



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO -VIII

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

**TESTES DE CAMPO E ANÁLISES DA INFLUÊNCIA DE HARMÔNICOS EM EQUIPAMENTOS DE PROTEÇÃO
NOS SISTEMAS MONOFÁSICOS COM RETORNO PELA TERRA**

**Eloi Rufato Junior (*)
Copel-USP-UTFPR**

**Julio Sigueaki Omori
Copel**

**Carlos C. Barioni de Oliveira
USP-Poli**

**Mauricio Robles Ortega
Copel**

RESUMO

O presente trabalho tem como principal objetivo abordar a influência de componentes harmônicas de corrente (principalmente a componente de terceira ordem) sobre o funcionamento de um sistema trifásico de subtransmissão em 34,5kV, que possui como carga predominante sistemas monofásicos de retorno pela terra (MRT), cuja análise detalhada pode ser verificada em alguns alimentadores da Copel.

Desligamentos decorrentes de sobrecorrente de neutro, por abertura de religadores automáticos que protegem circuitos que predominantemente alimentam sistemas MRT, tem ocorrido com uma determinada frequência. Normalmente tem a sua causa atribuída a dificuldade de equilíbrio de cargas entre as fases do sistema trifásico. Sendo assim os ajustes para disparo por neutro tem atingido patamares elevados, prejudicando assim a sensibilidade e a confiabilidade do sistema de proteção.

Um novo alimentador de 34,5kV foi construído para dividir a carga de outro alimentador existente. A grande surpresa foram os sucessivos desligamentos por sobrecorrente de neutro que ocorriam somente quando as cargas eram alimentadas pelo novo alimentador, e somente em determinados períodos do dia.

A tentativa de descobrir o motivo dos referidos desligamentos, levou a realização de medições em campo (Subestações) onde se pode constatar uma elevadíssima corrente de terceiro harmônico, que aumentava bruscamente a partir de determinados períodos do dia e que se somando em fase na corrente de neutro, faziam com que a corrente eficaz do neutro tivesse módulo mais elevado que as correspondentes correntes das outras três fases.

A fonte do forte incremento de correntes de terceiro harmônico eram centenas de transformadores monofásicos de (19.053/254-127V), que atingiam a saturação mediante uma elevação de tensão próxima da nominal, sendo prejudicado ainda pelo baixo carregamento, fazendo com que muitos transformadores atuassem praticamente a vazio.

Soluções provisórias de manutenção da tensão num patamar inferior foram implementadas e o problema do desligamento foi sanado. Soluções definitivas estão sendo estudadas.

O acentuado crescimento de cargas não lineares conectadas ao sistema elétrico tem causado preocupação e uma série de estudos e discussões acerca do assunto. Muita atenção tem sido dada a evolução da utilização de cargas eletrônicas: dispositivos, equipamentos, acionamentos estáticos, com vasta aplicação tanto nas áreas industriais, quanto nas áreas comerciais e residenciais.

Apesar disso existem determinados equipamentos elétricos produtores de distorções harmônicas que são utilizados

(*) Rua José Izidoro Biazzetto, n° 158 – sala 7 - Bloco C – CEP 81200-240 - Curitiba, PR, – Brasil
Tel: (+55 41) 3331-2736 – Fax: (+55 41) 3331-3266 – Email: eloi.ruffato@copel.com

desde o início das aplicações práticas da eletricidade e eletromagnetismo, que são os dispositivos saturáveis. São incluídos nesta categoria, transformadores, motores, geradores, reatores entre outros. As harmônicas são geradas principalmente, devido à característica não linear do aço. Os transformadores normalmente são projetados para trabalhar na faixa linear, abaixo da curva de saturação. A densidade de fluxo necessário para o regime de funcionamento do transformador é definida com base numa complicada otimização, entre o custo do aço, perdas a vazio, ruído e uma série de outros fatores .

Embora a corrente de magnetização de transformadores, possua uma elevada distorção harmônica, esta é tipicamente inferior a 1% da corrente nominal a plena carga. Empresas de Energia Elétrica que possuam alimentadores com centenas de transformadores, podem ter distorções de harmônicas de tensão significativas, devido a sobreexcitação destes transformadores por variações nos patamares de tensão ou carregamento.

PALAVRAS-CHAVE

Proteção de Sistemas, Harmônicos, Sistema Monofásico com Retorno pela Terra (MRT), Relés, Proteção.

1.0 - INTRODUÇÃO

O acentuado crescimento de cargas não lineares conectadas ao sistema elétrico tem causado preocupação e uma série de estudos e discussões acerca do assunto. Muita atenção tem sido dada a evolução da utilização de cargas eletrônicas: dispositivos, equipamentos, acionamentos estáticos, com vasta aplicação tanto nas áreas industriais, quanto nas áreas comerciais e residenciais.

Apesar disso existem determinados equipamentos elétricos produtores de distorções harmônicas que são utilizados desde o início das aplicações práticas da eletricidade e eletromagnetismo, que são os dispositivos saturáveis. São incluídos nesta categoria, transformadores, motores, geradores, reatores entre outros. As harmônicas são geradas principalmente, devido à característica não linear do aço. Os transformadores normalmente são projetados para trabalhar na faixa linear, abaixo da curva de saturação. A densidade de fluxo necessário para o regime de funcionamento do transformador é definida com base numa complicada otimização, entre o custo do aço, perdas a vazio, ruído e uma série de outros fatores [1].

Embora a corrente de magnetização de transformadores, possua uma elevada distorção harmônica, esta é tipicamente inferior a 1% da corrente nominal a plena carga. Empresas de Distribuição de Energia Elétrica que possuam alimentadores com centenas de transformadores, podem ter distorções de harmônicas de tensão significativas, devido a sobreexcitação destes transformadores por variações nos patamares de tensão ou carregamento.

O caso abordado no presente trabalho apresenta problemas operacionais trazidos pela sobreexcitação de pequenos e numerosos transformadores monofásicos que alimentam cargas predominantemente rurais. Embora os resultados obtidos não possam ser generalizados para todas as aplicações similares, pode servir de alerta para o planejamento, proteção e operação de sistemas de distribuição de energia, que possuam objetivos comuns.

2.0 - SISTEMA MONOFÁSICO COM RETORNO PELA TERRA

Para que o problema de qualidade de energia verificado possa ser devidamente compreendido, se faz necessário realizar algumas explicações acerca do sistema Monofásico com Retorno pela Terra (MRT), que possui predominância no sistema de distribuição de energia elétrica (subtransmissão em 34,5kV) na área do estudo efetuado.

Estes sistemas são utilizados para alimentar cargas de baixa potência, normalmente consumidores rurais que situam-se a uma distância de dezenas ou até mesmo centenas de quilômetros dos centros de carga.

A opção e motivação para implantação deste sistema é o baixo custo envolvido para construção das redes de distribuição em média tensão, com apenas um cabo e isolador, fazendo com que o condutor de retorno da corrente seja a própria terra. Além do baixo consumo dos consumidores rurais que normalmente não apresentam a curto e médio prazo perspectiva de aumento consistente na demanda consumida.

O sistema monofilar constitui-se de um único condutor metálico ligado diretamente a uma das fases de uma linha trifásica, tendo o solo como caminho de retorno da corrente. Os transformadores de distribuição por ele alimentado tem seus enrolamentos primários ligados entre o condutor e o solo, de acordo com a Figura 1.

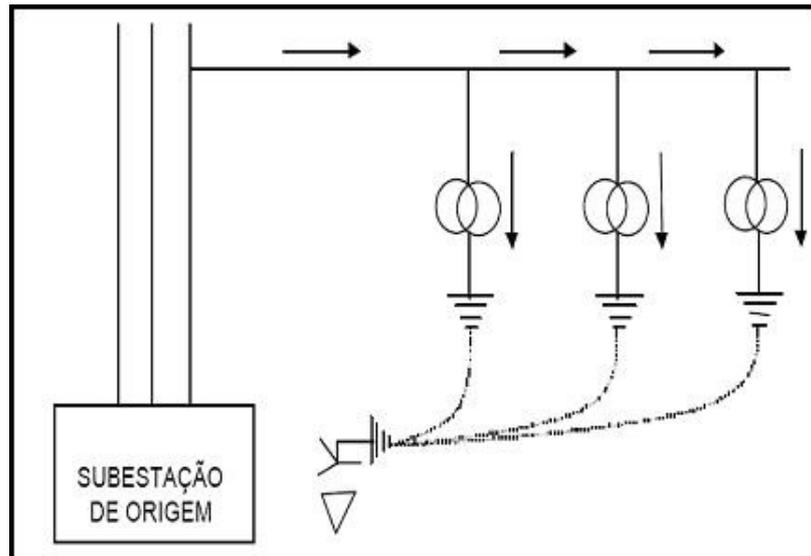


FIGURA 1 – Sistema MRT na Copel

Dos três sistemas MRT (monofilares) existentes [2]: Isolado, Duplex e Não Isolado, a Copel adota o sistema Não Isolado Híbrido, que usa como linha principal uma rede convencional a três fases, com ou sem neutro multi aterrado e com neutro solidamente aterrado na origem. Redes monofilares com retorno pela terra partem da rede principal para alimentar os transformadores rurais.

A Copel é a concessionária de distribuição de energia que possui o maior sistema MRT Monofilar do Brasil, com mais de 63.000 ligações de consumidores e extensão superior a 25.000 Km de linhas de distribuição, implantadas desde 1967.

3.0 - MEDIÇÃO DE QUALIDADE DE ENERGIA

3.1 Equipamento de Medição

Para a realização de medições foram utilizados dois registradores digitais de parâmetros de qualidade de energia elétrica, modelo RQE-II, da Reason Tecnologia. Este equipamento é caracterizado por ser modular multiprocessado, baseado em arquitetura industrial, que foi projetado para aquisição contínua de oito sinais analógicos (quatro tensões e quatro correntes), e 16 entradas digitais, possibilitando utilizá-lo como oscilógrafo.

A aquisição do sinal analógico é realizada a uma taxa de aquisição de 11520 HZ (192 pontos por ciclo), fazendo com que todos os cálculos envolvendo: Análise de componentes harmônicos, desequilíbrio, flicker, sobre tensões e subtensões momentâneas, possam ser calculadas normalmente.

Os registros de eventos efetuados pelo equipamento, são:

- **Oscilográficos**, contém valores instantâneos medidos com uma elevada taxa de aquisição de dados, reproduzindo fielmente os sinais elétricos, permitindo efetuar uma série de cálculos para análises complementares.
- **Fasoriais**, contém valores de módulo e ângulo, (tensões e correntes), medidos a cada ciclo.
- **Registros Estatísticos**: contém um resumo obtido de forma estatística (valores médios, máximos e mínimos ou desvio padrão, sobre os dados de registro).

Os equipamentos são previamente parametrizados de acordo com a natureza de medição e de registro a ser verificado.

A Figura 2 mostra o equipamento descrito.



FIGURA 2 – Analisador de Qualidade de Energia

3.2 Instalação dos Equipamentos

Foram instalados dois equipamentos para efetuar medições na tentativa de descobrir, a causa dos elevados desligamentos por sobre corrente de neutro.

O equipamento 1, foi instalado na EC Manoel Ribas, na saída para Cândido de Abreu (alimentador Rio Quietto, fonte SE Pitanga). Exatamente no sinal de corrente de neutro do RA 5233. O sinal de tensão foi retirado na barra de tensão alimentada pela fonte Ivaiporã, para evitar que desligamentos pudessem desligar o sistema de medição.

O equipamento 2, foi instalado na EC Cândido de Abreu, na saída do alimentador Tereza Cristina, um dos quatro circuitos terminais da Estação de Chaves. O sinal de corrente de neutro foi retirado do RA 5228 (conforme mostra a Figura 3).



FIGURA 3 – Equipamento de Medição Instalado em Controle Eletrônico de Religador

Uma das opções para monitorar a corrente do neutro nos equipamentos de 34,5 kV, onde em muitos casos não se tem acesso a este sinal, pois estes religadores geralmente possuem apenas 3 TCs de fase, é a utilização de um TC flexível, instalado no lodo externo do religador, abraçando as três fases do equipamento, conforme mostrado na Figura 5.



FIGURA 4 – Instalação do TC de Neutro no religador ESV 1512

4.0 - OCORRÊNCIA VERIFICADAS

Os equipamentos foram programados para geração de oscilografias automaticamente mediante o disparo dos religadores automáticos.

Verificar no detalhe da Figura 5, a corrente de neutro maior, do que as correntes nas demais fases, sendo que os fasores em 60 HZ, estão próximos do equilíbrio.

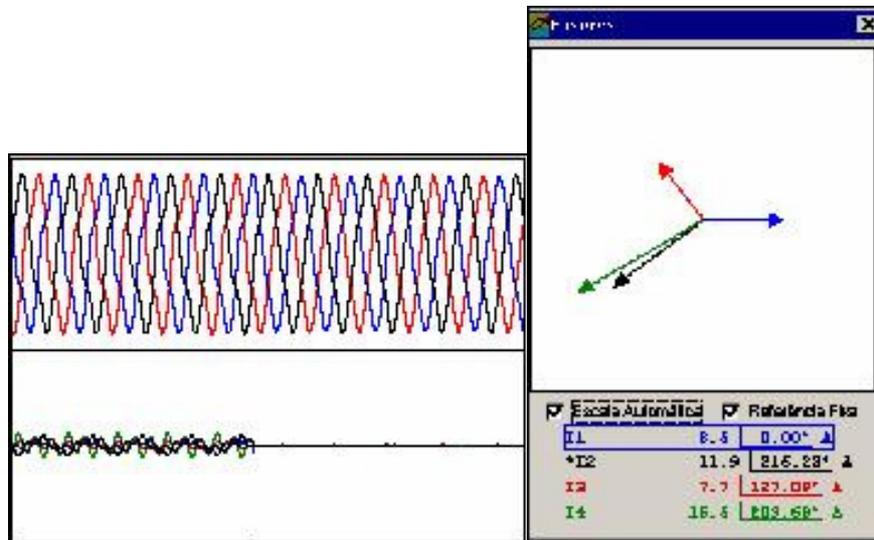


FIGURA 5 – Oscilografia e Fasores durante a Primeira Abertura do Religador

No segundo dia de ensaios, repetiram-se as mesmas medições, com o diferencial de ter sido elevado consideravelmente o disparo por neutro em ambos os RA'S.

Nas figuras 6 e 7 podem-se verificar a Oscilografia e Espectro de freqüência da corrente da última abertura em CDA

* THD médio de tensão de 31,3%

* THD médio de corrente de 163,7%

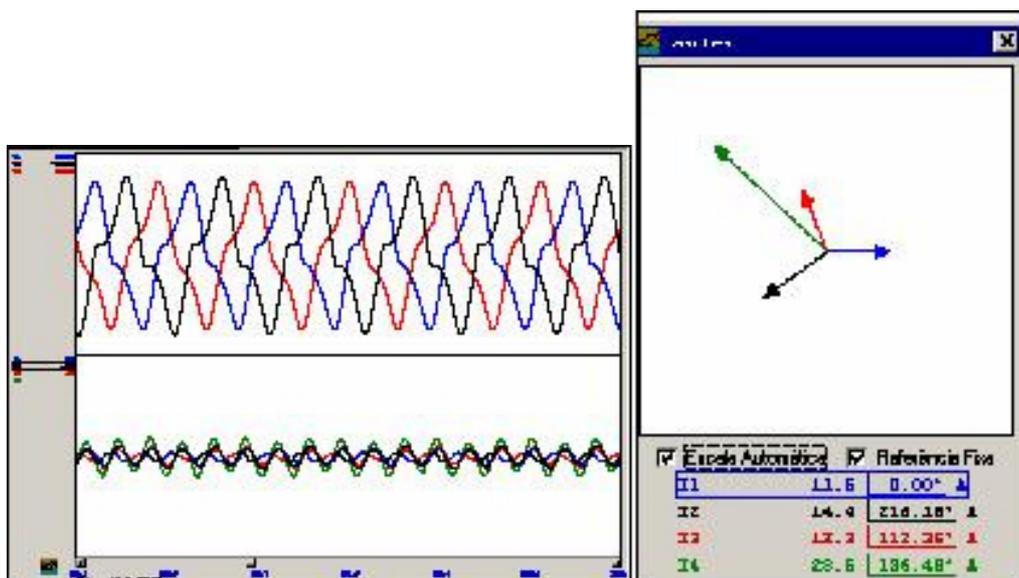


FIGURA 6 – Oscilografia e Fasores da última abertura do Religador na SE CDA

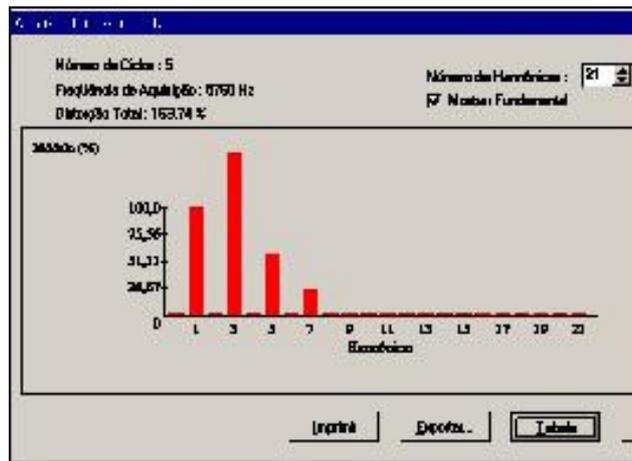


FIGURA 7 – Espectro de Frequência da Corrente na última abertura na SE CDA

5.0 - ANÁLISE DAS OCORRÊNCIAS

Analisando-se as ocorrências, as oscilografias registradas e as demais medições verificou-se:

- -Elevado nível de distorção harmônica de corrente nos dois pontos de medição.
- -Elevado nível da corrente harmônica de terceira ordem, predominante sobre as demais componentes.
- -Religamentos de religadores automáticos a montante ou jusante de sua instalação provocavam desequilíbrios de correntes de neutro necessárias para anteciparem o seu desligamento.
- -Nos períodos críticos monitorados, houve um crescimento elevado da distorção total de tensão nas barras das Estações de Chaves.
- -Houve uma elevação da corrente de terceiro harmônico na passagem do horário de carga pesada, para carga leve (depois das dez horas, tornando-se crítico de madrugada).
- -Durante os períodos críticos a corrente verificada no neutro chegou a superar em módulo o valor eficaz das demais correntes das três fases.
- -Composição de componentes harmônicas pares, denotando alteração no nível DC.
- - Elevação da tensão RMS do sistema, verificado nos dois pontos de medição. Chegando a valores acima da tensão nominal de 34,5kV.

6.0 - AÇÕES REALIZADAS

Apesar de ter resolvido o problema relativo aos desligamentos por sobrecorrente de neutro no sistema de subtransmissão de Manoel Ribas/Cândido de Abreu, ficou claro que algumas medidas de ação a longo prazo deveriam ser tomadas:

Mudança da Norma Técnica de Transformadores Monofásicos

-Devido à problemática gerada pelo alto nível de distorção harmônica de corrente, devido à instalação de transformadores monofásicos. A Norma Técnica Copel (NTC), referente a especificações técnicas dos transformadores monofásicos está em processo de revisão. A idéia é que o fabricante do equipamento possa garantir que para uma tensão de alimentação pouco superior a nominal, a corrente a vazio do equipamento não ultrapasse uma distorção total de corrente acima de um percentual pré-determinado

-Estudos Específicos de Qualidade de Energia

Os fenômenos observados proporcionam um grande campo para realização de estudos de qualidade de energia aplicados ao caso verificado. Referente a filtragem do sinal de corrente de neutro aquisitado pelo relé do próprio religador automático fazendo com que o equipamento pudesse diferenciar correntes de falha para terra de sobrecorrentes provocadas pela componente de terceiro harmônico.

Um segundo estudo, contempla um projeto e execução de um filtro passivo de média tensão com o objetivo de atenuar as correntes de terceiro harmônico, tendo como benefícios imediatos, a diminuição de perdas, e melhoria do fator de potência do sistema.

Os religadores utilizados na Subestação em Estudo, são do tipo ESV 3810 com controle eletrônico, baseados em componentes discretos, conforme mostrados nas Figuras 4 e 5.

Tais equipamentos não possuem filtros analógicos ou digitais para realizar a filtragem das componentes harmônicas de corrente, conforme foram constatados nas medições realizadas.

Uma das medidas adotadas para solucionar o problema de forma mais imediata, foi a substituição destes equipamentos por equipamentos que possuem relés microprocessados, do tipo SEL 351P (Amazon), da Schweitzer, instalados em religadores tipo GVR 38 da Whipp&Bourne, conforme a figura 9.

Estes equipamentos por possuírem filtragem para os componentes harmônicos, após instalados e repetidos todos os testes anteriores, mostraram-se eficazes para os referidos problemas, não levando os equipamentos a atuações indevidas.

7.0 - CONCLUSÕES

Apesar do sistema monofásico de retorno pela terra ter sido implantado na Copel no início da década de sessenta, e estudos posteriores indicarem preocupações com relação a componente de terceiro harmônico da corrente dos transformadores monofásicos, este caso reflete claramente a evolução de um problema pontual, pois o mesmo sempre existiu e ainda existe nos sistemas de subtransmissão , apresentando apenas variações de intensidade.

Este exemplo reflete muito bem os efeitos que um aumento expressivo de cargas não lineares pode trazer para a concessionária de energia elétrica.

A tendência cada vez maior da utilização deste de cargas não lineares, deve ser estudada com muita atenção e projetada para um futuro não muito distante. Este estudo será um grande desafio para os profissionais envolvidos no desenvolvimento de sistemas de distribuição de energia elétrica.

Desde a verificação deste caso, até os dias de hoje já houveram três ocorrências em partes distintas do sistema elétrico de subtransmissão da Copel, apresentando os mesmos “sintomas” analisados neste estudo de caso.

Uma atenção especial deve ser tomada com relação à aquisição de transformadores monofásicos. De maneira ao comprometimento do custo com a qualidade de energia.

Reguladores de Tensão e Religadores Automáticos devem estar aptos a realizar aquisições de parâmetros elétricos numa taxa necessária a efetuar cálculo de harmônicas de ordem elevada, bem como possuir algoritmos de identificação destes conteúdos, para verificação destas informações e também para levá-las em consideração em sua tomada de decisão.

Estes equipamentos já estão sendo adquiridos pela Copel, sendo também que em suas especificações está se solicitando a realização de ensaios de recebimento com o objetivo de verificar se os equipamentos microprocessados possuem filtros para harmônicos e quais são os valores máximos toleráveis sem ocasionar falsas atuações do sistema de proteção.

Com a meta do governo nacional para universalização do atendimento de energia elétrica, estabelecendo prazos e respectivas multas, para o atendimento principalmente dos consumidores rurais mais distantes, muitas concessionárias que ainda não utilizam o sistema MRT, começam a iniciar estudos de viabilidade para implementação. E as concessionárias que já utilizam este sistema, apresentam uma tendência de grande expansão. Sendo assim, este trabalho pode servir como alerta, para a topologia e equipamentos a serem utilizados.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] DUGAN, Roger C. & McGRANAGHAN, Mark F. E. & BEATY, Wayne. *Electrical Power Systems Quality*. New York, Ed. MacGraw-Hill, 1996, p. 145.
- [2] CEPEL. *Seleção de Sistemas MRT –rer.05*.
- [3] DIAS, Guilherme A.D. *Harmônicas em Sistemas Industriais*, Porto Alegre, Ed. PUCRS, 2002, p.59.
- [4] ALDABO, Ricardo . *Qualidade na Energia Elétrica*, São Paulo, Ed Artliber, p. 69.
- [5] SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, INC. *SEL 351A*, Pullman, USA,2002.
- [6] WHIPP&BOURNE . *GVR Auto Recloser*, Rochdale, England, 1999.
- [7] OMORI, J; RUFATO, E. J. ; ORTEGA, M. R.,2005, *Estudo de Interligação entre os circuitos Palmeirinha e Turvo*, Curitiba, Copel.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Eloi Rufato Junior, nascido em 15 de dezembro de 1963

Mestrado (USP-POLI) (2006) em Sistemas Elétricos , graduado pela UTFPR (1989) em Engenharia Elétrica.

Empresa Companhia Paranaense de Energia desde 1989, no Departamento de Planejamento e Proteção

Professor da UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná desde 1989 – Proteção de Sistemas, Circuitos Elétricos, Medidas Elétricas.