



Universidade Federal de Campina Grande

Centro de Engenharia Elétrica e Informática

Coordenadoria do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

JORDANE GONÇALVES DOS SANTOS

**SENSORES DE CORRENTE ELÉTRICA NO CONTEXTO DAS
REDES INTELIGENTES (*SMART GRIDS*)**

Campina Grande, Paraíba
Setembro de 2014

JORDANE GONÇALVES DOS SANTOS

SENSORES DE CORRENTE ELÉTRICA NO CONTEXTO DAS
REDES INTELIGENTES (*SMART GRIDS*)

*Trabalho de conclusão de curso
submetido à Unidade
Acadêmica de Engenharia
Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do
grau de bacharel em Ciências
no Domínio da Engenharia
Elétrica*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos

Orientador:

Prof. Dr. Benedito Antonio Luciano

Campina Grande, Paraíba
Setembro de 2014

JORDANE GONÇALVES DOS SANTOS

SENSORES DE CORRENTE ELÉTRICA NO CONTEXTO DAS REDES INTELIGENTES (*SMART GRIDS*)

*Trabalho de conclusão de curso
submetido à Unidade
Acadêmica de Engenharia
Elétrica da Universidade
Federal de Campina Grande
como parte dos requisitos
necessários para a obtenção do
grau de bacharel em Ciências
no Domínio da Engenharia
Elétrica*

Área de Concentração: Sistemas Elétricos

Aprovado em / /

Prof. Dr. José Gutemberg de Assis Lira
Universidade Federal de Campina Grande
Avaliador

Prof. Dr. Benedito Antonio Luciano
Universidade Federal de Campina Grande
Orientador, UFCG

Aos meus pais José Vicente dos Santos e Rita Gonçalves dos Santos

Ao meu namorado José Arielio

Aos meus irmãos Jossandra, Jordean,

Madea, Célia, Jocélio e Ailton.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela oportunidade de poder concluir um curso superior, pela proteção, saúde e paz a mim concedidas.

À minha família, por todo amor, carinho e apoio durante essa jornada.

Ao meu namorado José Arielio, pela paciência, amor e apoio.

Aos meus colegas, que sempre compartilharam seus conhecimentos comigo, contribuindo dessa forma, para eu me tornar uma profissional melhor.

À todas as meninas que moraram comigo durante o curso, pela amizade e pelos momentos engraçados que vivemos.

Às minhas amigas Laura Eduarda, Andréia e Polyana Brandão pela amizade sincera e pelas palavras de conforto nos momentos difíceis.

Ao meu orientador professor Benedito, pela paciência, atenção, pelos ensinamentos e por acreditar na minha capacidade.

À Coordenadoria do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da UFCG, por ter sempre procurado o melhor para os alunos e por ter nos tratado com carinho e respeito.

Tudo o que um sonho precisa para ser
realizado é alguém que acredite
que ele possa ser realizado.

Roberto Shinyashik

RESUMO

As redes inteligentes surgem como uma inovação para as antigas redes elétricas existentes. Tal inovação traz consigo diversos benefícios para as empresas do setor elétrico, para os consumidores e para todas as empresas que criam e fabricam as tecnologias inteligentes. Neste trabalho é apresentada uma abordagem sobre as redes inteligentes, destacando os benefícios advindos dela, as principais tecnologias que precisam ser inseridas nas redes elétricas tradicionais para torná-las inteligentes, além de mostrar a implantação dessa tecnologia no Brasil e no mundo. A ênfase desse trabalho são os sensores de corrente elétrica inteligentes. Neste particular, são apresentados alguns tipos desses sensores, seus princípios de funcionamento, os materiais mais adequados utilizados em sua construção, como as ligas amorfas e as ligas nanocristalinas, e suas aplicações no sistema elétrico. Antes são mostradas as principais diferenças entre sensores de corrente convencionais e sensores inteligentes utilizados em sistemas elétricos.

Palavras-chave: Ligas amorfas, Ligas nanocristalinas, Redes inteligentes, Sensores de corrente elétrica inteligentes.

ABSTRACT

Smart grids emerge as an innovation for the old existing electrical networks. This innovation brings many benefits to electric utilities, consumers and all businesses that create and manufacture the intelligent technologies. In this paper is presented an approach for smart grids, highlighting the benefits arising from it, the key technologies that need to be inserted in traditional electrical networks to make them smart, besides showing the deployment of this technology in Brazil and in the world. The emphasis of this work are the electrical current intelligent sensors. In this particular, are presented some types of these sensors, their operating principles, the most suitable materials used in its construction, such as amorphous alloys and nanocrystalline alloys and their applications in the electrical system. Prior are shown the main differences between conventional current sensors and smart sensors used in electrical systems.

Keywords: amorphous alloys, electrical current intelligent sensors, nanocrystalline alloys, smart grids.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Localização dos sensores no processo	2
Figura 2. Sistema de potência atual.....	4
Figura 3. Sistema de potência futuro – <i>Smart Grid</i>	4
Figura 4. Principais motivações para o implante das redes inteligentes	9
Figura 5. Evolução esperada do parque de medição em alguns países na Europa.....	11
Figura 6. Escopo do projeto Cidade Inteligente de Búzios	13
Figura 7. Características das ligas Fe-Ni, Fe-Si GNO e Fe-Si GO	17
Figura 8. Curvas típicas de saturação para TCs de medição e de proteção	18
Figura 9. TC do tipo enrolado	19
Figura 10. TC do tipo barra	19
Figura 11. TC do tipo janela	19
Figura 12. TC do tipo bucha	20
Figura 13. TC de núcleo dividido	20
Figura 14. TC de vários enrolamentos primários.....	21
Figura 15. TC de vários núcleos	21
Figura 16. Efeito Magnetorresistivo da liga Permalloy	22
Figura 17. Medição de corrente por meio de um sensor MR.....	23
Figura 18. Bobina de Rogowsky	24
Figura 19. Circuito Integrador conectado à bobina de Rogowsky	25
Figura 20. Bobinas de Rogowsky com núcleo de policarbonato à esquerda e à direita, com núcleo de nylon maciço.....	26
Figura 21. Esquemático de um sensor de efeito Hall.....	26
Figura 22. Medidor eletromecânico com registrador tipo ponteiro.....	28
Figura 23. Medidor eletromecânico monofásico com registrador ciclométrico.....	28
Figura 24. Estrutura interna de um medidor monofásico de indução	29
Figura 25. Esquema do sistema de monitoramento de corrente de fuga em para-raios de ZnO.....	32
Figura 26. Diagrama esquemático do sensor de corrente de fuga utilizado em para-raios de ZnO.....	33
Figura 27. Medidor inteligente	35
Figura 28. Diagramas em blocos das partes que compõem os medidores eletrônicos convencionais e inteligentes.....	35

LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Diferenças entre o sistema de potência convencional e o com rede inteligentes	5
Quadro 2. <i>Smart Grid</i> no mundo	10

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AMM – *Automated Meter Management*

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica

Celpe – Companhia Energética de Pernambuco

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

Coelce/Endesa – Companhia de Energética do Ceará (CE)

Copel – Companhia Paranaense de Energia

D – Distribuição

DIC – Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão

DMIC – Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão

DRC – Duração Relativa da Transgressão para Tensão Crítica

DRP – Duração Relativa da Transgressão para Tensão Precária

EPRI – *Electric Power Research Institute*

ERGEG – Grupo de Reguladores Europeus de Eletricidade e Gás

FIC – Frequência de Interrupção individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão

GNO – Grãos não orientados

GO – Grãos orientados

Inmetro – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

LED – *Light Emitting Diode*

NIST – National Institute of Standards and Technology

PLC – *Power Line Communications*

T – Transmissão

TC – Transformador de corrente

UTM – Unidade Terminal Mestre

UTR – Unidade Terminal Remota

SUMÁRIO

Resumo	VII
Abstract	VIII
Lista de Ilustrações	IX
Lista de Quadros	X
Lista de Siglas e Abreviaturas	XI
Sumário	XII
1 Introdução	1
2 Sensores	2
3 Redes Inteligentes	3
3.1 Principais Tecnologias Utilizadas.....	6
3.2 Redes Inteligentes no Brasil E no Mundo.....	8
3.2.1 Redes Inteligentes no Mundo.....	10
3.2.2 Redes Inteligentes no Brasil.....	12
4 Sensores de Corrente Elétrica	15
4.1 Sensores de Corrente Convencionais.....	16
4.1.1 Transformador de Corrente.....	16
4.1.1.1 Tipos Construtivos dos TCs.....	18
4.1.2 Sensor Magnetorresistivo.....	22
4.1.3 Sensores de Corrente Elétrica com Bobinas de Rogowsky.....	23
4.1.4 O Sensor de Efeito Hall.....	26
4.1.5 O Medidor de Energia Eletromecânico.....	27
4.1.5.1 Princípio de Funcionamento.....	29
4.2 Sensores De Corrente Inteligentes.....	30
4.2.1 Sensor de Corrente de Fuga em Para-Raios.....	31
4.2.2 O Medidor de Energia Inteligente.....	34
5 Conclusões	38
Referências	40

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, ainda existem muitos problemas na forma de gerenciar o fornecimento de energia elétrica por parte das concessionárias de energia elétrica. A maioria dessas empresas ainda utilizam tecnologias tradicionais em medidores eletromecânicos, transformadores, motores e sensores de corrente.

Muitos desses equipamentos podem contribuir com o aumento das perdas técnicas nos sistemas de transmissão e distribuição, por serem fabricados com materiais magnéticos que apresentam valores elevados de perdas ativas. Além disso, há uma grande preocupação por parte das concessionárias em solucionar o problema dos furtos de energia elétrica que são comuns em locais onde os leituristas muitas vezes não conseguem ter acesso ao medidor de energia. Nesses casos, as empresas concessionárias acabam tendo sérios prejuízos financeiros por causa dessa energia utilizada e não faturada.

Para solucionar esses problemas surge o conceito de redes inteligentes, que nada mais é do que a inclusão de tecnologias modernas nas redes elétricas tradicionais, como os medidores inteligentes, os sensores de corrente elétrica inteligentes, o sistema SCADA para automatizar as subestações, o sistema integrado de comunicação, a geração distribuída com a inclusão da geração por fontes renováveis, entre outros.

Os sensores de corrente inteligentes permitem a detecção e a correção dos distúrbios em tempo real, como os curtos-circuitos e as sobrecorrentes, protegendo assim os diversos equipamentos conectados à rede, dando uma maior confiabilidade ao sistema.

Objetivando sistematizar o tema abordado neste Trabalho de Conclusão de Curso, o texto foi organizado em cinco capítulos. No Capítulo 1 é apresentada esta Introdução. No Capítulo 2 apresenta-se o sensor de uma forma geral, seu conceito e aplicabilidades nos diversos sistemas, a sua localização no processo e introduz o conceito de sensor inteligente. No Capítulo 3 são apresentados vários conceitos de redes inteligentes, a diferença entre o sistema elétrico atual e o sistema com redes inteligentes, apresenta também as principais tecnologias utilizadas nas redes inteligentes e seus benefícios para os consumidores e empresas envolvidas. Além disso, aborda-se a evolução da implantação das redes inteligentes no Brasil e no mundo. No Capítulo 4 são apresentadas as diferenças entre os sensores

convencionais de corrente elétrica e os sensores inteligentes, particularmente no que diz respeito aos materiais empregados, seus princípios de funcionamento e principais aplicações. Ainda no Capítulo 4 é apresentada a análise comparativa de desempenho entre os medidores de energia eletromecânicos e os medidores inteligentes. Por fim, no Capítulo 5 é apresentada a conclusão sobre o trabalho desenvolvido.

2 SENSORES

Em diversos sistemas, tais como sistemas industriais, elétricos, químicos entre outros, se faz necessário o uso de dispositivos para fazer a medição de variáveis físicas como temperatura, luminosidade, posição, pressão e corrente. Tais medições são necessárias para que o sistema de controle possa atuar corretamente. Esses dispositivos sensíveis a alguma forma de energia são denominados sensores.

Existem diversos tipos de sensores, analógicos ou digitais, para várias aplicações eletroeletrônicas. Tais sensores tem a função de medir a variável física e enviar o sinal elétrico de saída ao circuito elétrico de controle, conforme apresentado no diagrama de blocos na Figura 1.

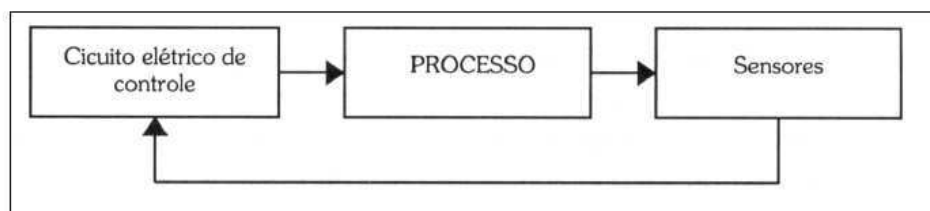


Figura 1. Localização dos sensores no processo [1].

Com o avanço tecnológico, surgiram os sensores inteligentes, que segundo SANTOS [2], são dispositivos que se diferenciam dos sensores comuns por apresentarem capacidade de processamento sobre os dados monitorados e são tipicamente compostos por uma fonte de alimentação, transdutores (sensores e atuadores), memória, processador e transceptor.

A aplicação dos sensores inteligentes no sistema elétrico permite o compartilhamento de informações e recursos de um sistema, a supervisão de um processo completo, além de acesso e monitoramento remoto das variáveis envolvidas [3].

Neste trabalho são abordados os sensores de corrente inteligentes, considerados como uma tecnologia moderna que pode ser aplicada nas redes elétricas inteligentes, ou *Smart Grids* como também são conhecidas.

3 REDES INTELIGENTES

As Redes Inteligentes ou *Smart Grids* podem ser consideradas como uma inovação no setor elétrico. Na prática, trata-se de uma reestruturação nas redes elétricas já existentes, com a inserção dos dispositivos inteligentes, fontes de energia renováveis e tecnologia da informação e comunicação, que trará melhorias tanto para o consumidor quanto para as empresas de energia, provedores de tecnologia e serviço e para o meio ambiente. De acordo com a CHAMADA N° 011/2010 da ANEEL, a “nova” rede será mais eficiente e segura, adaptativa, interativa, capaz de gerar novas oportunidades de negócios, operada com foco na qualidade e de menor impacto ambiental [4].

Redes inteligentes envolvem basicamente o uso intensivo de tecnologias de informação (TI), automação (A) e comunicações (C) para monitoramento e controle da rede elétrica, o que permitirá gerenciar a rede de maneira mais eficiente, tornando o sistema mais confiável e seguro [5].

De acordo com o EPRI, o termo *Smart Grid* pode ser definido como “a sobreposição de um sistema unificado de comunicações e controle sobre a infraestrutura existente de fornecimento de energia que prover as informações corretas à entidade correta (dispositivos de uso final, sistemas de controle T & D e clientes), no momento certo para tomar as decisões corretas. É um sistema que otimiza as fontes de energia e a distribuição, minimiza as perdas, se autorrecupera e permite aplicações de última geração para a eficiência energética e de resposta à demanda”[6].

As Redes Inteligentes surgiram da necessidade de reestruturação dos sistemas elétricos mundiais, visto que muitos existem há mais de 50 anos, logo os riscos associados ao uso destes são crescentes. Além disso, há uma preocupação em reduzir os impactos ambientais causados pelas fontes de geração não renováveis, como as termelétricas, como também os impactos causados pela construção de novas usinas hidrelétricas para suprir o aumento da carga. Para evitar a construção dessas gerações que impactam a natureza são utilizadas as

fontes renováveis, dentre elas: eólica, solar e biomassa. Essas fontes são interligadas formando a geração distribuída, que permite ao consumidor gerar energia em sua própria casa tanto para consumo local quanto para venda do excedente à rede.

Nas Figuras 2 e 3 são apresentadas as diferenças entre o sistema elétrico atual e o sistema elétrico futuro com redes inteligentes.

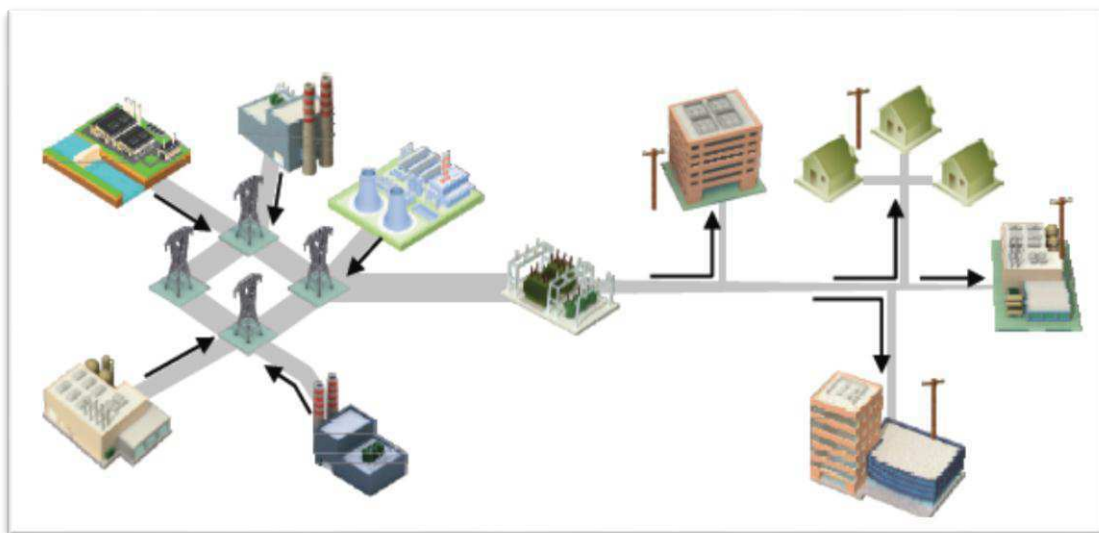


Figura 2. Sistema de potência atual [7].



Figura 3. Sistema de potência futuro – *Smart Grid* [7].

De acordo com a Figura 2, o modelo atual ou clássico do sistema de potência é caracterizado pela geração centralizada e um fluxo de energia elétrica unidirecional, que parte da fonte para a carga. Já no modelo futuro, apresentado na Figura 3, a geração será descentralizada, o fluxo de energia bidirecional e haverá a introdução de novos consumidores

na rede, os veículos elétricos recarregáveis ou híbridos, que serão abastecidos através de terminais instalados em estacionamentos, *shopping centers*, supermercados e nas garagens dos clientes. Pode-se antever no modelo futuro a inclusão dos sistemas de comunicações, onde os cadeados representam a segurança que os mesmos devem ter com os dados que trafegam por eles, permitindo assim, a comunicação entre os equipamentos das redes, como também mantendo os consumidores informados sobre o consumo, tarifas etc.

No Quadro 1 são listadas as principais diferenças entre o sistema de potência convencional (atual) e o sistema de potência com redes inteligentes.

Quadro 1. Diferenças entre o sistema de potência convencional e o com redes inteligentes [8].

Rede Convencional	Smart Grid
Medição eletromecânica	Medição eletrônica AMM
Comunicação Unidirecional	Comunicação bidirecional
Apuração precária dos indicadores de qualidade	Apuração automatizada e dados confiáveis
Poucos mecanismos de competição	Mercado de energia liberado
Poucas opções ao consumidor	Tarifas horo-sazonais
Informação limitada sobre preços	Informação completa (inclusive horária)
Informações escassas	Sistemas de informações geoprocessadas Informação em tempo real
Geração centralizada de grande porte	Geração distribuída
Monitoramento não automatizado	Auto-monitoramento
Restauração manual ou semi-automática	Restauração automática
Propensão a falhas e blecautes	Proteção adaptativa Ilhamento
Decisões emergenciais realizadas de forma lenta	Sistemas de apoio à decisão Confiabilidade preditiva
Limitado controle sobre fluxos de potência	Sistemas avançados de controle Fluxo de potência ótimo
Necessidade de grande número de equipes	Corte e religamento à distância Faturamento remoto

3.1 PRINCIPAIS TECNOLOGIAS UTILIZADAS

As tecnologias aplicadas nas redes inteligentes já se encontram disponíveis no mercado. Essas tecnologias podem ser aplicadas de forma inteligente como cita CAIRES [9]: “a base do que se conhece por rede inteligente não é necessariamente algo novo, como alguns poderiam supor, mas sim a aplicação inteligente de vários componentes e sistemas já existentes, visando à automação e o controle remoto da distribuição”.

As principais tecnologias que podem ser aplicadas às redes inteligentes são:

- Medidores inteligentes: esses equipamentos digitais estão substituindo os medidores eletromecânicos por possuírem mais funcionalidades, como o corte e religamento remotos, comunicação e medição do consumo de energia em tempo real, recepção e transmissão de dados através de protocolos de comunicação, mensuração da energia injetada na rede pelo *prosumer* (consumidor e produtor de energia), entre outras. Os benefícios gerados pelos *smart meters* são:
 - I. Redução das perdas não técnicas, como furtos e ligações clandestinas, já que os medidores digitais são mais difíceis de serem burlados, como também redução das perdas técnicas;
 - II. Redução de custos por parte da concessionária com cortes, religamentos e leituras presenciais;
 - III. Permite ao cliente visualizar o consumo de energia em tempo real em sua unidade local ou através de um portal na internet;
 - IV. Tarifas horo-sazonais: devido à interface com o consumidor, a concessionária passa a cobrar tarifas mais baratas para os clientes que consumirem menos em horário de ponta de carga.
- Sensores inteligentes: captam informações da rede elétrica, como a ocorrência de distúrbios, em tempo real. O funcionamento dos sensores inteligentes em rede através de interfaces padronizadas torna possível o compartilhamento de informações e recursos de um sistema, a supervisão de um processo como todo, além de acesso e monitoramento remoto das variáveis envolvidas [10].
- Sistema integrado de comunicação: a solução para transmissão de dados nas redes inteligentes pode adotar simultaneamente diferentes tecnologias. Do ponto de vista do meio pelo qual trafega a informação, há soluções cabeadas (fibra

óptica, cabo coaxial ou cabos metálicos), como a PLC que usa a própria rede elétrica para transmitir as informações, ou sem fio (redes de celulares, radiofrequência– WiMax, ZigBee, Bluetooth, entre outros) [11]. Além disso, deve-se garantir a interoperabilidade entre os sistemas, ou seja, a comunicação transparente entre os sistemas. Dessa forma, se faz necessário que os diversos fornecedores de equipamentos e empresas de distribuição de energia elétrica adotem padrões compatíveis ou um padrão aberto.

- Sistema SCADA: essa sigla vem do inglês *Supervisory Control And Data Acquisition*, que significa sistema de aquisição de dados e controle supervisão. Trata-se de um sistema que faz a aquisição dos dados em campo, os supervisiona e permite ao operador controlar ou decidir com base nessa informação [9]. Também pode ser entendido como um sistema automático, que permite a coleta dos dados mensurados pelos sensores inteligentes espalhados pela rede através das UTR e, envio dessas informações à UTM, que é um computador que as processa, descobre o tipo de problema e se necessário, executa comandos remotamente para correção do problema. O sistema SCADA é um dos responsáveis pela automação de subestações.
- Dispositivos de armazenamentos de energia: A energia pode ser armazenada em baterias em um período em que a tarifa seja mais barata, como durante as madrugadas e pode ser utilizada para suprir parte das cargas das residências em períodos em que não haja geração nas fontes renováveis, como em dias com ausência de ventos (eólica) ou de sol (fotovoltaica).
- Iluminação pública eficiente: as luminárias convencionais estão sendo substituídas por luminárias a LED, que se enquadram como tecnologia sustentável. MARCILI [12] expõe que enquanto a lâmpada de vapor metálico tende a queimar após 12 mil horas de funcionamento, as luminárias a LED têm duração média de 50 mil horas. Além disso, esse sistema consome menos energia, emite menos calor e tem melhor aproveitamento do fluxo luminoso.
- Geração distribuída: trata-se da integração das fontes renováveis à rede. Em abril de 2012, entrou em vigor a Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, cujo propósito foi permitir que o consumidor gerasse sua própria energia utilizando as fontes de energia renováveis e pudesse fornecer o excedente como empréstimo gratuito à rede elétrica [13]. Para um melhor entendimento, tem-se

como exemplo “a microgeração por fonte solar fotovoltaica: de dia, a “sobra” da energia gerada pela central é passada para a rede; à noite, a rede devolve a energia para a unidade consumidora e supre necessidades adicionais. Portanto, a rede funciona como uma bateria, armazenando o excedente até o momento em que a unidade consumidora necessite de energia proveniente da distribuidora” [14].

- Veículos elétricos: já existem modelos comercializáveis desde 2011. Contribuem para a redução da emissão de CO₂ na atmosfera se recarregados por fontes renováveis.

3.2 REDES INTELIGENTES NO BRASIL E NO MUNDO

Muitos países estão modificando a estrutura de suas redes elétricas, transformando-as em redes inteligentes. Porém, o ritmo de reestruturação das redes elétricas mundiais ainda é lento, visto que esse é um processo bastante complexo que envolve a inserção de tecnologias bastante avançadas e de alto custo.

Os investimentos em infraestruturas necessários para implantação das redes inteligentes são altos, principalmente em inteligência e telecomunicações, mesmo assim, resultam em benefícios tangíveis e intangíveis em toda a cadeia de energia elétrica, atingindo a todas as partes interessadas envolvidas [15].

Além dos problemas econômicos e tecnológicos, existem os de cunho regulatório. Conforme Ferreira [16]: “o regulador terá que auxiliar as companhias a identificar e priorizar uma solução específica das *Smart Grids* que irá viabilizar o uso mais eficiente da rede e que vá ao encontro das necessidades dos consumidores”.

A implantação das redes inteligentes em alguns países tem motivações parecidas, mas não iguais. Na Figura 4 são apresentadas as principais motivações que levaram os Estados Unidos, Europa e Japão a iniciarem a reestruturação de suas redes elétricas.



Figura 4. Principais motivações para a adoção das redes inteligentes [17].

No Brasil, de acordo com Kagan [17], as principais motivações para a inserção da tecnologia inteligente nas redes elétricas são:

- Redução de perdas não-técnicas;
- Redução de custos operacionais;
- Aumento da confiabilidade do sistema;
- Aproveitamento da capilaridade do sistema, com a inclusão de novos serviços.

3.2.1 REDES INTELIGENTES NO MUNDO

No quadro 2 é apresentada a situação de alguns países no tocante à implantação das redes inteligentes.

Quadro 2. *Smart Grids* no mundo [18].

Países	Ações tomadas
Canadá	Governo do Estado de Ontário obriga a instalação de medidores eletrônicos em todas as empresas e casas.
Estados Unidos	Programa de investimento de 4,5 bilhões de dólares em infraestrutura de <i>Smart Grid</i> .
Europa	Alcançar a meta de 20% de geração renovável até 2020 e planos pilotos de <i>Smart Grid</i> na Itália, Espanha e Portugal.
Austrália	Investimento de US\$100M em 2010 para uma Iniciativa Nacional de Eficiência Energética, para <i>Smart Grid</i> e Cidade Inteligente.
Japão	<i>Smart Community</i> – esforços para aumentar a eficiência energética, difusão de painéis fotovoltaicos e veículos elétricos e criação de novo modelo de infraestrutura.

A União Europeia tem diversos objetivos em se tratando de energia para o ano de 2020. Tais objetivos que estão explicitados no Plano Europeu 20-20-20, que trata de eficiência energética e mudança climática, são os seguintes:

- Aumentar o fornecimento de energia renovável para 20% da demanda total;
- Reduzir o consumo de energia em 20%;
- Diminuir em 20% as emissões de gases de efeito estufa em relação aos níveis de 1990 [19].

Conforme a Comissão Europeia, em 2011 já havia sido catalogados 219 projetos relacionados às redes inteligentes na Europa, sendo que a maioria deles domina o desenvolvimento de infraestrutura e de serviços avançados em medição inteligente [20].

No ano de 2007, o ERGEG elaborou um documento no qual é apresentada a situação dos medidores eletrônicos com sistemas de telemedição instalados até 2006 e faz a previsão usando informações coletadas em 2006, de implantação destes em diversos países europeus, conforme ilustrado na Figura 5.

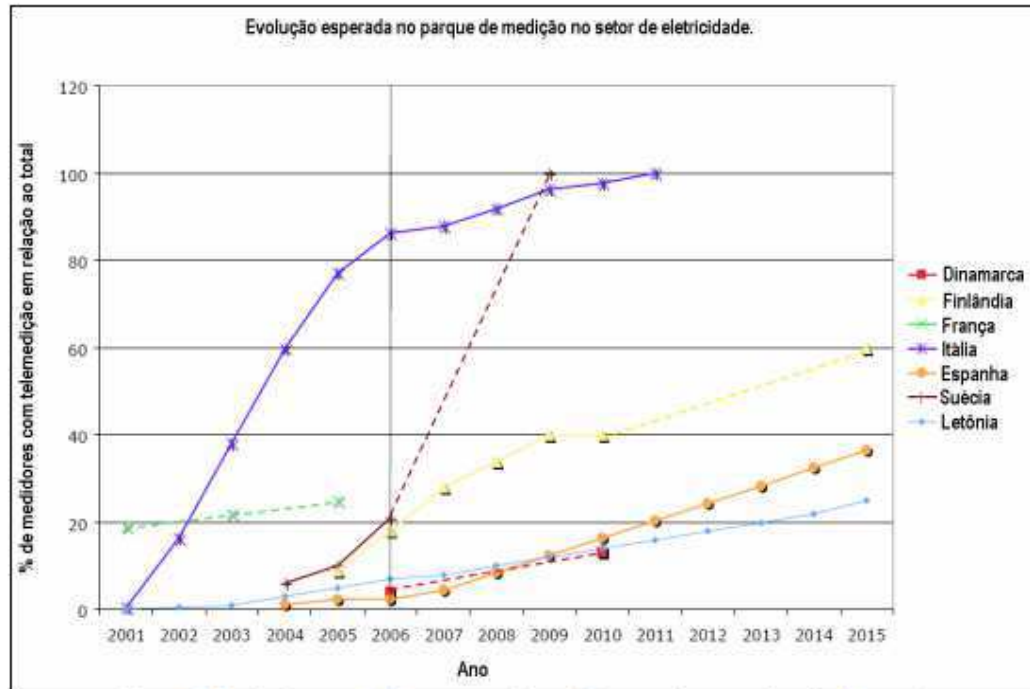


Figura 5. Evolução esperada do parque de medição em alguns países na Europa

[ERGEG, 2007].

Como apresentado na Figura 5, a tendência da maioria dos países europeus é fazer a implantação em larga escala da tecnologia dos medidores inteligentes (AMM). Porém, até 2008 apenas cinco países europeus possuíam regulamentação determinando o prazo de substituição: Espanha (2018), Estônia (substituição parcial até 2010), Itália (2011), Portugal (2015) e Suécia (2009) [21].

Nos Estados Unidos, o presidente Barack Obama teve a iniciativa de investir 3,4 bilhões de dólares em redes inteligentes no ano de 2009. Segundo análise feita pelo EPRI, a implementação das redes inteligentes nesse país reduzirá em 4% o consumo de energia elétrica até 2030, o que pode acarretar em economias para os clientes da ordem de 20,4 bilhões de dólares. Nesse mesmo ano, o departamento de comércio americano escolheu o NIST para conduzir o desenvolvimento do modelo americano de redes inteligentes [22].

3.2.2 REDES INTELIGENTES NO BRASIL

Em abril de 2013, o Governo Brasileiro lançou o programa INOVA ENERGIA, cujo objetivo é estimular o desenvolvimento tecnológico e promover a cooperação na área de tecnologia de energia. Entre as linhas temáticas do programa destacam-se as Redes Elétricas Inteligentes, Geração de Energia por meio de Fontes Renováveis e Veículos Híbridos e Eficiência Energética Veicular [23].

Outro avanço no que concerne à implantação das Redes Inteligentes no país é a troca periódica e sistemática de informações e experiências com profissionais de outras regiões do mundo, através do Fórum Latino Americano de *Smart Grid* criado em 2008, cujo objetivo é avaliar os impactos sociais gerados pelas tecnologias inteligentes.

No Brasil, a inserção das tecnologias inteligentes nas redes elétricas, já começou a sair do papel. Desde fevereiro do corrente ano que as concessionárias já disponibilizam medidores inteligentes aprovados pelo Inmetro para os clientes que desejarem substituir o medidor eletromecânico.

A AES Eletropaulo, distribuidora de energia elétrica, está investindo mais de R\$ 70 milhões em redes inteligentes na cidade de Barueri (SP), cujo projeto contemplará 60 mil clientes e tem previsão de término para 2015 [24].

A CEMIG já testa a eficiência de 5.025 medidores inteligentes em Sete Lagoas (MG) e instalará cerca de 3 mil até agosto e a Light, que atua na capital do Rio, já dispõe de 420 mil clientes com medidor inteligente com previsão de 2 milhões de consumidores em dez anos [25].

Na cidade de Búzios (RJ), teve início em novembro de 2011 o projeto piloto Cidade Inteligentes de Búzios, cujo orçamento é igual a R\$ 40 milhões e previsão de término para novembro de 2014. Esse projeto tem como objetivo a análise operacional, da infraestrutura, dos custos e avaliação de impactos econômicos, socioambientais e de qualidade de serviço [26].

Na Figura 6 é apresentado o escopo do projeto piloto de Búzios.



Figura 6. Escopo do projeto Cidade Inteligente de Búzios [26].

Em junho de 2011, a Eletrobrás Amazonas Energia lançou o Projeto Parintins, cujo objetivo é transformar a ilha de Parintins (AM) numa cidade inteligente. Essa empresa citada está investindo mais de R\$ 23 milhões com a implantação de várias tecnologias inteligentes, como sensores para identificar faltas nas redes de distribuição e falhas nos transformadores, medidores inteligentes e sistemas fotovoltaicos nas residências. As informações adquiridas pelos equipamentos inteligentes são enviadas para a Central de Controle em Manaus, que corrigirá os problemas detectados remotamente [27].

Na cidade de Aparecida (SP), foi lançado em 2011 o projeto *InovCity* Aparecida pela EDP Bandeirante, distribuidora de energia elétrica. Tal empresa está investindo inicialmente cerca de 10,7 milhões de reais no referido projeto, que tem como objetivo garantir iluminação pública eficiente, instalação de postos de recarga de baterias de veículos elétricos, instalação de medidores inteligentes e geração distribuída [28].

Esse projeto prevê a instalação de 1200 medidores monofásicos, 11600 bifásicos, 650 trifásicos e 485 trifásicos de medição indireta nos secundários dos transformadores de distribuição, “interligados por uma rede de radiofrequência utilizando a tecnologia ZigBee, em topologia MESH, associados a coordenadores de rede para interconexão entre as redes privadas a serem criadas e as redes de WIMAX já implantadas” [28].

A EDP Distribuição lançou no mês de junho do ano corrente o projeto *Inovcity*, cuja meta é a implantação das redes inteligentes nas cidades de Domingos Martins e Marechal Floriano (ES). Tal projeto conta com um investimento de R\$ 5 milhões e prevê a inserção de diversas tecnologias nas redes elétricas “que permitirão uma maior eficiência e qualidade na prestação de serviços ao cliente, como medição inteligente, iluminação pública eficiente, microgeração com fontes renováveis de energia, mobilidade elétrica e ações de eficiência energética” [29].

Além dos projetos pilotos citados, existem também os projetos Cidade Inteligente Aquiraz em Fortaleza (CE) da Coelce/Endesa, Paraná *Smart Grid* em Curitiba (PR) da Copel, Arquipélago de Fernando de Noronha (PE) da Celpe, entre outros.

4 SENSORES DE CORRENTE ELÉTRICA

Os sensores de corrente elétrica são dispositivos utilizados para medir indiretamente a corrente elétrica que circula em um condutor. O núcleo desses sensores pode ser construído com material magnético, dielétrico ou até mesmo semicondutor. Atualmente, a busca por um material que apresente melhor desempenho para esses sensores tem sido alvo de vários estudos.

O princípio de funcionamento dos sensores de corrente é baseado em duas leis importantes do eletromagnetismo: a Lei de Ampère e a Lei de Faraday [30].

De acordo com a Lei de Faraday, se uma bobina de N espiras estiver em uma região de fluxo magnético variável no tempo, a tensão induzida nos terminais dessa bobina V_b será dada pela seguinte expressão:

$$V_b = N \frac{d\phi}{dt} , \quad (1)$$

na qual $d\phi/dt$ é a taxa de variação temporal do fluxo que atravessa a bobina [31].

O fluxo magnético é diretamente proporcional à área da seção magnética do núcleo (A), que geralmente é toroidal para essa aplicação, e à indução magnética (B).

$$\phi = B \cdot A \quad , \quad (2)$$

Sendo o campo magnético H originado pela corrente elétrica e o meio ferromagnético considerado como isotrópico, a indução magnética pode ser determinada a partir das equações de Maxwell, sob forma local, em regime quase estático, e da relação constitutiva:

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{J} \quad (\text{Lei de Ampère}), \quad (3)$$

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (\text{Lei da conservação do fluxo}), \quad (4)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{Relação constitutiva}), \quad (5)$$

onde J é a densidade de corrente elétrica, B é a indução magnética, H é a intensidade de campo magnético e μ é a permeabilidade magnética do meio.

Os sensores de corrente elétrica, quanto ao uso, podem ser classificados em sensores de corrente convencionais e sensores de corrente inteligentes. A diferença entre eles é que nos sensores inteligentes são utilizados materiais que produzem baixas perdas por histerese ou corrente de Foucault no núcleo além de possuírem menores erros de medição, como também podem ser integrados ao circuito, amplificadores, condicionadores de sinais, sistemas de transmissão *wireless* (via RF, ZigBee, Bluetooth, entre outros), para garantir um melhor desempenho do sensor.

4.1 SENSORES DE CORRENTE CONVENCIONAIS

4.1.1 TRANSFORMADOR DE CORRENTE

Atualmente, os sensores de corrente mais utilizados nas redes elétricas são os transformadores de corrente. Esses equipamentos reduzem a corrente do sistema de potência a um nível adequado aos instrumentos de medição. Além disso, suprem os relés de proteção e dispositivos de controle que são instalados no secundário, com uma corrente proporcional à que circula em seu primário e suficientemente reduzida, segundo uma relação de transformação [32].

De acordo com a NBR 6856/1992, os TCs são classificados em dois tipos: TCs para serviço de medição e TCs para serviço de proteção. Essa norma ainda estabelece que o valor da corrente secundária nominal deve ser igual a 5A. Também podem ser utilizadas correntes secundárias nominais iguais a 1 A e 2 A, para que as perdas por fiação no secundário sejam reduzidas.

Basicamente, um transformador de corrente é formado por um núcleo de formato toroidal “constituído por uma fita de liga ferro-silício (3,2% Si) de grãos orientados helicoidalmente enrolada”. O enrolamento primário é composto por uma ou mais espiras que são ligadas em série ao sistema de potência e o enrolamento secundário é composto por várias espiras e alimenta um instrumento, como medidor ou relé de proteção [33].

O material utilizado no núcleo de um TC deve possuir alta permeabilidade, baixas perdas magnéticas e elevada indução magnética no ponto de saturação, requisitos esses que na

prática não ocorre simultaneamente nas ligas convencionais [33]. Na Figura 7 são apresentadas as características magnéticas das ligas ferro-níquel, ferro-silício de grãos orientados (GO) e de grãos não orientados (GNO).

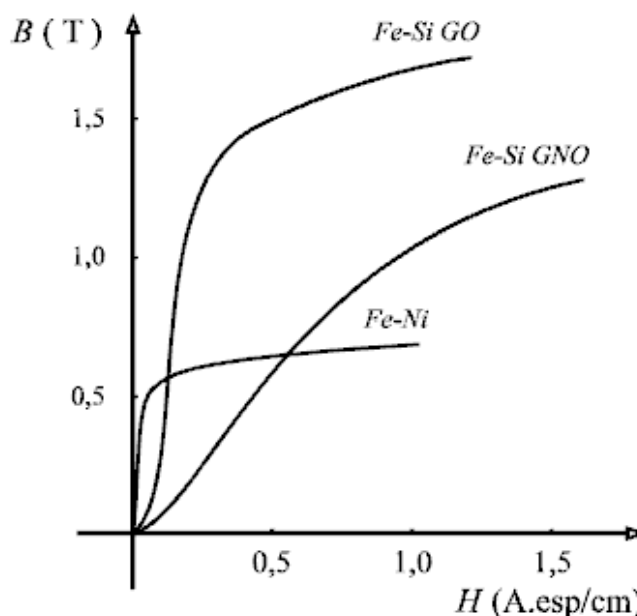


Figura 7. Características das ligas Fe-Ni, Fe-Si GNO e Fe-Si GO [33].

As ligas Fe-Ni (80% Ni), embora apresentem baixo valor de indução no ponto de saturação (0,4 a 0,5T) como se pode ver na Figura 7, são adequadas à construção de TCs de medição de elevada precisão, por possuírem alta permeabilidade e baixas perdas.

As ligas Fe-Si (3,2% Si) do tipo GNO, embora apresentem indução de saturação numa faixa de 0,8 a 1 T, não são adequadas para a construção dos TCs, tendo em vista que apresentam altas perdas e baixa permeabilidade magnética.

As ligas ferro-silício do tipo GO são mais utilizadas em TCs de proteção, por possuírem perdas e permeabilidade adequadas, quando laminadas a frio, além de elevada indução de saturação, na faixa de 1,2 T a 1,7 T. Os TCs de proteção projetados com tais ligas trabalham com indução de pico abaixo de 0,1 T, para que possam operar sem que ocorra saturação numa ampla faixa de corrente primária nominal, aproximadamente 20 vezes essa corrente, conforme apresentado na curva de saturação da Figura 8.

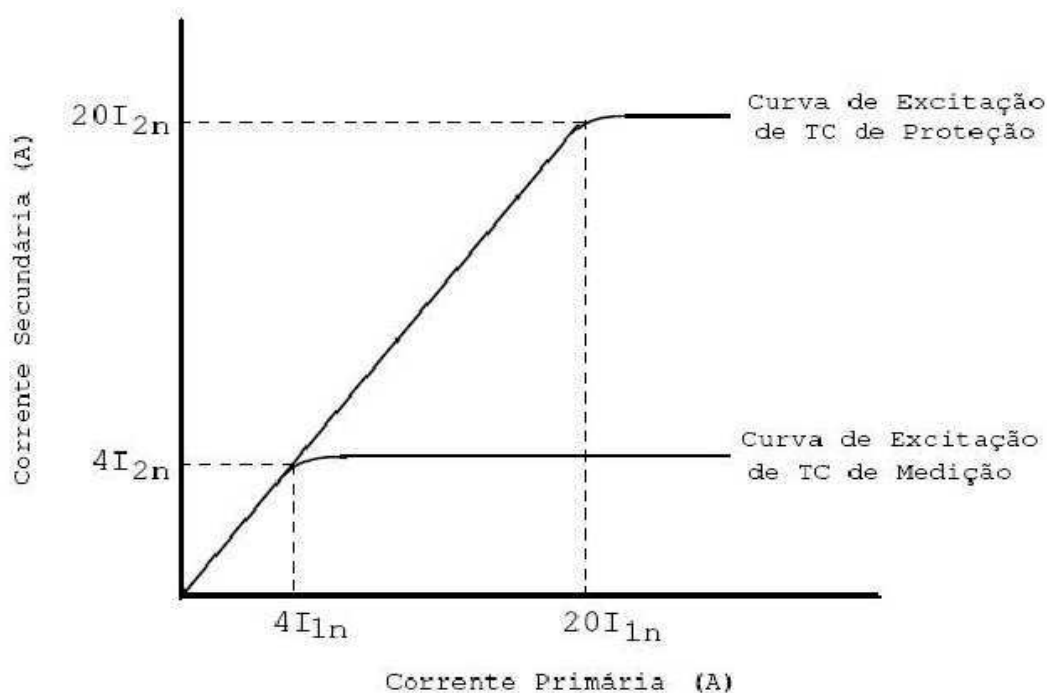


Figura 8. Curvas típicas de saturação para TCs de medição e de proteção [34].

Com base na Figura 8, é possível concluir que os TCs de medição saturam se a corrente primária nominal atingir quatro vezes o seu valor nominal. Devido a essa incompatibilidade dos valores de corrente primária que estes equipamentos suportam sem que entrem em saturação, os TCs de medição só podem ser aplicados para medição e nunca para proteção, e vice-versa. Essa larga faixa de corrente primária é requerida no TC de proteção já que ele é utilizado para detecção de curto-circuito, onde geralmente as correntes são elevadíssimas.

4.1.1.1 TIPOS CONSTRUTIVOS DOS TCs

De acordo com [32] e [35], existem TCs de vários tipos:

- a) Tipo enrolado: o enrolamento primário é formado por uma ou mais espiras que envolvem mecanicamente o núcleo do transformador, conforme mostrado na Figura 9.

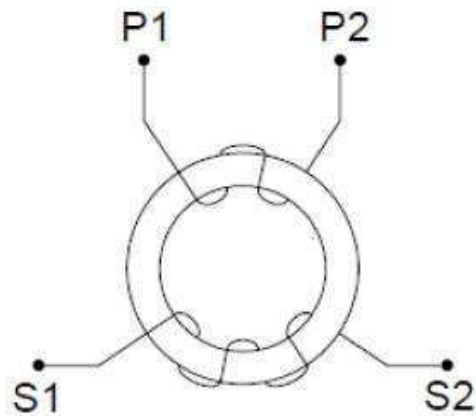


Figura 9. TC do tipo enrolado [36].

- b) Tipo barra: possui enrolamento primário constituído por uma barra, montada permanentemente através do seu próprio núcleo, conforme a Figura 10.

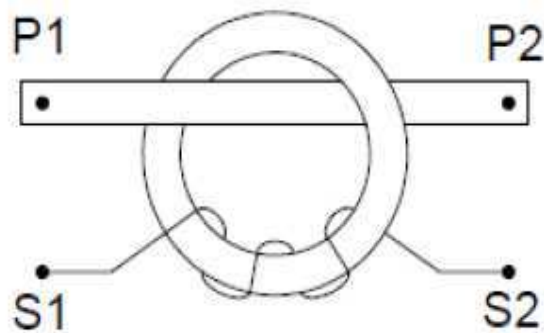


Figura 10. TC do tipo barra [36].

- c) Tipo janela: nesse tipo de transformador de corrente, o primário é o condutor que passa através da abertura do núcleo (janela) cujo meio isolante é o ar, como mostrado na Figura 11.

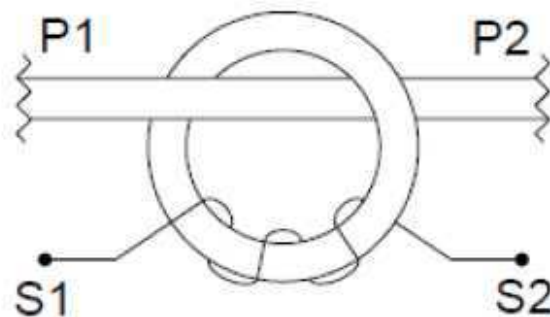


Figura 11. TC do tipo janela [36].

- d) Tipo bucha: semelhante ao tipo janela. É projetado para ser instalado sobre uma bucha de um equipamento elétrico (transformadores, disjuntores), onde o próprio condutor da linha funciona como enrolamento primário, conforme ilustrado na Figura 12.

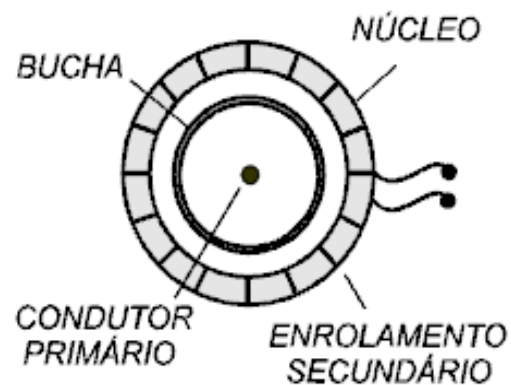


Figura 12. TC do tipo bucha [33].

- e) De núcleo dividido: é um transformador de corrente tipo janela em que parte do núcleo é separável ou basculante, para facilitar o enlaçamento do condutor primário (Figura 13).

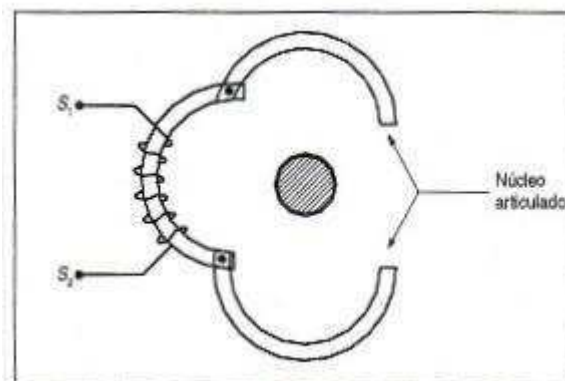


Figura 13. TC de núcleo dividido [35].

- f) De vários enrolamentos primários: possui vários enrolamentos primários distintos e isolados separadamente (Figura 14).

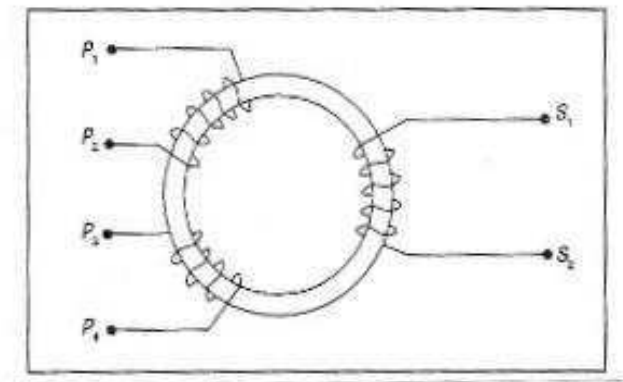


Figura 14. TC de vários enrolamentos primários [35].

- g) De vários núcleos: os enrolamentos secundários são isolados separadamente e montados cada um em seu próprio núcleo, formando um conjunto. Possui apenas um enrolamento primário, cuja espira enlaça todos os secundários do conjunto (Figura 15).

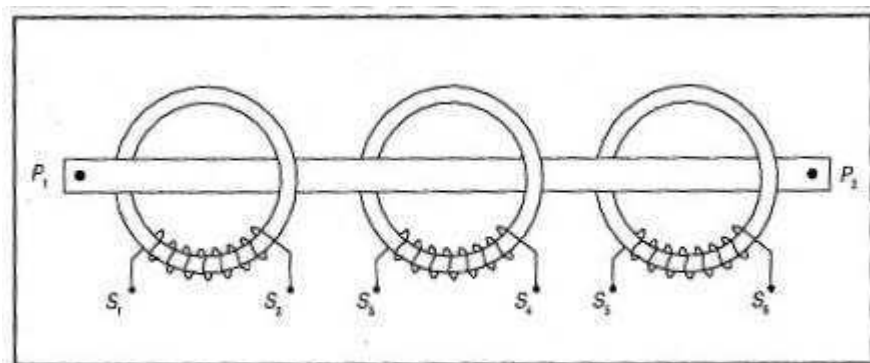


Figura 15. TC de vários núcleos [35].

4.1.2 SENSOR MAGNETORRESISTIVO

Os sensores Magnetorresistivos (MR) são constituídos de filmes de ligas Permalloy (ferro-níquel) muito finos depositados em uma base isolante, que pode ser de silício. São muito sensíveis, possuem dimensões reduzidas e chegam a medir intensidades de campo numa faixa de 10^{-3} A/m a 10^4 A/m [31]. “Quando um campo magnético atua sobre esse material, os domínios magnéticos mudam de posição fazendo com que a resistência elétrica mude de valor” [37].

A variação da resistência na presença do campo magnético é muito pequena, em torno de 2% a 3%, porém, é possível detectá-la através de um circuito eletrônico adequado [37].

Esses sensores podem ser utilizados em cabeçotes de leitores magnéticos de alta densidade, bússolas para navegação e sensoriamento de corrente [31].

Quando esse sensor MR não está na presença de um campo magnético, o vetor de magnetização interno do material ferromagnético (Permalloy) é paralelo ao fluxo de corrente I da esquerda para direita, conforme a Figura 16. Porém, quando se aplica um campo magnético externo H paralelo ao plano do material, porém perpendicular ao fluxo da corrente I , o vetor de magnetização se deslocará de um ângulo α e conseqüentemente, a resistência da liga mudará em função desse ângulo, de acordo com a expressão 6 [38].

$$R = R_0 + \Delta R_0 \cos^2 \alpha , \quad (6)$$

na qual R_0 e ΔR_0 são parâmetros do material.

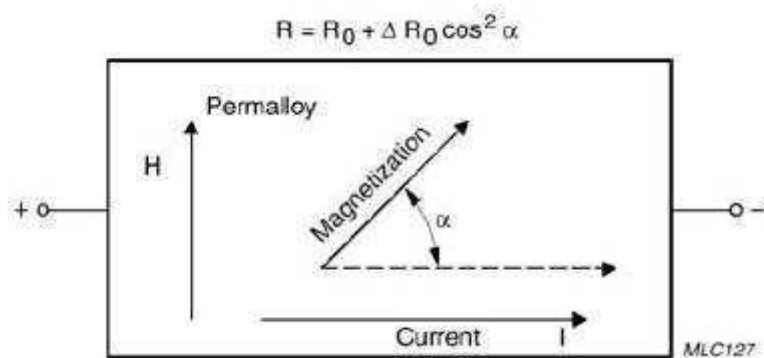


Figura 16. Efeito Magnetorresistivo da liga Permalloy [38].

Quando o MR é utilizado como sensor de corrente, a medição de corrente é feita indiretamente através de um campo magnético que é induzido em um núcleo de material magnético de alta permeabilidade com entreferro, onde fica localizado o sensor. Quando a corrente I percorre o condutor, é gerado um campo magnético H ao seu redor, que é diretamente proporcional a essa corrente, conforme a Lei de Ampère:

$$H = \frac{I}{2\pi d} \quad (7)$$

na qual d é a distância do centro do condutor ao campo magnético gerado [38].

Conforme a expressão 7, medindo o campo magnético é possível determinar a corrente elétrica. Na Figura 17 é apresentada a medição indireta de corrente via sensor MR.

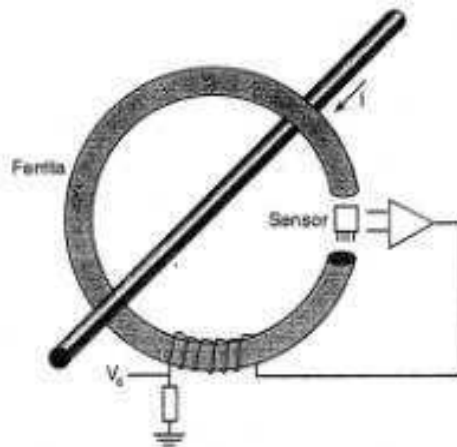


Figura 17. Medição de corrente por meio de um sensor MR [31].

4.1.3 SENSORES DE CORRENTE ELÉTRICA COM BOBINAS DE ROGOWSKY

A bobina de Rogowsky é um dispositivo de núcleo toroidal não magnético, colocado em torno do condutor que se deseja medir a corrente. O princípio de funcionamento é semelhante a um transformador de corrente, onde o campo magnético variável produzido pela corrente alternada induz uma tensão na bobina proporcional à derivada dessa corrente. Possui um enrolamento secundário que pode ser mantido em aberto ou conectado a uma impedância [39].

Na Figura 18 são apresentadas uma bobina de Rogowsky e suas partes constituintes.

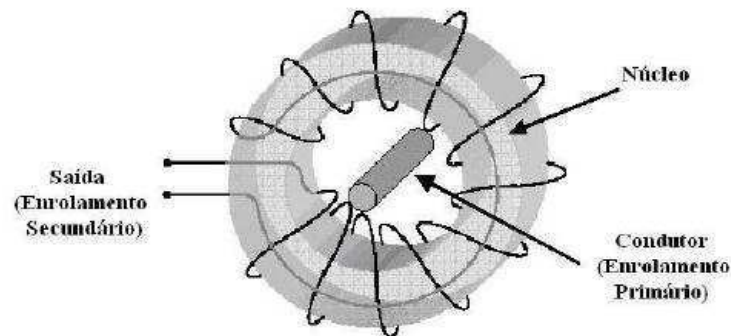


Figura 18. Bobina de Rogowsky [39].

As principais vantagens do uso dessa bobina face ao TC são [39], [40] e [41]:

- Não há perdas no núcleo já que este não é constituído por material dielétrico (ar, epóxi, PVC com isopor, entre outros) e não por material ferromagnético.
- Não há saturação magnética no núcleo, portanto a característica de magnetização é extremamente linear;
- Tamanho reduzido quando comparado a um TC, leveza e precisão;
- Larga faixa de leitura (de mA até alguns kA);
- Pode ser construída de forma aberta possibilitando a sua instalação em pontos de difícil acesso;
- Imunidade às interferências eletromagnéticas, o que a torna apropriada para ambientes eletricamente ruidosos.
- Formato flexível. Logo, ela pode ser construída para se adequar à aplicação.

Porém, existem algumas desvantagens como: requer uma distribuição do enrolamento em torno do núcleo perfeitamente uniforme para não se obter erros na saída da bobina, o que na prática é difícil de obter e a saída no enrolamento secundário é dependente da posição relativa do condutor no interior da bobina [39].

Como toda bobina, o princípio básico de funcionamento da bobina de Rogowsky são as leis de Faraday e Ampère. Como a tensão induzida no secundário é proporcional à derivada da corrente do primário se faz necessário fazer a integração dessa tensão. Isso pode ser feito utilizando um circuito integrador ou numericamente, via *software*.

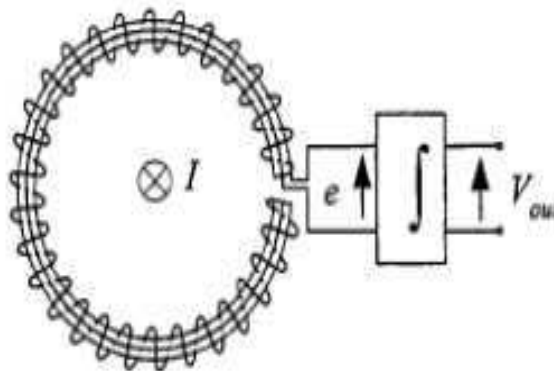


Figura 19. Circuito Integrador conectado à bobina de Rogowsky [42].

Nos dias atuais, a bobina de Rogowsky tem “maior aplicação em equipamentos destinados à busca de cabos rompidos em redes subterrâneas e na detecção da localização de falhas em redes de distribuição” [43].

ALMEIDA *et al* [43] construíram dois protótipos de bobinas de Rogowsky para fazer uma comparação do grau de exatidão da medida com transformadores de corrente convencionais. Uma das bobinas foi feita com núcleo de chapas justapostas de policarbonato com espessura igual a 3 mm e a outra de comprimento maior, foi feita utilizando um núcleo de nylon maciço, ambos são materiais não ferromagnéticos. As bobinas foram dimensionadas para medir corrente numa faixa de 0 A a 50 A. Ao realizarem as medições, resultados satisfatórios foram obtidos no que diz respeito à exatidão e linearidade das medidas obtidas, de forma que, quanto ao erro de relação de transformação, a bobina de Rogowski equipara-se a um TC de medição 0,3. Porém, para classificação dessas bobinas se faz necessário à realização de alguns ensaios requeridos pela NBR 6856/1992, considerando aspectos como limite de ângulo de fase do TC e o fator térmico. Na Figura 20 são apresentados os protótipos desenvolvidos por [43].



Figura 20. Bobinas de Rogowsky com núcleo de policarbonato à esquerda e à direita, com núcleo de nylon maciço [43].

4.1.4 O SENSOR DE EFEITO HALL

O efeito Hall foi descoberto no século XIX por Edwin H. Hall. Esse cientista aplicou um campo magnético forte perpendicular ao plano de um retângulo de ouro no qual estava sendo percorrido por uma corrente elétrica, de acordo com a Figura 21, obtendo uma tensão nos terminais do retângulo [44].

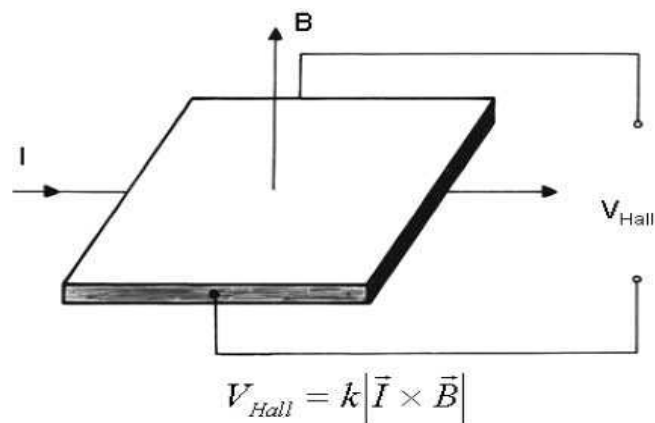


Figura 21. Esquemático de um sensor de efeito Hall [44].

Essa tensão é gerada em resposta a força de Lorentz, que surge da seguinte forma: quando um elétron se move através de um campo magnético, ele sofre uma força que é perpendicular tanto a sua direção de movimento quanto a direção do campo magnético.

Os sensores de efeito Hall geralmente são feitos de silício (semicondutores), pois neste material a velocidade de deriva dos elétrons é maior que no metal e estudos comprovaram que quanto mais rápido os elétrons estão se movendo no material, mais forte é a força de Lorentz e conseqüentemente, maior a tensão Hall gerada. Esse efeito é utilizado em sensores de corrente elétrica utilizados em diversas aplicações eletroeletrônicas [44].

4.1.5 O MEDIDOR DE ENERGIA ELETROMECAÂNICO

Atualmente, o medidor de energia elétrica mais utilizado pelas concessionárias de energia elétrica para medir o consumo de energia dos seus clientes ainda é o medidor de energia eletromecânico, também conhecido por medidor do tipo indução ou medidor quilowatt-hora. Esse equipamento foi inventado em 1888 por Oliver Blackburn Shallenberger e se utiliza do princípio da indução eletromagnética para o seu funcionamento [45].

Estudos posteriores melhoraram as características de operação e desempenho em diversas condições de carga. Além disso, esse medidor foi adaptado para medir energia reativa (kvarh) e demanda de potência ativa (kW). “Apesar de os grandes avanços, seu desempenho é limitado pelas partes móveis, sendo normatizados e fabricados atualmente no Brasil medidores de classe de exatidão de 1 e 2% para kW e/ou kWh e 3% para kvarh” [46].

Existem dois tipos de medidores eletromecânicos, os monofásicos de um elemento (uma bobina de tensão e uma bobina de corrente) e os polifásicos de dois ou três elementos. Nesses medidores, o consumo de energia elétrica pode ser visualizado através de registradores tipo ponteiro ou ciclométricos. O registrador ciclométrico é mais utilizado por apresentar menor complexidade na leitura das informações [45]. Nas Figuras 22 e 23 são apresentados os medidores com registrador tipo ponteiro e com registrador ciclométrico, respectivamente.

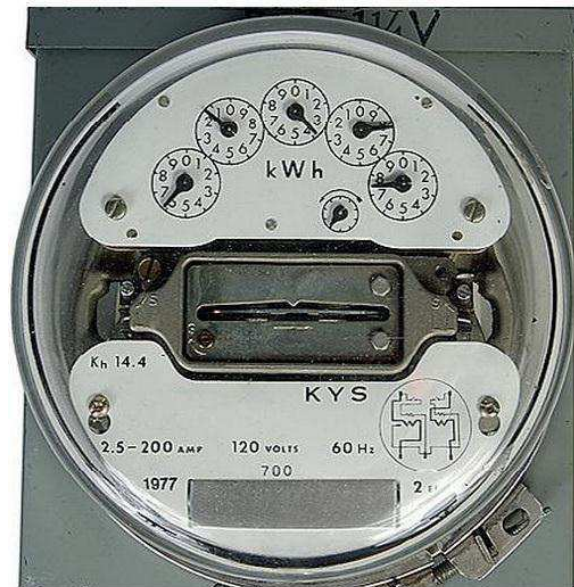


Figura 22. Medidor eletromecânico com registrador tipo ponteiro [47]



Figura 23. Medidor eletromecânico monofásico com registrador ciclométrico [48].

4.1.5.1 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Antes de se falar no princípio de funcionamento, se faz necessário o conhecimento de duas partes importantes do medidor de energia: a bobinas de tensão e a bobina de corrente.

A bobina de tensão é formada por muitas espiras de fio fino (alta resistência) e deve ser ligada em paralelo com a carga que se deseja medir. Já a bobina de corrente é formada por poucas espiras de fio grosso (baixa resistência) para que toda a corrente elétrica que é demandada pela carga possa circular por ela. Deve ser ligada em série com a carga [49].

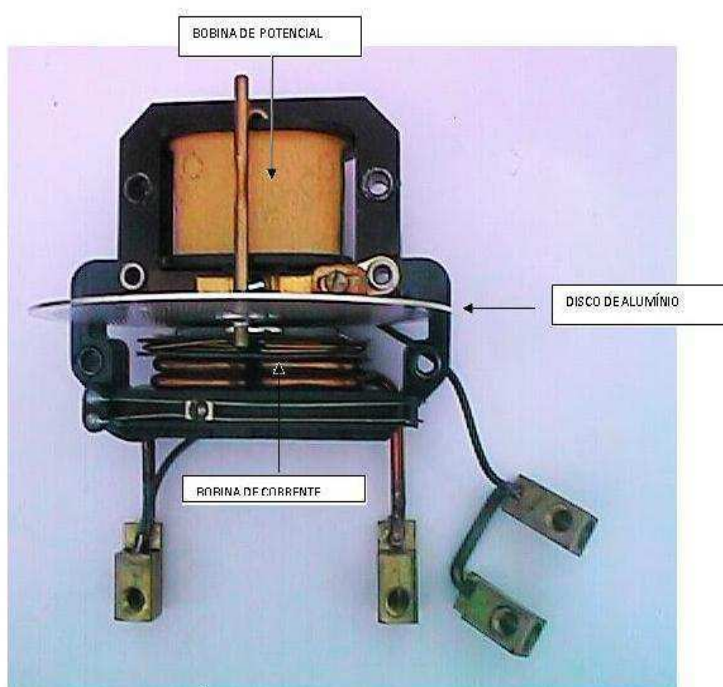


Figura 24. Estrutura interna de um medidor monofásico de indução [50].

Os enrolamentos da bobina de tensão e de corrente são posicionados sobre um núcleo de lâminas justapostas de material ferromagnético e isoladas uma das outras para reduzir as perdas por correntes parasitas.

O fluxo alternado da bobina de corrente induz correntes de Foucault no disco, que reagem com o fluxo magnético gerado pela bobina de tensão e dá origem a uma força que faz girar o disco. Da mesma forma, o fluxo alternado da bobina de potencial induz correntes parasitas no disco, que quando interagem com o fluxo da bobina de corrente dá origem à outra força de mesmo sentido. Essas forças dão origem ao conjugado que faz rotacionar o disco.

Sendo assim, as rotações do disco são proporcionais à energia que a carga consome em certo intervalo de tempo [50].

Um sistema de engrenagens é utilizado para transmitir o movimento do disco ao registrador do medidor, para que seja possível a visualização da quantidade de energia em kWh absorvida pela carga.

O acoplamento dos campos magnéticos gerados pelas bobinas de tensão e de corrente produz um torque eletromagnético no disco de alumínio proporcional à potência que flui no medidor dado pela seguinte expressão:

$$T_M = KVI \cos \varphi = KP, \quad (8)$$

na qual φ é o ângulo do fator de potência da carga, K é uma constante de proporcionalidade e P é a potência ativa da carga [51].

Para manter o disco de alumínio girando a uma velocidade constante é utilizado um freio de Foucault (ímã permanente) que gera um campo magnético responsável por frear o disco [51].

Esse medidor possui uma vida útil longa, aproximadamente 30 anos, sem mudanças nas suas características técnicas [49]. Porém, os medidores eletromecânicos são sujeitos a fraudes de energia por parte dos clientes, já que são fáceis de serem burlados e não tem como a concessionária descobrir remotamente. Nesses casos de fraude, é necessária a visita de técnicos das concessionárias para fazer a inspeção no equipamento.

4.2 SENSORES DE CORRENTE INTELIGENTES

Com o advento das redes elétricas inteligentes se faz necessário a implantação de dispositivos que detectem a localização de falhas ou distúrbios no sistema de distribuição e transmissão em tempo real, para que seja possível repará-los rapidamente e garantir dessa forma, a continuidade de serviço. Tais dispositivos são os chamados sensores de corrente inteligentes.

Os sensores de corrente inteligentes devem apresentar baixas perdas ativas (W/kg) em seus circuitos magnéticos, de forma a garantir uma melhor eficiência nas redes elétricas. Para

isso, podem ser utilizadas as ligas amorfas à base de níquel e à base de cobalto, ligas Permalloy e ferritas moles (NiZn e MnZn) na fabricação dos núcleos magnéticos desses sensores [30].

Além das ligas amorfas, também podem ser utilizadas nos núcleos ligas nanocristalinas por possuírem características eletromagnéticas mais adequadas tais como: indução de saturação superior a 1,8 T, elevado valor de permeabilidade magnética e da resistividade ($135 \mu\Omega.cm$), baixa força coerciva e boa estabilidade térmica [30].

Nas subseções a seguir são apresentados alguns tipos de sensores de corrente que podem ser instalados nas redes inteligentes, porém, ainda são poucos os sensores de corrente que são realmente inteligentes.

4.2.1 SENSOR DE CORRENTE DE FUGA EM PARA-RAIOS

A função do para-raios é limitar o nível de tensão dos equipamentos, como os transformadores, que atingiria na ocorrência de um surto no sistema elétrico.

Os para-raios à base de óxido de zinco (ZnO) são equipamentos utilizados na proteção dos sistemas elétricos contra sobretensões atmosféricas e contra falhas de manobra de alguns dispositivos de proteção da rede. Esses equipamentos contribuem decisivamente para o aumento da confiabilidade, economia e continuidade de operação dos sistemas os quais protegem. Devido à sua importância, esses dispositivos precisam ser monitorados para que seu estado de operação seja diagnosticado, já que uma falha neles pode causar danos aos equipamentos por eles protegidos e desligamentos não programados, o que acarretaria em prejuízos financeiros à concessionária, principalmente sob a forma de multas pagas ao órgão regulador [52].

A medição da corrente de fuga fornece informações relacionadas à integridade e degradação do para-raios, logo é possível determinar quando o mesmo precisa de uma lavagem ou até mesmo a sua substituição.

Os métodos mais eficientes e utilizados para o monitoramento do estado dos para-raios pelas empresas de energia elétrica são aqueles baseados nas medições de temperatura e de corrente de fuga, que é a corrente (na ordem de mA) que percorre o para-raios em direção à conexão com a terra em condições normais de operação do sistema, sendo muitas vezes empregados ambos os métodos [52].

Nos métodos baseados na corrente de fuga é utilizado um sensor de corrente para medir a corrente de fuga total. Essa corrente é então decomposta em suas componentes resistiva e capacitiva, pois em alguns estudos realizados comprovaram que “a componente resistiva e sua harmônica de 3ª ordem apresentam variações significativas, tanto na forma, quanto na amplitude, proporcionais ao nível de degradação dos para-raios” [52].

LIRA [53] e seus colaboradores utilizaram um núcleo toroidal fabricado com uma liga nanocristalina, devido à superioridade de suas características magnéticas quando comparados com os materiais magnéticos convencionais, para medir a corrente de fuga dos para-raios de óxido de zinco em regime normal de operação, além disso, foi agregado ao sensor de corrente um sistema embarcado de medição composto por um microcontrolador com conversor analógico digital interno. Também foi utilizado um sistema de transmissão via rádio frequência cuja função é transmitir os sinais captados em tempo real pelo sensor, para uma central de monitoramento para que seja possível o tratamento dos dados. Esse sensor de corrente é aplicado em sistemas de alta tensão e é capaz de operar à distância sem ajustes ou calibração periódica.

Na Figura 25 é apresentado o sensor de corrente de fuga de para-raios desenvolvido por LIRA [53].

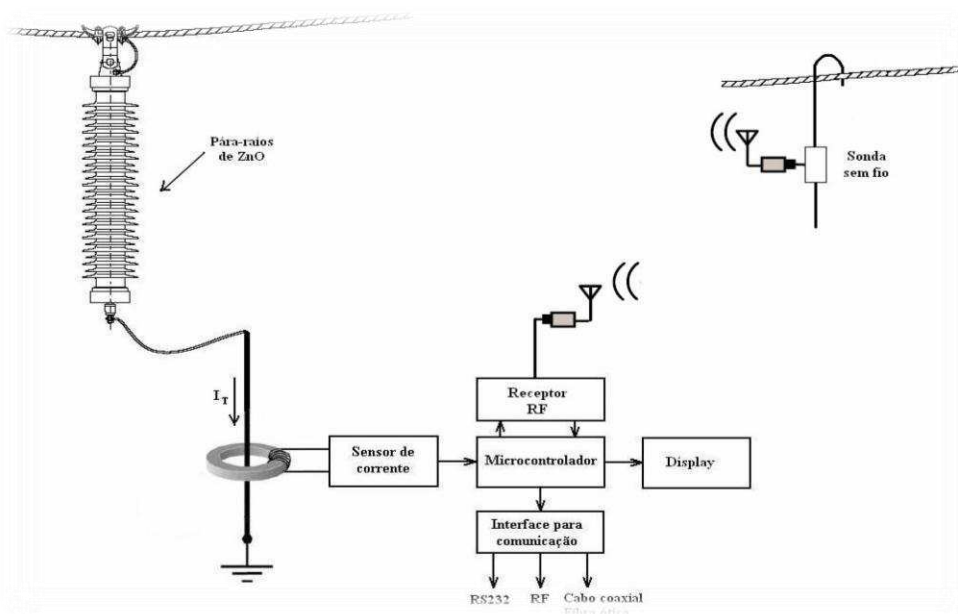


Figura 25. Esquema do sistema de monitoramento de corrente de fuga em para-raios de ZnO

[53].

No sistema de monitoramento apresentado na Figura 25, a sonda coleta amostras de tensão da fase da linha de alta tensão e as envia para o receptor RF. Essas amostras, juntamente com as amostras de corrente captadas pelo sensor são submetidas ao conversor analógico-digital do microcontrolador. Uma rotina implementada no mesmo efetua a análise espectral para determinar a diferença de fase entre esses dois sinais para que seja possível calcular a componente resistiva da corrente e assim, diagnosticar o estado do para-raios [53].

Ainda com relação à medição da corrente de fuga em para-raios de óxido de zinco, MACEDO [54] propôs em seu trabalho um sensor de corrente de fuga de para-raios utilizando-se ligas nanocristalinas no núcleo toroidal, sendo que o objetivo principal era obter uma tensão diretamente proporcional à intensidade da corrente de fuga.

Na Figura 26 é apresentado o diagrama esquemático do sensor de corrente proposto por [54].

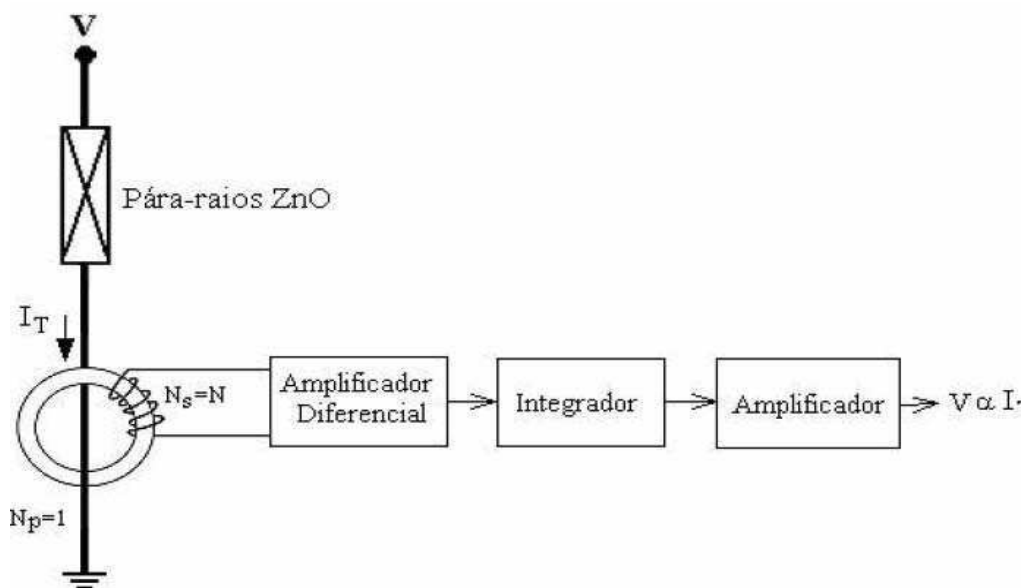


Figura 26. Diagrama esquemático do sensor de corrente de fuga utilizado em para-raios de ZnO [54].

Conforme a Figura 26, através do campo magnético gerado pela circulação da corrente no fio é gerada uma tensão induzida na bobina enrolada ao núcleo toroidal. Essa tensão, conforme [54] é proporcional à derivada da corrente de fuga, como apresentado na expressão 9.

$$V_s = N_s \frac{d\phi}{dt} = \left(\frac{\mu AN_p N}{l} \right) \cdot \frac{dI_T}{dt} \quad (9)$$

Como o objetivo era obter uma tensão que fosse proporcional à corrente de fuga e não à sua derivada, colocou-se um circuito integrador. Um amplificador de instrumentação (diferencial) foi utilizado para eliminar o ruído de modo comum do sinal de tensão gerado na bobina, possibilitando uma melhor sensibilidade ao sensor e, um amplificador operacional foi utilizado para amplificar o sinal original [54].

Um protótipo do sensor da Figura 26 foi acoplado a um para-raios conectado a uma linha de transmissão de 230 kV. Com isso foi verificada a forma de onda da corrente de fuga, comprovando assim, o correto funcionamento do sensor. Além disso, durante esse teste, não houve a interferência eletromagnética dos campos existentes na subestação, já que o circuito foi colocado dentro de uma caixa metálica fechada [54].

4.2.2 O MEDIDOR DE ENERGIA INTELIGENTE

O medidor inteligente surgiu para revolucionar o sistema de distribuição de energia elétrica. Trata-se de um novo medidor eletrônico que possui mais funções que o medidor eletrônico convencional. Suas principais funções são [22], [55] e [56]:

- Comunicação e medição do consumo de energia elétrica em tempo real (medição à distância);
- Comunicação bidirecional entre consumidor e concessionária;
- Detecção de fraudes;
- Cortes e religamentos remotos;
- Medição de energia ativa e reativa;
- Medição do valor eficaz da tensão;
- Cálculo dos índices de qualidade de fornecimento: DIC, FIC, DMIC, DRP E DRC;
- Comunicação, utilizando protocolo de comunicação público.



Figura 27. Medidor inteligente [57]

Na Figura 28 é apresentado um diagrama de blocos no qual são apresentadas às funcionalidades comparativas entre um medidor inteligente e um medidor eletrônico convencional.

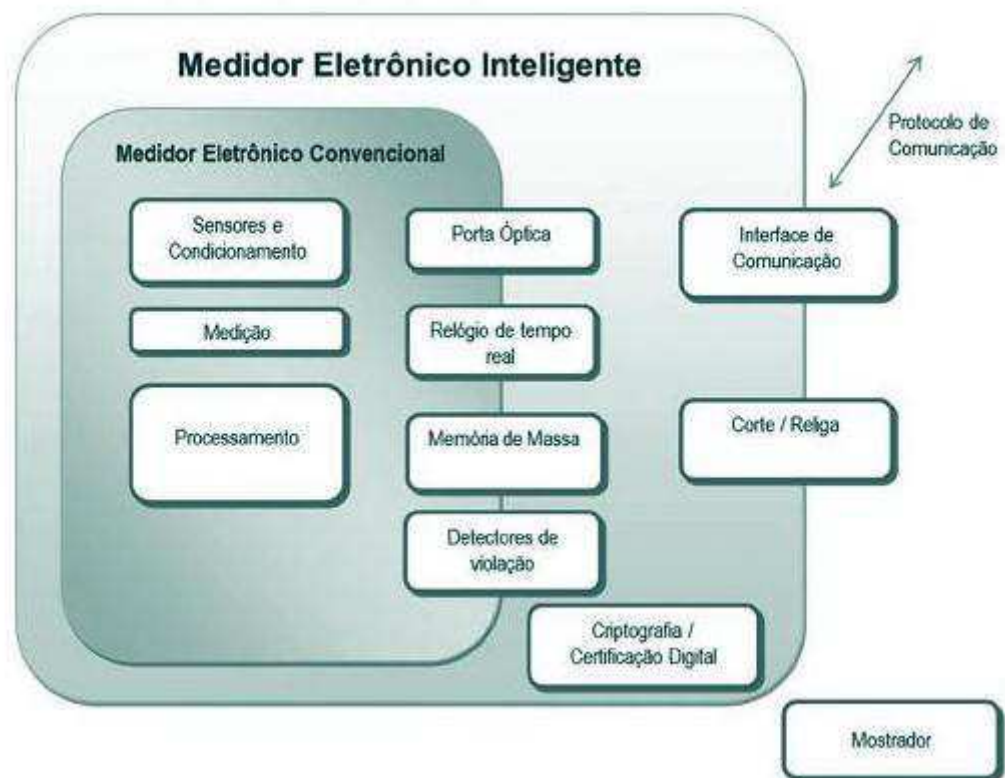


Figura 28. Diagramas em blocos das partes que compõem os medidores eletrônicos convencionais e inteligentes [22].

De acordo com a Figura 28, existem 4 blocos que são comuns a ambos medidores de energia: porta óptica de comunicação, relógio de tempo real, memória de massa e detectores de violação (antifraudes). O relógio de tempo real agrega “as funções de controle das entradas dos horários das diferentes tarifas, data de fechamento de fatura e de reposição de demanda” [22].

Várias funções antifraudes são incluídas no medidor inteligente, tais como [22]:

- Detecção de interferências, como abertura da tampa, furação do gabinete e descarga eletromagnética sobre o circuito eletrônico;
- Detecção de ligação irregular;
- Detecção de tentativa de invasão eletrônica através do meio de comunicação;
- Funções de intertravamento do medidor através da recepção de comandos inválidos;
- Computação de página fiscal.

A memória de massa do medidor serve para fazer o registro dos dados de faturamento e outras informações relevantes, em um intervalo de 37 dias para a maioria dos medidores inteligentes utilizados no Brasil. Além disso, a memória garante que os dados não sejam perdidos caso haja falta prolongada de energia [21].

O mostrador ou *display* remoto é utilizado para que haja interação entre a concessionária e o consumidor. Esse *display* permite o envio de mensagens críticas ou não, pela concessionária, permite alertar ao consumidor sobre excesso de consumo, sobre falta e corte de energia, permite a visualização dos índices de qualidade de energia, entre outras funções [22].

A medição eletrônica é um processo simples. Como se sabe, a energia é a área abaixo da curva de potência dada pela expressão:

$$E = \int V \times Idt \quad (10)$$

Para medir a energia, pode ser utilizado um circuito de interface analógica, que possui uma entrada de tensão formada por um TP ou um divisor resistivo, e uma entrada de corrente que pode ser formada por um TC, um resistor *shunt* ou um sensor de corrente apropriado. Na

entrada do conversor A/D são aplicados os sinais de tensão e corrente que são convertidos em pulsos que representam a quantidade de energia consumida [58].

Além das vantagens advindas das diversas funções já citadas do medidor inteligente, há também a vantagem de que esse medidor tem maior sensibilidade que o medidor eletromecânico, fato esse que fica evidenciado pela menor corrente de partida, o que o permite registrar a energia com correntes menores. Essa característica do medidor inteligente juntamente com o seu menor consumo próprio, faz com que haja uma redução nas perdas técnicas do sistema de medição [59].

Ensaio feito por JÚNIOR *et al*, no Laboratório de Medição da COPEL em Curitiba, com 9 medidores do tipo indução e 7 medidores eletrônicos, todos monofásicos de tensão nominal igual a 120 V, comprovaram que:

- A corrente de partida nos medidores eletrônicos é menor em média que a corrente de partida dos medidores do tipo indução. Aqueles começaram a medir na média, com 0,24% da corrente nominal, já esses, começaram a medir com 0,49% da corrente nominal, o que indica que os eletrônicos são mais sensíveis;
- Os erros medidos para correntes entre 10% da corrente nominal (15 A) e a corrente de partida (dada em percentual da corrente nominal) dos eletrônicos são menores em condições de pequenas cargas;
- Quanto ao ensaio do consumo próprio, os medidores tipo indução apresentaram um consumo médio de 1,14 W no circuito de potencial, enquanto que os eletrônicos apresentaram apenas 0,65 W, o que equivale a 0,35kWh de consumo reduzido ao mês, se for utilizado o medidor eletrônico.

5 CONCLUSÕES

A partir do exposto nesse Trabalho de Conclusão de Curso, conclui-se que:

- A implantação das redes inteligentes trará muitos benefícios para as empresas concessionárias de energia elétrica, consumidores, provedores de tecnologia e serviço e para o meio ambiente.
- As empresas de energia elétrica poderão gerenciar a rede de maneira mais eficiente, tornando o sistema mais confiável e seguro, já que a nova rede disporá de tecnologia informação (TI), automação (A) e comunicações (C) para o seu monitoramento e controle.
- Diversas tecnologias já existentes podem ser aplicadas de forma inteligente visando à automação e o controle remoto da distribuição.
- Muitos países já iniciaram a reestruturação de suas redes elétricas, com a inclusão da tecnologia inteligente, uns avançam mais rapidamente, outros mais lentamente.
- No Brasil, várias empresas de energia estão investindo em redes inteligentes nos Estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Amazonas, Ceará, Paraná e Pernambuco, todas em busca de objetivos como redução das perdas comerciais, redução dos custos operacionais e aumento da confiabilidade do sistema.
- Os sensores de corrente elétrica convencionais, como os transformadores de corrente ainda são os mais utilizados nas redes elétricas. Porém, a tendência é que esses sejam substituídos pelos sensores inteligentes, tendo em vista que estes apresentam mais vantagens, como detecção e localização de falhas ou distúrbios no sistema de distribuição e transmissão em tempo real, monitoramento do estado de funcionamento de alguns equipamentos da rede, como o para-raios, por exemplo, e baixas perdas em seus circuitos magnéticos.
- A diferença entre os sensores convencionais e os inteligentes é que nesses últimos podem ser integrados aos seus circuitos, amplificadores, condicionadores de sinais, sistemas de transmissão *wireless* (via RF, ZigBee, *Bluetooth*, entre outros), para garantir um melhor desempenho do sensor.

- Atualmente, ainda são poucos os sensores de corrente que são realmente inteligentes. Porém, com o avanço tecnológico cada vez mais acelerado, a tendência é que em pouco tempo, diversos tipos de sensores de corrente inteligentes sejam introduzidos no mercado.
- A substituição dos medidores de energia elétrica convencionais, eletromecânicos, por medidores eletrônicos inteligentes é um passo importante na implantação das redes inteligentes.

REFERÊNCIAS

- [1] BONACORSO, N. G. e NOLL, V. *Automação eletropneumática*, 11ª ed., São Paulo: Erica, 2004.
- [2] SANTOS, José de Anchieta Gomes dos. *Arquitetura Hardware/Software de um Núcleo NCAP Segundo o Padrão IEEE 1451.1: Uma prova de conceito*. Dissertação de Mestrado, UFRN, Rio Grande do Norte, 2010.
- [3] LEÃO, Erico Meneses. *Uma Arquitetura de Sensores Inteligentes Disparada por Eventos*. Dissertação de Mestrado, UFRN, Rio Grande do Norte, 2007.
- [4] Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. *CHAMADA Nº 011/2010 Projeto Estratégico: “Programa Brasileiro de Rede Elétrica Inteligente”*. Brasília: ANEEL, 2010.
- [5] LUCIANO, Benedito Antonio. *Redes inteligentes*. UFCG, 2013.
- [6] *The Green Grid: Energy Savings and Carbon Emissions Reductions Enabled by a Smart Grid*. EPRI Technical Update Report 1016905, June 2008.
- [7] *Estimating the Costs and Benefits of the Smart Grid- A Preliminary Estimate of the Investment Requirements and the Resultant Benefits of a Fully Functioning Smart Grid*. EPRI Report #1022519, March 2011.
- [8] Revista *Metering Internacional* 2008, apud ROCHA, SUGUINOSHITA, SCOLARI, 2010.
- [9] CAIRES, Luis Eduardo. *Aplicação de redes inteligentes nas instalações elétricas residenciais*. Dissertação de Mestrado, USP, São Paulo, 2012.
- [10] LEÃO, E.M.; GUEDES, L.A. e VASQUES, F. *Uma Arquitetura de Sensores Inteligentes Disparada por Eventos: Uma solução baseada no padrão IEEE 802.15.4*. Natal, RN e Porto, Portugal.
- [11] RIVERA, R.; Esposito, A.S. e TEIXEIRA, I. *Redes elétricas inteligentes (smart grid): oportunidade para adensamento produtivo e tecnológico local*. Revista do BNDES 40, Dezembro 2013.
- [12] MARCILI, F. N. *Estudo de caso: iluminação a LED em postos de combustíveis*. Revista Eletricidade Moderna, nº 471, São Paulo: Aranda, Junho de 2013.
- [13] Agência Nacional de Energia Elétrica. *Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012*. Abril de 2012.
- [14] ANEEL. *Geração Distribuída*. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idArea=757&idPerfil=2>> Acesso em 03/06/2014

- [15] OLIVEIRA, V. R.. *A importância das redes inteligentes na otimização da aplicação de novos recursos para a expansão do sistema elétrico*. Revista GTD, 40ª edição. São Paulo: Lumière, 2010.
- [16] FERREIRA, M. C. A. F. *Perspectivas e Desafios para a Implantação das Smart Grids: um estudo de caso dos EUA, Portugal e Brasil*. Monografia de bacharelado, UFRJ, Julho de 2010.
- [17] KAGAN, Nelson. *Smart Grid no Contexto da Geração e Distribuição*. IEEE Workshop: SMART GRIDS – Trends & Best Practices. Outubro de 2013.
- [18] Ministério de Minas e Energia. *SMART GRID no Brasil*. Disponível em: <<http://www.tec.abinee.org.br/2011/arquivos/s404.pdf>> Acesso em 29/06/2014.
- [19] BREKKE, K.; VAILATI, R.; EVANS, G.; ESTEVES, J.; KAPETANOVIC, T.; FRIEDL, W.; STEINER, M.; SCHOTMAN, H.; HEMBERGER, K. e FERRIERES, François-Annet. *Aspectos Regulatórios das Redes Inteligentes de Energia*. Revista Eletricidade Moderna, nº 450, São Paulo: Aranda, Setembro de 2011.
- [20] *Redes elétricas inteligentes: contexto nacional*. - Brasília, DF: Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, 2012. Disponível em: <www.cgee.org.br/atividades/redirect/8050>. Acesso em: 29/06/2014.
- [21] LAMIN, HUGO. *Medição eletrônica em baixa tensão: aspectos regulatórios e recomendações para implantação*. Dissertação de Mestrado, Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2009.
- [22] *Desvendando as Redes Elétricas Inteligentes/Coordenação geral Fabio Toledo*. Rio de Janeiro: Brasport 2012. Disponível em:< <http://books.google.com.br>> Acesso em 29/06/2014.
- [23] BOCCUZZI, Cyro Vicente. *A Modernização Tecnológica e as recentes mudanças no Setor Elétrico Brasileiro*. Fórum Latino Americano de Smart Grid, 2013.
- [24] AES Eletropaulo. *AES Eletropaulo anuncia o maior projeto de Smart Grid do país*. Disponível em: <<https://www.aeseletropaulo.com.br/imprensa/nossos-releases/conteudo/aes-eletropaulo-anuncia-o-maior-projeto-de-smart-grid-do-pa%C3%ADs>>Acesso em: 04/06/2014
- [25] SALGADO, Aline. *País recebe em 2014 as primeiras “Smart Grids”*. Disponível em: <http://www.abce.org.br/downloads/BrasilEconomico_12.11.pdf> Acesso em: 04/06/2014
- [26] CORREIA, Weules. *Avanços do Projeto Cidade Inteligente de Búzios*. Ampla Energia e Serviços SA, novembro de 2013. Disponível em: <http://www.smartgrid.com.br/eventos/smartgrid2013/apresentacao/weules_correia.pdf> Acesso em: 05/06/2014
- [27] REIS, Tiago. *Amazonas - Programa pioneiro na implantação de redes inteligentes de Smart Grid vence o concurso Projeto do Ano na área de energia da Penn Well do Brasil*. Janeiro de 2014. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br>> Acesso em: 06/06/2014
- [28] MARCONDES, J.; FILHO, J. S.; RUFINI, R.; COSTA, L. A.; AFFONSO, C. E. e ANDREUS, P.. *InovCity: projeto integrado de rede inteligente*. Revista Eletricidade Moderna nº 475, Aranda, Outubro de 2013.

- [29] *EDP traz o projeto de rede inteligente para o Espírito Santo*. Disponível em: <http://www.portalpch.com.br/index.php/noticias-e-opniao/noticias-gerais-do-segmento/3445-06-06-2014-edp-traz-o-projeto-de-rede-inteligente-para-o-espírito-santo#.U5j1h_ldUlo> Acesso em 11/06/2014].
- [30] LUCIANO, Benedito Antonio. *Aplicações eletroeletrônicas de ligas amorfas e ligas nanocristalinas no contexto das redes inteligentes*. Universidade Federal de Campina Grande. Artigo submetido para publicação, 2014.
- [31] BALBINOT, Alexandre e BRUSAMARELLO, Valner João. *Instrumentação e Fundamentos de medidas*. Volume 2, Rio de Janeiro: LTC, 2007.
- [32] FRONTIN, Sergio O. *Equipamentos de alta tensão – prospecção e hierarquização de inovações*. Brasília: Teixeira, 2013.
- [33] GUERRA, F.C.F – *Notas de Aula*. DEE/CEEI/UFCG, 2011.
- [34] LIMA, Dorival K.. *Transformadores para instrumentos ópticos: aspectos da viabilidade do seu uso pelas empresas do setor elétrico brasileiro*. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.
- [35] FILHO, João Mamede. *Manual de Equipamentos Elétricos*. 3ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2005.
- [36] GONÇALVES, Renato Masago. *Guia de projetos para subestações de alta tensão*. Trabalho de conclusão de curso: Escola de Engenharia de São Carlos, 2012.
- [37] ROSSI, Davi e JUNIOR, José Olimpio Rios. *Sensores Magnetorresistivos*. Escola de Engenharia de Lorena: USP, 2010.
- [38] MAINÉ, Jordi. *Sensores Acondicionadores y Procesadores de señal*. Sílica: 2003. Disponível em: <www.jcee.upc.es/JCEE2002/MAYNEPONENCIA.pdf> Acesso em: 13/08/2014.
- [39] XAVIER, Bruno da Silva e SILVA, Fábio dos Santos. *Projeto, Construção e Ensaio de um Protótipo de Transdutor de Corrente do Tipo Bobina de Rogowsky*. Monografia de graduação em engenharia elétrica: UNB, 2006.
- [40] HIGASHI, Eduardo Massahiko. *Modelagem da Bobina de Rogowski para Medidas de Pulsos de Corrente Elétrica*. Dissertação de mestrado: UFPA, 2006.
- [41] SKENDZIC, Veselin e HUGHES, Bob. *Uso de Bobinas de Rogowski em Relés de Proteção*. Disponível em: <http://www.selinc.com.br/art_tecnicos/6571_Uso_de_Bobinas_de_Rogowski_em_Reles_de_Protecao.pdf> Acesso em: 01/08/2014.
- [42] Centro de Pesquisas Energéticas (CEPEL). *Bobinas de Rogowsky*. Disponível em: <ftp://ftp.cepel.br/upload/Curso_Descargas_Parciais/Tomaz/1_Rogowski2012.pdf> Acesso em: 01/08/2014
- [43] ALMEIDA, Álvaro A.; JÚNIOR, C. F. M.; BORGIO, H. e GONZALEZ, L. H. E.. *Estudo e Desenvolvimento de um Protótipo de Equipamento de Medição Baseado na Bobina de*

Rogowski como Alternativa aos TCs de Medição Convencionais. Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR

[44] LENZ, J. e EDELSTEIN, A. S. Magnetic Sensors and Their Applications. IEEE SENSORS JOURNAL, VOL. 6, NO. 3, JUNE 2006.

[45] PAULA, Gilberto José de. *Medidor de Demanda de Energia Elétrica Residencial com Acesso Remoto*. Trabalho de Conclusão de Curso. UniCEUB, 2013.

[46] HENRIQUES, Adelino Leandro. *Medição de Energia Elétrica para Faturamento: estudo comparativo de medidores eletrônicos e eletromecânicos, com foco no desempenho sob condições não senoidais*. Dissertação de Mestrado. UFMG, 2002.

[47] *Cemig vai fazer leitura do medidor, imprimir e entregar a conta na hora*. Disponível em: <<http://www.gxp.com.br/2013/02/21/cemig-vai-fazer-leitura-do-medidor-imprimir-e-entregar-a-counta-na-hora/>> Acesso em: 03/09/2014.

[48] *Medidores de energia*. Disponível em: <http://www.salfatis.com.br/produtos.codigo_1967.html> Acesso em: 03/09/2014.

[49] RODRIGUES, José Eduardo. *Interferência de Harmônicas em Equipamentos de Medição de Energia Elétrica*. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2009.

[50] OLIVEIRA, Punaro Bley Adão de. *Medidor de kWh*. Disponível em: <<https://sites.google.com/site/punarobley/medidor-de-kwh-atd>> Acesso em: 03/09/2014.

[51] *Medição de Energia Elétrica*. <Disponível em: <http://www.labspot.ufsc.br/circuitos1/Aula10E.pdf>> Acesso em: 03/09/2014.

[52] LIRA, George R. S.. *Monitoramento de Para-raios de Óxido de Zinco com Base na Medição da Corrente de Fuga Total*. Tese de doutorado. UFCG, 2012.

[53] LIRA, J. G. A.. *Sistema de aquisição de dados para monitoramento e diagnóstico remoto das condições de pára-raios de óxido de zinco*. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Coordenação de Pós-Graduação, Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande – PB, Brasil, 2007.

[54] MACEDO, Euler Cássio Tavares de. *Medidor de Corrente de Fuga Baseado em Microcontrolador Aplicado a Pára-raios de Óxido de Zinco*. Projeto de Engenharia Elétrica: UFCG, 2009.

[55] LEAL, Milton e BEZUTTI Natália. *A Era das Smart Grids*. Revista GTD, 40ª edição. São Paulo: Lumière, 2010.

[56] Ecil Energia. *Medição Inteligente*. Disponível em: <<http://www.ecilenergia.com.br/download/Medidores.pdf>> Acesso em: 04/09/2014.

[57] *Programa nacional de troca de medidores sairá do papel somente em 2012*. Disponível em: <<http://www.redeinteligente.com/2010/05/06/programa-nacional-de-troca-de-medidores-saira-do-papel-somente-em-2012/>> Acesso em: 04/09/2014.

[58] SILVA, Rafael Luiz da. *Medidor de Energia Elétrica de Baixo Custo com Interface Serial Compatível com a NBR 14522*. Trabalho de Conclusão de Curso. Centro Federal de Educação Tecnológica de Santa Catarina, 2007.

[59] JÚNIOR, C. F. M.; VALOIS, P. V.; JÚNIOR, J. A. B.; FRESSATO, M.. *Redução de Perdas Técnicas Resultantes da Adoção de Medidores Eletrônicos de Energia para Pequenos Consumidores: comparação com os medidores eletromecânicos*. COPEL, Curitiba.