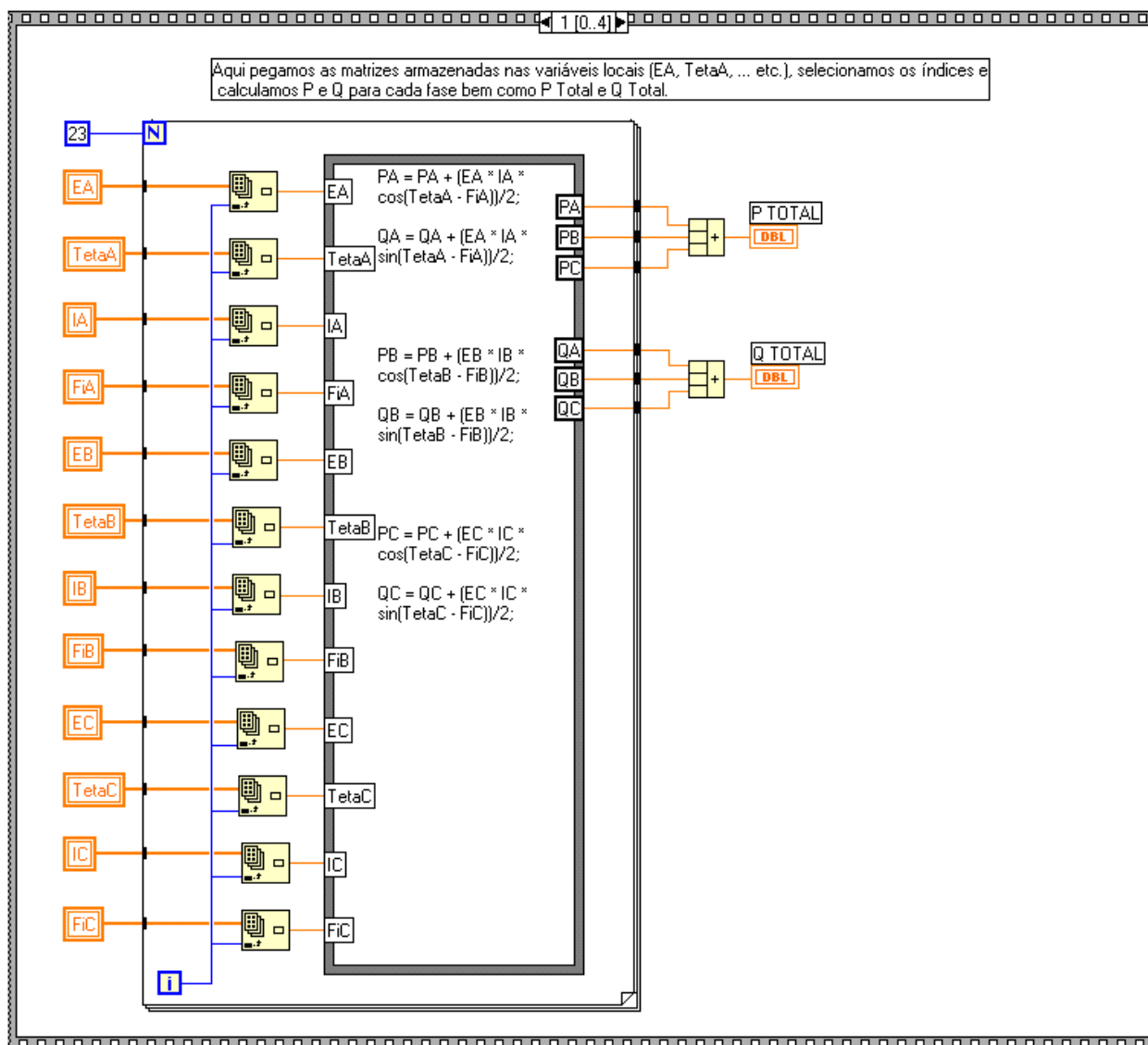


Figura 5.9 – Rotinas para o cálculo da potência ativa (P) e da potência não-ativa de deslocamento (Q).

A figura 5.10, mostrada a seguir, indica como foi implementada a rotina para o cálculo da potência não-ativa de desequilíbrio (A).

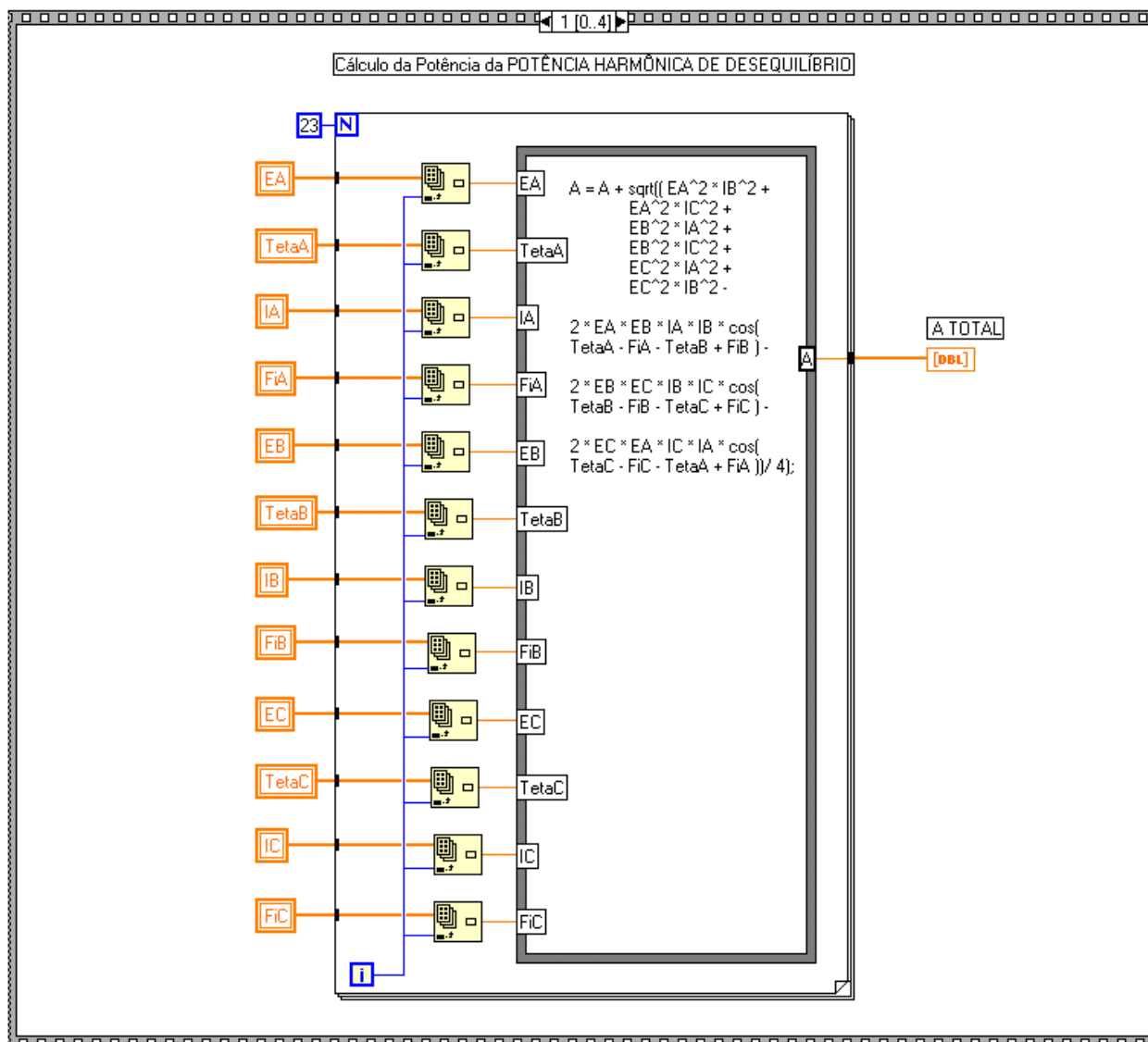


Figura 5.10 – Rotina para o cálculo da potência não-ativa de desequilíbrio (A).

As figuras 5.11, 5.12 e 5.13, mostradas a seguir, indicam respectivamente como foi implementada a rotina para o cálculo da potência não-ativa de distorção (D), para o cálculo da potência aparente (S) e a aparência da tela de resultados apresentada pelo medidor de protocolo aberto.

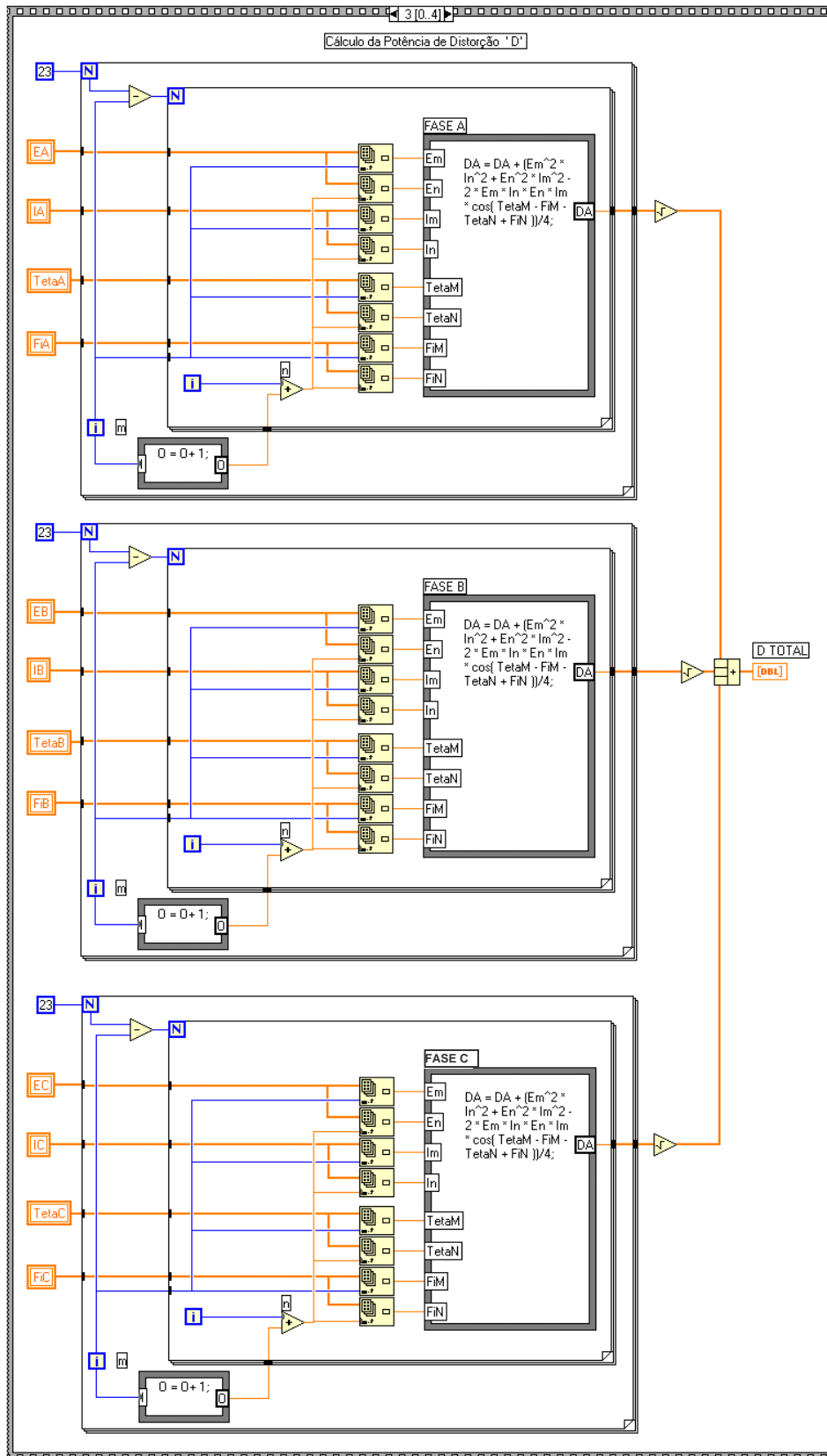


Figura 5.11 – Rotina para o cálculo da potência não-ativa de distorção (D).

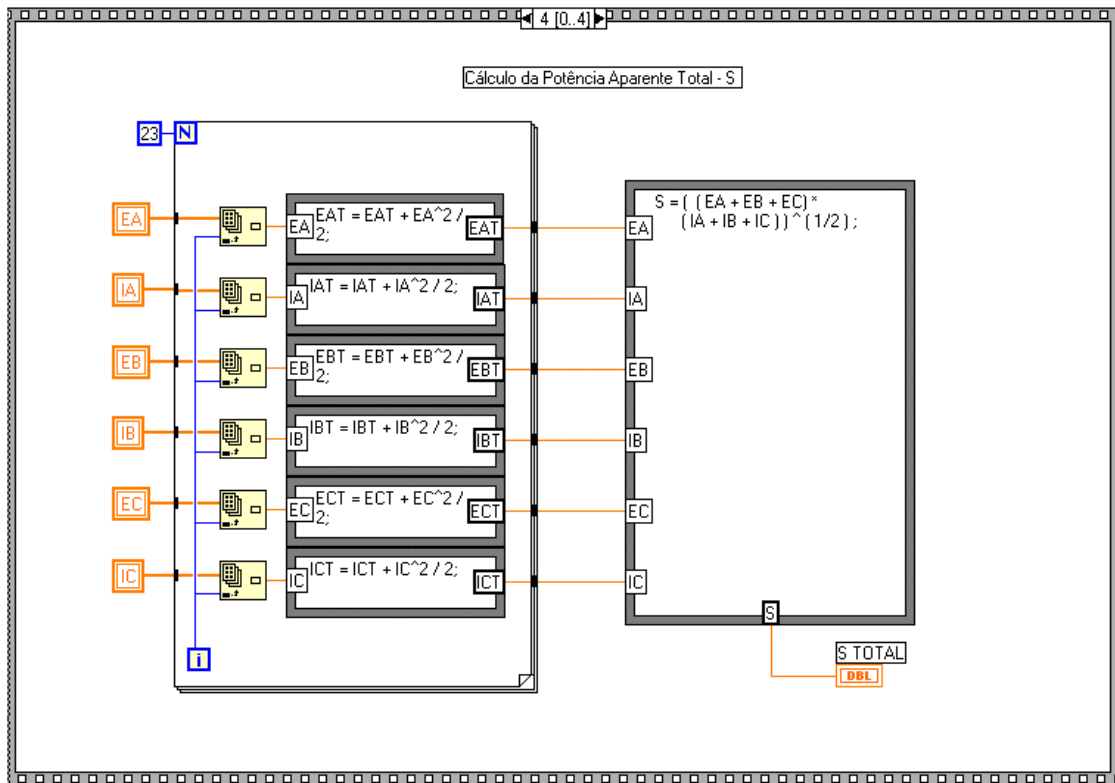


Figura 5.12 – Rotina para o cálculo da potência aparente (S).

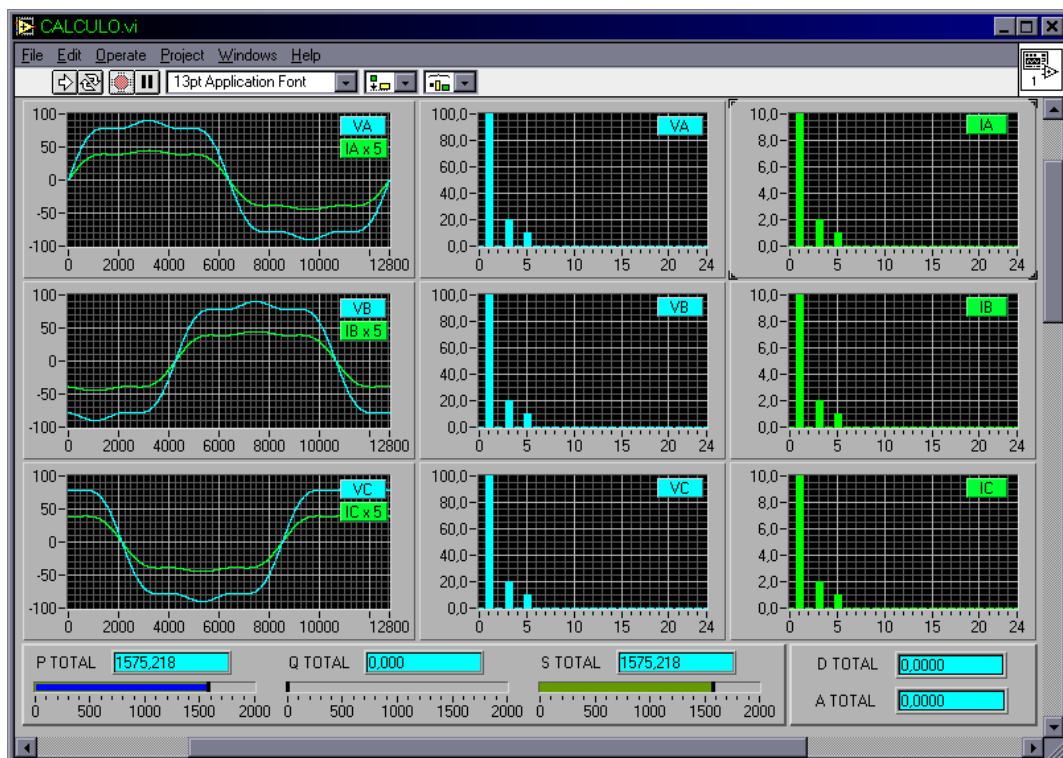


Figura 5.13 - Tela de resultados apresentada pelo medidor de protocolo aberto.

5.7 - Resultados da simulação

A seguir estão mostrados os resultados obtidos em simulações efetuadas com o medidor de protocolo aberto e com o MatLab (programa desenvolvido para cálculo numérico). Foram simuladas diversas situações diferentes alterando-se os sinais de tensão e corrente. Foram portanto modificadas as formas de onda e alteradas as condições de desequilíbrio. Alguns dos resultados obtidos nestas simulações assim como os erros percentuais apresentados pelo medidor em relação aos resultados calculados com o MatLab estão mostrados a seguir.

5.7.1 - Tensões senoidais e desequilibradas em amplitude, correntes senoidais e equilibradas e com ângulo de deslocamento de 0^0

$$\begin{aligned} V_A &= \frac{100}{\sqrt{2}} \angle 0^0 & I_A &= \frac{10}{\sqrt{2}} \angle 0^0 \\ V_B &= \frac{90}{\sqrt{2}} \angle -120^0 & I_B &= \frac{10}{\sqrt{2}} \angle -120^0 \\ V_C &= \frac{110}{\sqrt{2}} \angle +120^0 & I_C &= \frac{10}{\sqrt{2}} \angle +120^0 \end{aligned}$$

	Medidor	MatLab	ξ %
P [W]	1500,235	1500,000	0,016
Q [var]	0,000	0,000	0,000
D [vad]	0,000	0,000	0,000
A [vaa]	122,496	122,474	0,018
S [VA]	1505,227	1504,992	0,016

Comentário: Pelo fato de não haver deslocamento de fase das correntes em relação às respectivas tensões, o valor encontrado de Q é nulo. Como os sinais são senoidais não há potência de distorção (D =0). Em havendo um desequilíbrio nos sinais de tensão diferente do desequilíbrio de corrente

(na verdade as correntes são equilibradas), a potência não-ativa de assimetria não é nula.

5.7.2 - Tensões e correntes senoidais e desequilibradas em amplitude e com ângulo de deslocamento de 30°

$$\begin{aligned} V_A &= \frac{100}{\sqrt{2}} \angle 0^\circ & I_A &= \frac{10}{\sqrt{2}} \angle +30^\circ \\ V_B &= \frac{90}{\sqrt{2}} \angle -120^\circ & I_B &= \frac{11}{\sqrt{2}} \angle -90^\circ \\ V_C &= \frac{110}{\sqrt{2}} \angle +120^\circ & I_C &= \frac{9}{\sqrt{2}} \angle +150^\circ \end{aligned}$$

	Medidor	MatLab	ξ %
P [W]	1290,580	1290,378	0,016
Q [var]	-745,116	-745,000	0,015
D [vad]	0,491	0,000	-
A [vaa]	245,027	244,949	0,032
S [VA]	1510,243	1510,000	0,016

Comentário: Pelo fato de haver deslocamento de fase das correntes em relação às respectivas tensões, o valor encontrado de Q não é nulo. Como os sinais são senoidais não há potência de distorção. Não obstante, observa-se que o medidor encontrou um valor não nulo (embora bastante pequeno) de potência não-ativa de distorção (D =0,491 vad). Em havendo um desequilíbrio nos sinais de tensão diferente do desequilíbrio de corrente (não há proporcionalidade entre os valores de tensão e corrente), a potência não-ativa de assimetria não é nula.

5.7.3 - Tensões e correntes não senoidais e equilibradas em amplitude e com ângulo de deslocamento de 0°

$$V_A = 100 \cdot \text{sen}(\theta + 0^{\circ}) + 20 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 0^{\circ}) + 10 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta + 0^{\circ})$$

$$V_B = 100 \cdot \text{sen}(\theta - 120^{\circ}) + 20 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 0^{\circ}) + 10 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta + 120^{\circ})$$

$$V_C = 100 \cdot \text{sen}(\theta + 120^{\circ}) + 20 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 0^{\circ}) + 10 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta - 120^{\circ})$$

$$I_A = 10 \cdot \text{sen}(\theta + 0^{\circ}) + 2 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 0^{\circ}) + 1 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta + 0^{\circ})$$

$$I_B = 10 \cdot \text{sen}(\theta - 120^{\circ}) + 2 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 0^{\circ}) + 1 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta + 120^{\circ})$$

$$I_C = 10 \cdot \text{sen}(\theta + 120^{\circ}) + 2 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 0^{\circ}) + 1 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta - 120^{\circ})$$

	Medidor	MatLab	ξ %
P [W]	1575,218	1575,000	0,014
Q [var]	0,000	0,000	0,000
D [vad]	0,000	0,000	0,000
A [vaa]	0,000	0,000	0,000
S [VA]	1575,218	1575,000	0,014

Comentário: Pelo fato de não haver deslocamento de fase das correntes em relação às respectivas tensões, o valor encontrado de Q é nulo. Embora haja distorção nos sinais de tensão e corrente, não há potência de distorção. Isto ocorre porque as formas de onda das correntes são proporcionais às das respectivas tensões e por não haver deslocamento de fase. Não existindo desequilíbrio nos sinais de tensão e de corrente, a potência não-ativa de assimetria é nula.

5.7.4 - Tensões e correntes não senoidais e equilibradas em amplitude e com ângulo de deslocamento de 30°

$$V_A = 100 \cdot \text{sen}(\theta + 0^\circ) + 20 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 0^\circ) + 10 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta + 0^\circ)$$

$$V_B = 100 \cdot \text{sen}(\theta - 120^\circ) + 20 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 0^\circ) + 10 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta - 240^\circ)$$

$$V_C = 100 \cdot \text{sen}(\theta + 120^\circ) + 20 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 0^\circ) + 10 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta + 240^\circ)$$

$$I_A = 10 \cdot \text{sen}(\theta + 30^\circ) + 2 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 90^\circ) + 1 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta + 150^\circ)$$

$$I_B = 10 \cdot \text{sen}(\theta - 90^\circ) + 2 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 90^\circ) + 1 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta - 90^\circ)$$

$$I_C = 10 \cdot \text{sen}(\theta + 150^\circ) + 2 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 90^\circ) + 1 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta + 30^\circ)$$

	Medidor	MatLab	ξ %
P [W]	1286,249	1286,048	0,016
Q [var]	-817,628	-817,500	0,016
D [vad]	398,058	397,995	0,016
A [vaa]	0,062	0,000	-
S [VA]	1575,247	1575,000	0,016

Comentário: Pelo fato de haver deslocamento de fase das correntes em relação às respectivas tensões, o valor encontrado de Q não é nulo. Neste caso, como ocorreu no caso anterior, os sinais não são senoidais e as formas de onda das correntes são proporcionais às das respectivas tensões. Porém, existe também um deslocamento de fase e, por esta razão, há potência de distorção. Não existindo desequilíbrios nos sinais de tensão e de corrente, a potência não-ativa de assimetria é nula. Apesar disto, observa-se que o medidor encontrou um valor não nulo (embora muito pequeno) de potência não-ativa de assimetria (A =0,062 vaa).

5.7.5 - Tensões e correntes não senoidais e desequilibradas e com ângulo de deslocamento de 30°

$$V_A = 100 \cdot \text{sen}(\theta + 0^\circ) + 20 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 0^\circ) + 10 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta + 0^\circ)$$

$$V_B = 90 \cdot \text{sen}(\theta - 120^\circ) + 20 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 0^\circ) + 10 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta - 240^\circ)$$

$$V_C = 110 \cdot \text{sen}(\theta + 120^\circ) + 20 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 0^\circ) + 10 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta + 240^\circ)$$

$$I_A = 10 \cdot \text{sen}(\theta + 30^\circ) + 2 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 90^\circ) + 1 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta + 150^\circ)$$

$$I_B = 11 \cdot \text{sen}(\theta - 90^\circ) + 2 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 90^\circ) + 1 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta - 90^\circ)$$

$$I_C = 9 \cdot \text{sen}(\theta + 150^\circ) + 2 \cdot \text{sen}(3 \cdot \theta + 90^\circ) + 1 \cdot \text{sen}(5 \cdot \theta + 30^\circ)$$

	Medidor	MatLab	ξ %
P [W]	1277,589	1277,589	0,000
Q [var]	-812,625	-812,500	0,015
D [vad]	400,503	400,434	0,017
A [vaa]	245,029	244,949	0,033
S [VA]	1585,253	1585,000	0,016

Comentário: Pelo fato de haver deslocamento de fase das correntes em relação às respectivas tensões, o valor encontrado de Q é diferente de zero. Neste caso, além dos sinais serem distorcidos (e não proporcionais), existe ainda um deslocamento de fase e, por estas razões, existe potência não-ativa de distorção. Há também desequilíbrios não proporcionais nos sinais de tensão e de corrente. Assim sendo, a potência não-ativa de assimetria é não nula.

5.7.6 - Tensões e correntes senoidais e desequilibradas em amplitude e com ângulo de deslocamento de 0^0

$$V_A = \frac{100}{\sqrt{2}} \angle 0^0$$

$$I_A = \frac{10}{\sqrt{2}} \angle 0^0$$

$$V_B = \frac{90}{\sqrt{2}} \angle -120^0$$

$$I_B = \frac{9}{\sqrt{2}} \angle -120^0$$

$$V_C = \frac{110}{\sqrt{2}} \angle +120^0$$

$$I_C = \frac{11}{\sqrt{2}} \angle +120^0$$

	Medidor	MatLab	ξ %
P [W]	1510,237	1510,000	0,016
Q [var]	0,000	0,000	0,000
D [vad]	0,000	0,000	0,000
A [vaa]	0,000	0,000	0,000
S [VA]	1510,237	1510,000	0,016

Comentário: Pelo fato de não haver deslocamento de fase das correntes em relação às respectivas tensões, o valor encontrado de Q é nulo. Como os sinais são senoidais não há potência de distorção (D =0). Em havendo um desequilíbrio nos sinais de tensão igual ao desequilíbrio de corrente, a potência não-ativa de assimetria também é nula.

5.8 - Resultados da aquisição

Depois do desempenho do medidor haver sido testado frente às diversas situações mostradas no item 5.7, foram realizados testes com aplicação de sinais elétricos. Nestes testes, os vetores associados aos sinais de tensão e corrente não mais foram produzidos a partir de expressões matemáticas. Foram formados através da aquisição por intermédio do medidor de protocolo aberto.

Os testes foram realizados em um circuito, representado na figura 5.14, composto por uma fonte de sinais arbitrários suprindo uma ponte trifásica com carga resistiva (sem bobina de alisamento), nas condições descritas a seguir:

- O valor da corrente média de carga foi de 1,7 A;
- Tensões de alimentação senoidais ceifadas com distorção harmônica total de 20 %. Os valores eficazes destas tensões entre fase e neutro foram:

V_A [V]	V_B [V]	V_C [V]
35,0	30,0	35,0

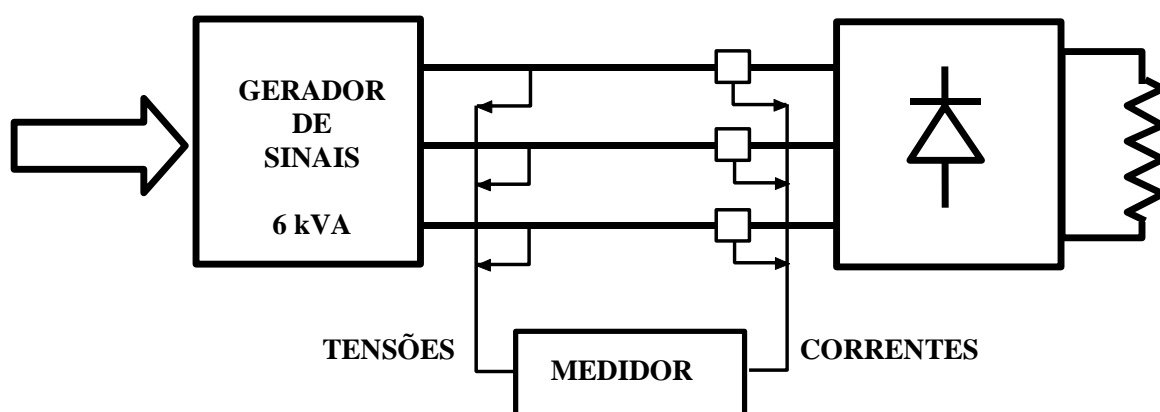


Figura 5.14 – Representação do circuito utilizado para a realização do teste.

A seguir estão mostrados os resultados da aquisição e aplicação dos protocolos citados no item 5.6.

P [W]	Q [var]	D [vad]	A [vaa]	S [VA]
86,10	3,69	27,77	5,27	90,65

A aplicação da equação (3.1) nestes resultados conduz a:

$$S = \sqrt{(86,10)^2 + (3,69)^2 + (27,77)^2 + (5,27)^2} \Rightarrow S = 90,70 \text{ [VA]}$$

Este valor de potência aparente quando comparado com o apresentado pelo medidor, corresponde, na condição mais desfavorável, a um erro de 0,05 %.

A figura 5.15 mostra os sinais de corrente e tensão bem como os demais resultados apresentados.

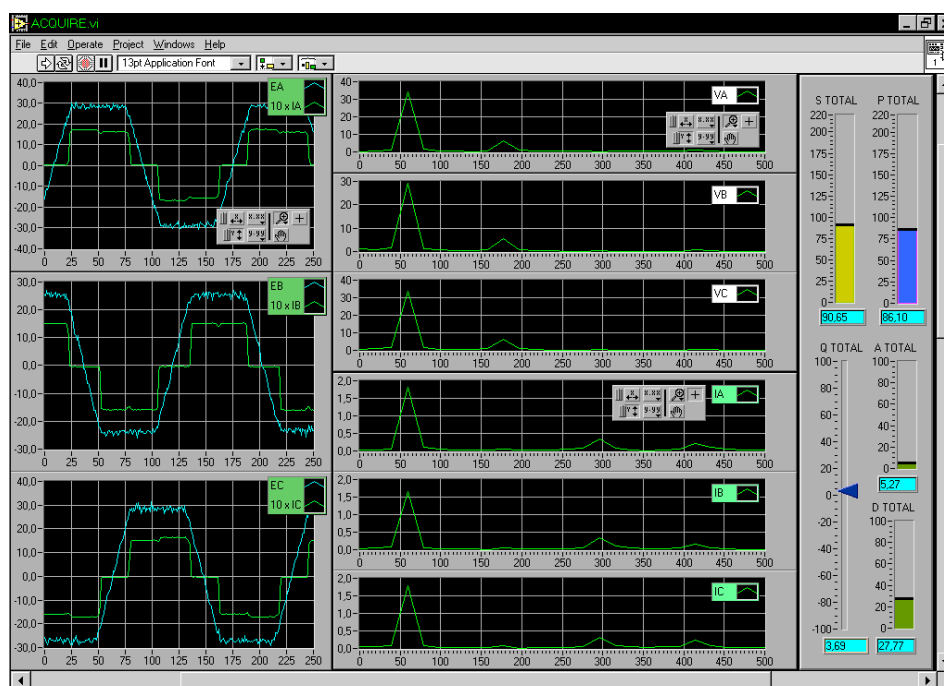


Figura 5.15 - Tela de resultados do processo de aquisição com sinais elétricos.

5.9 - Resultados da aquisição de um caso real

Tendo como meta avaliar o desempenho dos novos protocolos frente a uma situação real, decidiu-se pelo uso do equacionamento desenvolvido e apresentado no capítulo 3 e que posteriormente foi depurado a partir das considerações realizadas no capítulo 4. Deste modo, foram implementadas as seguintes equações:

- equação (4.19) – cálculo da potência aparente (S);
- equação (4.16) – cálculo da potência ativa (P);
- equação (4.17) – cálculo da potência não-ativa de deslocamento (Q);
- equação (3.22) – cálculo da potência não-ativa de distorção (D);
- equação (3.26) – cálculo da potência não-ativa de desequilíbrio (A).

5.9.1 – Obtenção dos dados

Os dados foram obtidos através do registro direto dos sinais de tensão e corrente de um consumidor atendido em média tensão. Para tanto foi empregado um medidor registrador analisador de harmônicos. Equipamentos deste tipo têm tido seu uso cada vez mais disseminado para fins de medição para faturamento. Seu emprego, antes restrito a grandes consumidores cujo consumo justificava o investimento em um dispositivo com mais recursos, ficou acessível a pequenos consumidores industriais. No caso em análise, foi empregado para efetuar a aquisição dos sinais, tendo sido instalado no lado de menor tensão de um transformador de distribuição Dy1. A figura 5.16 mostra as formas de onda dos sinais da fase B.

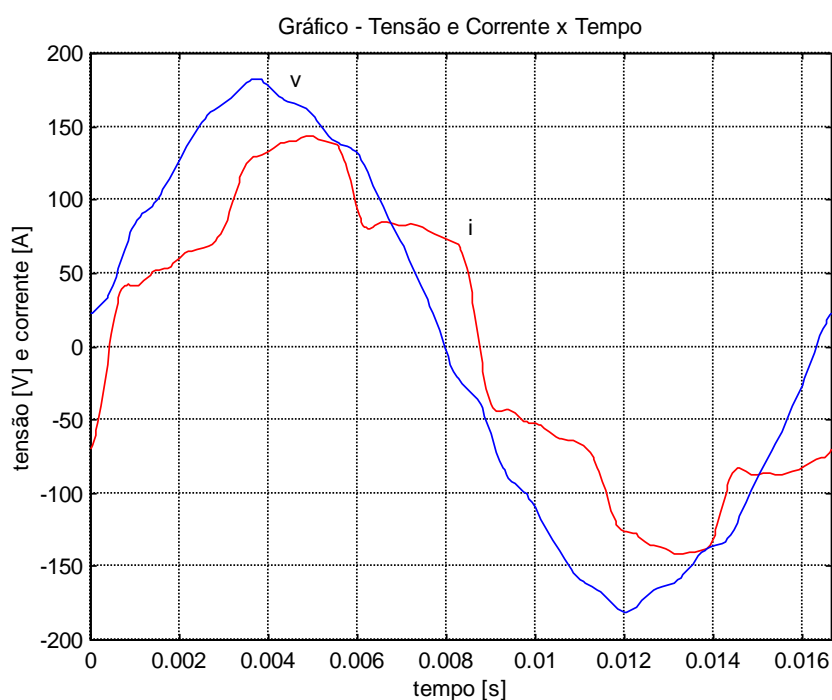


Figura 5.16: Formas de onda da tensão e corrente registradas na fase B.

A tabela 5.2 mostra os valores de pico da tensão (em volts) e da corrente (em ampères) para as ordens harmônicas (h) consideradas na análise, para as fases A, B e C.

Tabela 5.2: Componentes harmônicos dos sinais adquiridos

h	V_A	V_B	V_C	h	I_A	I_B	I_C
0	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0,00	0,00
1	179,61	174,84	174,89	1	146,24	130,93	143,98
2	0,73	1,16	1,03	2	0,84	1,96	1,91
3	0,00	0,00	0,00	3	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	4	0,00	0,00	0,00
5	4,61	4,35	1,64	5	17,67	21,24	17,97
6	0,00	0,00	0,00	6	0,00	0,00	0,00
7	1,17	1,75	0,92	7	13,93	9,92	11,53
8	0,00	0,00	0,00	8	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	9	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	10	0,00	0,00	0,00
11	1,95	1,49	2,47	11	7,01	7,80	8,10
12	0,00	0,00	0,00	12	0,00	0,00	0,00
13	2,37	2,51	1,65	13	4,27	4,26	3,01
14	0,00	0,00	0,00	14	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	15	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00	16	0,00	0,00	0,00
17	1,83	1,17	1,48	17	3,02	3,71	2,28
18	0,00	0,00	0,00	18	0,00	0,00	0,00
19	2,56	1,69	2,16	19	2,86	1,96	1,87
20	0,00	0,00	0,00	20	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	21	0,00	0,00	0,00
22	0,00	0,00	0,00	22	0,00	0,00	0,00
23	1,73	0,80	0,28	23	1,00	1,54	1,17

O cálculo dos fatores de distorção THD_v e THD_i médios (média aritmética da distorção das fases A, B e C) obtidos a partir das formas de onda resultantes dos dados mostrados na tabela 5.2, apresentam os valores de 3,2% e 17,5 %, para a tensão e para a corrente respectivamente. Os fatores de desequilíbrio obtidos foram 1,02 % para a tensão (FDT) e 3,54 % para a corrente (FDC).

5.9.2 - Aplicação dos protocolos atual e proposto

Inicialmente, os cálculos das grandezas foram efetuados do modo como é efetuado atualmente, isto é, sem levar em conta os efeitos da distorção harmônica e do desequilíbrio. Desta forma obteve-se os dados indicados na tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Resultados obtidos com o protocolo atual.

Grandeza	Resultado
P [W]	34 695
Q [var]	12 653
S [VA]	36 930
FP	0,9395

Posteriormente, os cálculos das grandezas foram novamente efetuados, porém utilizando o modo como está proposto neste trabalho, levando-se em conta os efeitos da presença de sinais distorcidos e da existência de um certo grau de desequilíbrio. Desta forma obteve-se os dados indicados na tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Resultados obtidos com o protocolo proposto.

Grandeza	Resultado
P [W]	34 709
Q [var]	12 633
D [vad]	6 676
A [vaa]	1 560
S [VA]	37 567
FP _Q	0,9397
FP _D	0,9820
FP _A	0,9990
FP _G	0,9218

Os resultados mostrados nas tabelas 5.3 e 5.4 corroboram as considerações realizadas no capítulo 4. O exame dos índices de distorção harmônica e os níveis de desequilíbrio, verificados nos sinais adquiridos no ponto em que foi efetuada a medição, indica que os mesmos estavam abaixo dos valores máximos admitidos. Por esta razão, os valores dos fatores de potência relacionados às potências de distorção e de desequilíbrio mantiveram-se acima dos respectivos fatores de potência de referência, não cabendo portanto a cobrança de multas.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÕES

6.1 – Comentários preliminares

Considerando todos os aspectos que dizem respeito aos novos rumos que o uso da eletricidade tende a seguir, especialmente tendo em conta as peculiaridades macroeconômicas e técnicas conduzidas pelo fenômeno da globalização, observa-se uma clara tendência de haver o emprego cada vez mais significativo, sempre numa taxa crescente, de equipamentos que intrinsecamente provocam uma maior ocupação supérflua de sistemas elétricos. Depara-se então com um problema que é semelhante àquele com o qual os profissionais do setor foram desafiados a buscar uma solução nos primórdios do uso da energia elétrica: *como tarifar de modos diferentes a consumidores que ocupam diferentemente o sistema?* Naquela época remota, o problema restringia-se à demanda de reativo de deslocamento e foi solucionado com a interferência do fator de potência no faturamento. Hoje, neste início de século, a mesma estratégia de medir o nível ocupação e a partir daí calcular índices que produzam interferências na tarifação continua a apresentar-se como uma solução interessante. No entanto, defronta-se agora com a necessidade do desenvolvimento de medidores de energia, que sejam capazes de manter um funcionamento adequado ainda que operando em condições adversas. Neste sentido, descarta-se toda e qualquer possibilidade de uso de medidores eletromecânicos para contabilizar efeitos abordados neste trabalho. Isto se deve tão somente à completa inabilidade de tais equipamentos de discriminar as grandezas necessárias para levar à prática, por meio de providências concretas, uma nova política tarifária. Sendo assim, nos dias atuais mostra-se como uma solução exequível o uso de equipamentos que trabalhem com tecnologia numérica.

O processo de medição por amostragem de sinais e com subsequente utilização da DFT, largamente utilizado nos dias atuais, é suficiente para atender

à proposição. No mercado especializado já existem medidores que atendem parcialmente às exigências das novas condições, no entanto, para que seja possível implementar novos protocolos propostos, tais equipamentos terão de sofrer algumas alterações. Por outro lado, surge a preocupação a respeito do incremento nos custos de medição. Mas também, nota-se a princípio que as alterações são basicamente na abrangência do *software* utilizado não devendo haver, portanto, grande majoração de custos para o processo de medição já existente. Cabe ressaltar que a atual tecnologia de medidores de energia tem possibilitado a implementação de sofisticados meios de medição, outrora inimagináveis, a um custo cada vez mais acessível.

6.2 – Principais contribuições desta tese

No encadeamento das idéias expostas neste trabalho, evidencia-se o fato de que o processo de tarifação contemporâneo está distante de considerar explicitamente a ocupação excedente causada pelos volt-ampères não-ativos de distorção e de desequilíbrio. Os instrumentos legais ora disponíveis bem como os protocolos de medição atualmente empregados não cooperam para que seja exercida uma política tarifária de maior equidade. Neste sentido, visando abrandar esta lacuna, este trabalho contribui apresentando um contexto que parece refletir uma condição mais justa de repartição dos ônus de ocupação da rede elétrica. Em síntese pode-se dizer que esta tese propõe:

- a) a contabilização destes excedentes, de forma semelhante àquela com que se faz para a potência reativa de deslocamento, de equanimidade ratificada por décadas de aplicação. Sendo assim, apresenta uma série de protocolos capazes de discriminar individualmente cada componente ativa e não-ativa, de forma a possibilitar a sua medição pelos medidores modernos que trabalham sob o princípio de amostragem de sinais;

- b) a discriminação e o desmembramento das potências não-ativas a partir de sinais genéricos de tensões e correntes;
- c) a possibilidade da adoção de fatores de referência para os excedentes de distorção e de desequilíbrio;
- d) finalmente, a partir de considerações devidamente refletidas e ponderadas, sugere um refinamento dos índices de ocupação supérflua do sistema elétrico com o propósito de incitar uma utilização mais racional da energia elétrica, evitando-se assim o vandálico desperdício da energia elétrica.

Resta ainda salientar que constata ser o fator de potência de desequilíbrio (FPA), não apenas uma característica intrínseca da carga, mas ser também fortemente dependente peculiaridades do sistema. Neste sentido, destaca-se o ineditismo da idéia de escolher-se, para fins de contabilização, o maior dos FPAs calculados a partir da permutação cíclica das fases.

6.3 – Propostas de continuação do trabalho

Este trabalho não tem a menor pretensão de ter exaurido os assuntos nele abordados. Ao contrário, apenas reivindica uma porção da tarefa de promover e provocar em outros pesquisadores o desejo de desenvolver trabalhos que lhe dêem continuidade e de estimular a produção de pesquisas que sejam concebidas a partir desta tese.

Dois trabalhos expressivos (uma monografia e uma dissertação de mestrado) já foram realizados e defendidos tendo como alicerce esta tese de doutorado. O sucesso destes empreendimentos deveu-se, sobretudo, à notabilidade do tema e ressaltou a importância de que outras investigações sejam conduzidas. Neste sentido, os seguintes temas são sugeridos:

- **Investigação da influência do quarto fio**

O cálculo da potência aparente segundo a equação (2.35) não leva em conta a limitação de condução de corrente pelo neutro. Nesse sentido, pelo equacionamento proposto, o neutro teria impedância nula. Por outro lado, este caminho para as correntes homopolares impõe limitações ao fluxo de potência. Desta forma, esta condição acarreta em uma maior ocupação do sistema, que deveria ser refletida numa maior potência aparente. Assim, pretende-se investigar a implementação dos efeitos deste fenômeno no protocolo proposto.

- **Investigação da sensibilidade de “D” face à distorção da tensão**

Foi verificado no item 4.4.4 que a potência não-ativa de desequilíbrio “A” é influenciada pelo desequilíbrio das tensões. Da mesma forma, sugere-se investigar a influência da distorção da tensão de alimentação no valor da potência de distorção “D”. Neste caso, é desejável que o pior caso ocorra quando a tensão da fonte for senoidal, que seria a condição mais justa.

- **Implementação do novo protocolo**

Implementar e validar o novo protocolo desenvolvido a partir de um estudo técnico-econômico que esteja agregado aos conceitos sintetizados nas equações 4.10, 4.11 e 4.12. Comparar os resultados daí obtidos com aqueles que são atualmente utilizados para efeito de contabilização.

- **Colocação de filtros ativos**

Analisar a possibilidade da implementação de um filtro que atue de modo a mitigar todas as grandezas expressas no fator “G” - equação (4.18).

- **Análise da possibilidade do uso de componentes simétricas**

O uso de componentes simétricas visa facilitar a solução de problemas envolvendo circuitos desequilibrados. Desta forma, sugere-se avaliar o desempenho desta ferramenta quando aplicada aos protocolos propostos.

6.4 – Comentários finais

É também apropriado acentuar que o desenvolvimento deste trabalho, sob a visão da didática acadêmica, aponta no sentido de que o aprendizado na área de engenharia elétrica deveria passar por etapas bastante distintas, sobretudo no que se refere aos conceitos e formulações usados, no dia-a-dia, para solução de problemas. A razão principal desta premissa é a tênue fronteira que divide os conceitos que têm forte correlação com fenômenos físicos daqueles que são puramente matemáticos.

Em uma primeira etapa não deveria haver a preocupação, por parte daquele que ensina, de estabelecer esta diferença. Exemplificando, o conceito de potência elétrica deveria ser passado ao aluno sem que sequer fosse mencionado o aspecto puramente matemático da grandeza. De outro modo, o educador de quem se espera que transmita conhecimentos solidamente embasados, pode chegar ao absurdo de pretender ensinar que um retificador, composto por diodos e outros componentes passivos, fosse capaz de produzir energia, que injetada na rede, se prestaria a suprir eventuais perdas harmônicas que ocorressem em condutores de energia elétrica.

Em uma segunda etapa, deve-se então procurar, na medida do possível, deixar claro o que é físico e o que é uma ferramenta de cunho matemático. Um exemplo disso é o conceito de harmônicos e dos diversos tipos de potência reativa dentro da área de qualidade de energia elétrica.

Finalmente deve advir uma etapa, gerada espontaneamente dentro dos usuários destes conceitos, na qual o grau de amadurecimento é suficiente para fazer com que esta diferença deixe de ter importância. É como falar um outro idioma sem se dar conta de que o fato está ocorrendo. Infelizmente, poucos são os técnicos e engenheiros que conseguem atingir esta maturidade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[Ab02] – Abreu, J.P.G., Emanuel, A.E., “Induction Motor Thermal Aging Caused by Voltage Distortion and Imbalance: Loss of Useful Life and Its Estimated Cost”, IEEE, Transactions on Industry Applications, Vol. 38, Nº 1, pp 12-20, Jan. 2002;

[Ar97] – Arseneau, R., Heydt, G.T., Kempker, M.J., “Application of IEEE Standard 519-1992, Harmonic Limits for Revenue Billing Meters”, IEEE, Transactions on Power Delivery, Vol. 12, Nº 1, Jan. 1997;

[Ba92] - Balda, J.C., “Harmonic Analysis of Converter-fed DC Systems Under Unbalanced and Harmonic Supply Voltages”, Electric Power Systems Research, Vol. 23, pp. 233-237, 1992;

[Bu27] – Budeanu, C.I., “Puissances Reactives et Fictives”, Instytut Romain de l’Energie, Bucarest, 1927;

[Ce99] – Centro de Excelência em Distribuição, “Testes em Medidores de Energia. Normalização, Medição e Tarifação. Tarifação e Medição de Sistemas Distorcidos”, Nota Técnica – CED 319 / QUEN 004(III) / NT 012 / OR, 1999;

[Co97] – Comissão de Serviços Públicos de Energia, “Projeto de Qualidade do Fornecimento de Energia”, São Paulo, Brasil, 1997;

[Cz86] – Czarnecki, L.S., “Methods of Describing the Power Properties of Linear Nonsinusoidal Systems”, 2nd International Conference on Harmonics in Power Systems, Winnipeg, Canada, pp. 142-147, 1986;

[Cz90] – Czarnecki, L.S., “Correspondence on Power Components in Systems with Sinusoidal and Nonsinusoidal Voltage and Currents”, Proc. IEE, Vol 137, Pt.B., Nº 3, pp. 194-196, 1990;

[Cz96] – Czarnecki, L.S., “Comments on Active Power Flow and Energy Accounts in Electrical Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Asymmetry”, IEEE Trans. On Power Delivery, 1996;

[De79] - Depenbrock, M., “Wirk-, und Blindleistung”, ETG-Fachtagung, 1979;

[De93] – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, “Portaria 1569/93, 1993;

[De97] – Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica, “Portaria 163- Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica”, 1997;

[El88] – Electric Power Research Institute, “Techniques for energy conservation in AC motor-driven systems.”, Technical Report No. EM – 2037, 1988;

[Em97] – Emanuel, A.E.; McNeil, J.A., “Electric Power Quality”, Workshop on Power Quality, 20 e 21 de novembro de 1997, São Lourenço - MG - Brasil;

[Em99] – Emanuel, A.E., “Apparent Power Definitions for Three-phase Systems”, IEEE, Transactions on Power Delivery, Vol. 14, Nº 3, July 1999;

[Fe47] - Feuerbach, A., “Lehrbuch des Gemeinen in Deustschland Gültigen Peinlichen Rechts”, 14^a .ed., p.41, 1847;

[Fe74] - Ferreira, Francisco de Assis, "Sistematização das Séries Ortogonais", Tese de Livre-Docência em Matemática Aplicada, EFEI, 1974;

[Fi84] - Filipowski, P., "The measurement of distortion Current and Distortion Power", IEEE Trans. on Instr. and Meas., Vol. IM-33, N^o. 1, pp. 36-40, 1984;

[Fi94] – Filipowski, P.S.; Baghzouz, Y. and Cox M.D. "Discussion of Power Definitions Contained in the IEEE Dictionary", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol 9, N^o 3, pp. 1237-1244, 1994;

[Fr31] - Fryze, S., "Active-, Reactive-, and Apparent Powers in Networks with Nonsinusoidal Waveforms of Voltage and Current", Przegl. Elektr., No. 7, 8, 1931;

[Ga59] - Gafford, B.N. et al., "Heating of Induction Motors on Unbalanced Voltages", AIEE Transactions Power Apparatus Systems, Vol. 78, pp. 282-297, 1959;

[Hu97] - Hu, L. and Morrison, L.E., "The Use of Modulation Theory to Calculate the Harmonic Distortion in HVDC Systems Operating on a Unbalanced Supply", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 12, n^o 2, pp. 973-980, May 1997;

[Ic96] - "IEC 1000-3-6: Assessment of Emission Limits for Distorting Loads in MV and HV Power Systems", 1996;

[Ie92] - IEEE Std 519-1992: IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, New York, NY, April 1993;

[Ie95] - IEEE Working Group on Non-Sinusoidal Situations, "Practical Definitions for Power in Systems with Non-Sinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion", Paper No. 95 WM 040-6-pwr, IEEE PES, Winter Meeting, New York, NY, February 1995;

[Ka60] – Kasatkin, A. and Perekalin, M., “Basic Electrical Engineering”, Peace Publishers, Moscow, 1960;

[Ki71] - Kimbark, E.W., “Direct Current Transmission”, Vol. 1, Wiley – Interscience, 1971;

[Mc95] - McEachern, A., Grady, W.M., Moncrief, W.A., Heydt, G.T. and McGranaghan, M., “Revenue and Harmonics: An Evaluation of Some Proposed Rate Structures”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PWRD-10, No.1, pp. 474-482, January 1995;

[Mu94] – Mukartihal, G., Sarojini, B. and Setra, E., “Digital Watt-hour Meter”, Proc. of the 10th Instrum. And Meas. Techn. Conference, Hamamatsu, Japan, 1994;

[Rb01] - Ribeiro, Paulo F. and Carpinelli, G., “IEEE Std Revision: The Need For Probabilistic Limits Of Harmonics”, Power Engineering Society Summer Meeting, 2001. IEEE , Volume: 2 pp. 809-812, 2001;

[Sc63] - Schmitz, R.F and Berndt, M.M., “Derating Polyphase Induction Motors Operating with Unbalanced Line Voltages”, IEEE Trans. on PAS, Vol.64, pp. 680 – 686, 1963;

[Sh72] – Shepherd, W. and Zakikhani, P., “Suggested Definition of Reactive Power for Nonsinusoidal Systems”, Proc. IEE. Vol. 119, No. 9, pp. 1361-1362, September. 1972;

[Sh88] –Shallenberger, O.B., “The Energy of Alternating Currents”, The Electrical World, March 3, p.114, 1888;

[Sh99] – Shenkman, A. and Chertkov, M., “Heat Conditions of a Three-phase Induction Motor by a One-phase Supply”, IEE Proceedings of Electrical Power Applications, Vol. 146 N^o 4, July, 1999;

[Si94] – Simmonds, R., “Paying for the Harm in Harmonics”, Electrical Review, Vol 227, N^o. 13, England, pp 32-34, July, 1994;

[St88] –Stanley, W., “Phenomena of Retardation in Induction Coil”, AIEE, Vol. V, No.4, p.97-108, Jan. 1888;

[Wa33] - Wagner, C.F. and Evans, R.D., “Symmetrical Components”, McGraw-Hill Book Company Inc. , p.326-327, 1933;

[Yi99] - Yildirim, D. and Fuchs, E.F., “Commentary on Various Formulations of Distortion Power D”, IEEE Power Engineering Review, volume 19, number 5, pp. 50-52, May 1999;