



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

BR/GSE/04
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO – VIII

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

INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS APLICADAS A EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO EM CORRENTE ALTERNADA.

Sérgio O. Frontin* UnB	Antônio C. Brasil UnB	José A. Araújo UnB	Alexandre M. Abreu UnB	Leonardo Murça UnB
Claudir A. Costa UnB	Rafael Alencar UnB	Lauris R. Perfeito UnB	Thamise S. V. Vilela UnB	Bianca Alencar UnB
Claudio A. Frate		Gliender P. Mendonça		Paulo V. Cyriaco

RESUMO

Este informe Técnico (IT) apresenta resumo do projeto “Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas Aplicadas a Equipamentos de Alta Tensão em Corrente Alternada” que está sendo executado pela Fundação de Empreendimentos Científicos e Tecnológicos (Finatec) da Universidade de Brasília, sob o patrocínio das empresas: Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A. (TAESA) e Brasnorte Transmissora de Energia S.A (Brasnorte). O objetivo é fornecer subsídios às empresas, fabricantes, órgãos governamentais, centros de pesquisa e universidades para a seleção de temas promissores de P&D neste setor. Para tanto, foi desenvolvida e aplicada metodologia de prospecção e hierarquização, que indicou 16 temas prioritários objetivando o desenvolvimento de pesquisas na área de equipamentos de alta tensão.

PALAVRAS-CHAVE

Prospecção, Hierarquização, Inovação, Equipamentos, Pesquisa & Desenvolvimento.

1.0 - INTRODUÇÃO

O Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel) menciona, no contexto do tema Planejamento de Sistemas de Energia Elétrica, que a rede básica brasileira, com vida média na faixa de 20 a 30 anos de serviço, em pouco tempo apresentará inevitável degradação. Por este motivo, vem sendo enfatizada a importância do desenvolvimento de tecnologias que permitam aumentar a capacidade de transporte e a confiabilidade.

Neste sentido, em 2009, a TAESA patrocinou o projeto de P&D “Inovações Tecnológicas Aplicadas as Linhas de Transmissão (LT)” de maneira analisar a situação atual das tecnologias empregadas em LT, apresentando aquelas mais promissoras. Este projeto denominado de INOVALT foi concluído em setembro de 2010, com a publicação de livro e informe técnico no XXI SNPTEE realizado em 2011 em Florianópolis. Tendo em vista o sucesso desta iniciativa, foi proposto completar esta pesquisa, analisando agora as inovações aplicadas aos equipamentos de alta tensão das subestações. Este novo projeto passou a ser denominado de INOVAEQ.

A hierarquização das inovações, com a formação de uma agenda estratégica de itens mais promissores em termos de P&D, considerando os indicadores econômicos e de desempenho fornecerão subsídios importantes para a alocação de investimentos por parte das empresas envolvidas com este tema: Concessionários de Transmissão, Projetistas de Subestações, Fabricantes de Equipamentos, Empresas Montadoras, Laboratórios de Pesquisa etc.

As informações geradas poderão ser ainda utilizadas para a gestão da cadeia de inovação tecnológica da empresa, com vista a determinação do ponto de ruptura entre os equipamentos existentes e os modernos equipamentos que estão sendo ofertados no mercado, ou seja, indicadores que poderão contribuir no sentido de antever o momento da substituição de equipamentos ou ainda permitir a postergação de investimentos com maior segurança.

(*) SHIS QI 17 Conjunto 02 Casa 28 – Lago Sul – CEP 71.645-020. Brasília – DF – Brasil
Tel (+55 61) 9114-2102 – Fax (+55 61) 3248-7845 – Email: sergiofrontin@hotmail.com

2.0 - ETAPAS DO PROJETO

O projeto iniciado em dezembro de 2011 com duração prevista para 24 meses foi conduzido em três etapas. Na primeira delas, foi realizada a contextualização do tema proposto a partir da análise dos diversos estudos e atividades necessários para a implantação de um equipamento no sistema, da análise do sistema de transmissão atual, da expansão planejada e dos indicadores de desempenho. A segunda etapa refere-se à realização das atividades de prospecção para a identificação e análise dos temas que poderiam conduzir a inovações tecnológicas. Já a terceira refere-se ao estabelecimento e aplicação de metodologia de hierarquização aos temas selecionados, considerando as dimensões: aumento da capacidade de transporte, aumento da confiabilidade, redução do impacto ambiental e redução dos custos.

3.0 PROSPECÇÕES TECNOLÓGICAS REALIZADAS

A segunda etapa desta pesquisa foi referente à prospecção dos temas mais promissores e considerou as seguintes fontes de pesquisa em âmbito nacional: Programa de P&D da Aneel; Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES); Instituto Nacional de Propriedade Industrial (INPI) e Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE). Para obter parâmetros comparativos com o cenário internacional, foram consideradas também as fontes *Institute of Electrical and Electronic Engineers* (IEEE) e *Conseil International des Grands Réseaux Electriques* (CIGRÉ).

Além da identificação e análise dos temas mais promissores, foram levantados outros aspectos considerados relevantes para a pesquisa, como por exemplo: investimentos realizados nos projetos de P&D, as instituições proponentes e executoras e a quantidade de trabalhos por instituição e por país. Devido à grande abrangência do tema, o trabalho de prospecção foi realizado para cada um dos equipamentos i) Transformadores de Potência ii) Reatores em Derivação iii) Buchas iv) Transformadores de Instrumento v) Para-raios vi) Seccionadores vii) Disjuntores viii) Capacitores *Shunt* ix) Capacitores Série x) Dispositivos FACTS.

Foram selecionados e analisados 262 trabalhos de acordo com a distribuição por tema/ano e por tema/fonte apresentadas a seguir nas tabelas 1 e 2. A maior concentração ocorreu em 2011 com 56 trabalhos e o tema de maior quantidade foi transformadores de potência com 73 trabalhos. O SNPTEE foi a fonte que forneceu o maior número de trabalhos (80) para a pesquisa.

Tabela 1 – Trabalhos por Tema/Ano

Equipamentos	2012	2011	2010	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	Total
1. Transf. de Potência	1	17	11	13	4	6	8	9	3	1	73
2. Reatores	2	5	1	6	4	1	3	1	1	0	24
3. Buchas	0	6	3	0	3	0	3	1	0	0	16
4. T. Instrumentos	0	3	4	7	2	5	5	3	0	0	29
5. Para-raios	0	1	1	4	0	4	1	3	2	1	17
6. Seccionadores	0	0	0	1	0	1	0	2	1	0	5
7. Disjuntores	0	6	6	2	4	2	4	7	1	5	37
8. Capacitores <i>Shunt</i>	0	2	1	1	0	0	0	0	0	1	5
9. Capacitores Série	0	4	4	2	1	2	2	1	1	0	17
10.FACTS	1	12	7	12	2	3	0	0	1	1	39
Total	4	56	38	48	20	24	26	27	10	9	262

Tabela 2 – Trabalho por Tema/Fonte

Equipamentos	INPI	CAPES	ANEEL	SNPTEE	CIGRE	IEEE	Total
1. Transf. de Potência	3	13	7	32	14	4	73
2. Reatores	1	2	2	3	5	11	24
3. Buchas	2	1	1	6	5	1	16
4. T. de Instrumentos		7	6	9	3	4	29
5. Para-raios		6	1	8	2		17
6. Seccionadores			1	3	1		5
7. Disjuntores	6	5	3	12	9	2	37
8. Capacitores <i>Shunt</i>				1		4	5
9. Capacitores Série		2	1	4	3	7	17
10. FACTS	1	5	3	2	1	27	39
Total (%)	13 5%	41 16 %	25 9%	80 30 %	43 17 %	60 23%	262

3.1. Teses acadêmicas (CAPES)

Foi analisado um total de 41 teses registradas entre os anos de 2010 e 2003 no banco de dados da CAPES, entre teses de mestrado e doutorado. Dentre estas teses, a maioria concentrou-se na área de transformadores de potência e transformadores de instrumento, com 13 e 7 teses respectivamente. Entre as instituições que mais se destacam na produção de trabalhos acadêmicos está a Universidade de Campina Grande com 9 teses, seguida das Universidades de Santa Catarina e São Paulo.

3.2. Patentes (INPI)

Pesquisa no banco de dados do INPI não revelou uma produção nacional muito forte. Foram encontradas apenas 13 patentes no período de 2011 a 2004. Destaque para o equipamento disjuntor com seis patentes.

3.3. Informes Técnicos publicados no SNPTEE

Com base nos dados fornecidos pelo SNPTEE, as áreas que mais se mostraram em evidência foram os temas : transformadores de potência e disjuntores que, juntos, somam 44 trabalhos publicados. De 44 empresas, a Chesf, Cepel, Furnas e Eletronorte foram as que mais apresentaram informes na área de equipamentos.

3.4. Trabalhos publicados no CIGRÉ

O CIGRÉ tem dado mais atenção aos temas transformadores de potência e disjuntores. Juntas, estas áreas somam 23 trabalhos publicados pelo CIGRÉ em suas Bienais no período 2012 - 2004.

3.5. Trabalhos publicados IEEE

A base de dados do IEEE aponta para áreas que se preocupam com os dispositivos FACTS e reatores, que foram os temas mais discutidos entre os anos de 2012 a 2008.

3.6. Programa de P&D da ANEEL

No período de 2007a 2004, foram analisados 25 projetos no âmbito do Programa de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) da ANEEL relacionados diretamente com o tema Equipamentos. Os projetos foram apresentados por um total de 14 empresas proponentes e 19 empresas/entidades executoras. Os investimentos totais no período foram de aproximadamente R\$ 23 milhões. O destaque é para transformadores de instrumento e transformadores de potência que, juntas, levam cerca de 52 % do investimento total. No que tange às empresas proponentes, a Eletronorte destacou-se, seguida da Chesf e TSN. O Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação (Coppe/UFRJ) apresentou 6 projetos

4.0 SELEÇÃO DOS TEMAS MAIS PROMISSORES COM BASE NAS PROSPECÇÕES

Foram selecionados 51 temas mais promissores em termos de desenvolvimento de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D). Espera-se que os investimentos em P&D nos temas apontados possam trazer benefícios para redução dos custos decorrentes das diversas atividades visando: melhoria do desempenho, redução dos impactos ambientais e indicação de novos processos e tecnologias que possam ser utilizados para aumentar a capacidade de transporte do sistema de transmissão planejado e existente.

Como resultado das prospecções realizadas foram elaborados relatórios para cada um dos equipamentos. Esses relatórios continham os temas mais relevantes e foram selecionados com base nos documentos analisados na etapa de prospecção. Os 51 temas julgados mais promissores foram:

4.1 Transformadores de Potência

Suportabilidade dielétrica de transformadores e buchas frente a transitórios ultrarrápidos (VFT – *Very Fast Transient*) em subestações blindadas isoladas a SF6. Aplicação de supercondutores de alta temperatura em transformadores. Desenvolvimento de transformadores de ultra-alta tensão (1000 – 1200 kV). Desenvolvimento de equipamentos e sistemas de diagnósticos objetivando a utilização do método de análise de resposta em frequência (FRA). Aprimoramento das técnicas, métodos de projeto e de fabricação de transformadores de potência. Metodologia para estimativa do tempo de vida remanescente. Aprimoramento das técnicas de avaliação do estado. Revitalização de transformadores de potência existentes. Redução das perdas.

4.2 Materiais Avançados

Para transformadores e reatores, novos materiais estão sendo desenvolvidos, como por exemplo: Aço magnético para núcleos. Formas avançadas de condutores. Isolações hídras de alta temperatura. Desenvolvimento de buchas de alta tensão com corpo condensivo com tecnologia RIP (*Resin Impregnated Paper*). Desenvolvimento em comutadores sob carga, com aplicação crescente de ampolas à vácuo

4.3 Reatores em Derivação

Tecnologias avançadas para a redução de ruídos e vibrações em transformadores e reatores. Atualização e aplicação dos modernos conceitos mecânicos para a especificação, projeto, ensaios e manutenção/operação dos novos transformadores e reatores. Desenvolvimento de reatores controláveis.

4.4 Transformadores de Instrumento – TI

Transformadores de instrumento ópticos. Transformadores de Instrumento aplicados aos sistemas de redes inteligentes (Smart Grid). Especificação e estudos para dimensionamento de transformadores de corrente junto a capacitores em derivação. Estudos para quantificação de solicitações especiais impostas aos transformadores de instrumento.

4.5 Disjuntores

Disjuntores a vácuo em alta tensão. Normas e testes para disjuntores a vácuo. Revitalização dos disjuntores existentes. Disjuntores de 1000 – 1200 kV. Isoladores compósitos para disjuntores, Chaveamento de reatores.

4.6 Seccionadores

Aprimoramento do mecanismo de operação. Funções combinadas disjuntor – seccionador. Vão compacto: montados na mesma estrutura: transformadores de corrente, chave seccionadora e de aterramento, disjuntor, painel de controle e buchas.

4.7 Capacitores Série

Capacitores Série Controláveis e Chaveáveis. Projeto da plataforma isolante. Aprimoramento no processo de identificação de falhas em capacitores série. Aprimoramento dos sistemas de proteção dos capacitores série. Aprimoramento na especificação dos varistores. Atuação dos dispositivos de *by-pass*.

4.8 Capacitores Shunt

Escolha de fusíveis de proteção. Capacitores a seco.

4.9 Dispositivos FACTS

Integração de dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) ao sistema existente. Simulação digital dos dispositivos FACTS, objetivando estudos de sistema.

4.10 Manutenção de Equipamentos

Deteção de vazamento de gás SF6. Uso de sistemas especialistas na manutenção. Uso da técnica de realidade aumentada na manutenção. Uso da Técnica 3D *Laser Scanning* na manutenção.

4.11 Monitoramento de Equipamentos

Monitoramento integrado de subestações. Monitoramento de transformadores, disjuntores, seccionadores, capacitores série e para-raios

5.0 METODOLOGIA DE HIERARQUIZAÇÃO E SELEÇÃO DOS TEMAS PROMISSORES

Identificados os temas mais promissores a partir de prospecções bibliográficas realizadas nas fontes de informação, tornou-se necessário analisar as metodologias que permitissem a sua hierarquização. Neste sentido, foi realizada uma pesquisa sobre as principais metodologias de hierarquização disponíveis na literatura. Dentre as alternativas identificadas, destacaram-se Análise Custo Benefício, Análise de Regressão, Análise Multicritério, Levantamento Documental, Metodologia Delphi, SWOT, Construção de Cenário, Grupo Focal, Survey, Modelos Computacionais de Equilíbrio, Benchmarking, Roadmap, entre outros. Após a análise destas opções, foi escolhida a metodologia Delphi que pode ser utilizada para se obter consenso de opiniões sobre o objeto que se está investigando. Baseia-se na aplicação de questionários, durante sucessivas rodadas a um grupo de especialistas. A cada rodada, os participantes recebem feedback sobre os resultados da rodada anterior.

No caso presente, foram utilizadas duas rodadas de consulta aos especialistas. Uma primeira rodada foi realizada durante seminário realizado em março de 2013 em Brasília, onde foi apresentado para os participantes um questionário com os temas selecionados previamente. Após a análise e consolidação das respostas, foi realizada via internet uma segunda rodada de consulta.

5.1 Resultados da primeira rodada Delphi

Durante o Seminário cada uma das áreas de conhecimento relacionadas aos equipamentos de alta tensão foi contextualizada por especialistas do setor. Participaram da primeira rodada Delphi presencial um total de 99 pessoas. Questionário contendo os temas mais promissores foram entregues aos participantes solicitando o seu preenchimento com a aplicação das seguintes régua:

A primeira régua se referia à avaliação do grau do conhecimento do participante em cada um dos blocos de assunto. Este grau de conhecimento foi posteriormente aplicado como peso para as respostas sobre a importância de cada tema. i) Perito – atualmente se dedica a este assunto com profundidade. ii) Conhecedor – está se tornando um perito, falta alguma experiência, ou já foi um perito há alguns anos, mas se considera pouco atualizado. iii) Familiarizado – conhece o assunto, já leu sobre o assunto e tem opiniões. iv) Não familiarizado – não se enquadra em nenhuma das outras categorias.

A segunda régua foi aplicada a cada um dos temas, onde os participantes indicaram a importância do tema selecionado com vistas à necessidade de maiores investimentos em termos de pesquisa e desenvolvimento. Foi adotada a seguinte definição: grau de importância do tema 0 (nenhuma importância) até o grau 5 (muito importante). Foi sugerido que o participante avaliasse, entre os outros aspectos, aprimoramento das ferramentas de estudos e projeto, aumento do desempenho e confiabilidade, aumento da capacidade de transporte, redução do impacto ambiental, redução de custos dos componentes etc.

A partir do tratamento e análise das informações relativas aos graus de auto avaliação e graus de importância do tema, dos 51 temas apresentados foram identificados 16 temas mais relevantes na visão dos especialistas, conforme relação apresentada abaixo em sequência aleatória, sem nenhuma ordem de prioridade.

Metodologia para estimativa do tempo de vida remanescente de transformadores incluindo o aprimoramento das técnicas de avaliação do estado. Diferentes ferramentas de diagnóstico têm sido propostas por empresas, laboratórios e fabricantes. Usualmente considera-se o histórico do equipamento, os procedimentos de manutenção e a estimativa da sua posição atual em relação ao seu ciclo de vida identificada por meio da realização de diversos testes. São igualmente avaliados os riscos de falhas devido à ocorrência de curtos-circuitos externos, os riscos associados ao carregamento e à temperatura. Estas informações podem, por exemplo, serem fornecidas com dados de entrada aos sistemas *fuzzy*, que adicionam uma incerteza relacionada ao evento e possibilitam a obtenção das curvas de probabilidade, ou ainda podem ser utilizadas as técnicas de Inteligência Artificial e Mineração de Dados. A determinação da vida remanescente é um processo complexo, que se inicia pela avaliação do estado (condição) atual do transformador. O estado pode ser obtido através da aplicação de um conjunto consistente de métodos de diagnósticos e análise estruturada de um conjunto de parâmetros disponíveis de cada um dos transformadores de interesse. Como resultado, as seguintes informações relevantes são determinadas: estado de envelhecimento do sistema de isolamento do transformador, incluindo a estimativa da vida consumida da isolamento ao longo da vida operacional e a expectativa de vida residual correspondente; indicações de risco de falha em conformidade com o seu estado atual; estimativa da capacidade de carregamento; estado de prensagem residual dos blocos de enrolamentos.

Revitalização de transformadores de potência. A revitalização de transformadores de potência é considerada uma alternativa de interesse para a extensão da vida útil de um transformador. Esta alternativa está sendo considerada por muitos usuários (fabricantes e concessionárias), considerando principalmente as seguintes práticas: reduzir a taxa de envelhecimento da isolamento sólida através da secagem da isolamento sólida e/ou secagem ou substituição do óleo isolante; reparo de fontes de formação de gases combustíveis conhecidas e/ou identificadas através da análise de estado; elevar a suportabilidade mecânica a curtos-circuitos através da reprensagem axial dos enrolamentos; elevar a capacidade de carregamento através da elevação da capacidade de resfriamento externo do transformador e/ou substituição dos enrolamentos com isolamento de classe térmica superior; atualização tecnológica, reparo ou substituição de componentes importantes como buchas e comutadores sob carga; substituição de sistemas abertos de preservação de óleo isolante por sistemas fechados com bolsa ou membrana de borracha; reparo de vazamentos e substituição geral de gaxetas por materiais sintéticos modernos.

Redução das perdas em transformadores de potência. Estas perdas podem ser categorizadas em perdas em vazio, perdas em carga e perdas do sistemas de refrigeração. Comparados com os transformadores ainda em operação instalados nos anos 60 e 70, os atuais transformadores têm perdas significativamente menores, que foram obtidas através de melhores materiais e técnicas de montagem. Mesmo assim, pesquisas estão em andamento objetivando reduzir ainda mais as perdas como, por exemplo, melhoria na qualidade do aço (aço

amorfo), aumento da seção do núcleo, uso de condutores continuamente transpostos (CTC). Estas alternativas ainda esbarram no aumento dos custos e limitações de peso e tamanho para o transporte.

Suportabilidade dielétrica de transformadores e buchas frente a transitórios ultrarrápidos (VFT – Very Fast Transient) em subestações blindadas isoladas a SF6. A operação de chaves seccionadoras ou ocorrência de curtos fase terra em subestações isoladas a SF6 podem provocar sobretensões de frente de onda muito íngreme. Este assunto está sendo intensamente estudado, pois tem sido reportado que um grande número de danos aos isolamentos foi provocado por este fenômeno. Estudos de transitórios ultrarrápidos que exigem adequada simulação da subestação e da resposta em frequência do transformador têm sido realizados. Têm sido igualmente propostos dispositivos capazes de gerar sinais de tensão com frente de onda semelhante para teste de suportabilidade de transformadores em laboratórios.

Aprimoramento das técnicas, métodos de projeto e de fabricação de transformadores de potência. O avanço das ferramentas computacionais permitiu a utilização de métodos de simulações 2D e 3D para a otimização, verificação de desempenho e a elaboração do projeto eletromecânico de transformadores de alta tensão. Tendo sido possível: a análise detalhada do desempenho magnético, elétrico, térmico e mecânico de núcleos magnéticos; a elevação da capacidade de simulação para a determinação de perdas adicionais e elevações de temperaturas em enrolamentos e estruturas metálicas (do núcleo e do tanque), minimizando o risco potencial de formação de pontos localizados de sobreaquecimentos e consequente deterioração de componentes isolantes adjacentes e/ou formação de gases combustíveis no óleo isolante; a análise detalhada do desempenho elétrico, térmico e mecânico de sistemas de enrolamentos de transformadores; a determinação da capacidade de carregamento, além da potência nominal de um transformador, considerando variações sazonais do ambiente do local da instalação e do ciclo diário de carga do transformador.

Desenvolvimento de instrumentos e sistemas de diagnósticos objetivando a utilização do método de análise de resposta em frequência (FRA) de transformadores de potência. Esta tecnologia permite a avaliação de desempenho mecânico do transformador por meio da comparação quantitativa, análise e interpretação dos desvios entre as respostas em frequências medidas em dois estados distintos (antes e após transporte; antes e após um curto-circuito; antes e após abalos sísmicos; etc.), sendo um deles o estado de referência. Tipicamente, a resposta de referência é aquela da medição do transformador em fábrica. No entanto, transformadores em operação podem ser caracterizados por meio de uma medição de referência ou através da análise de desvios entre fases ou ainda entre unidades similares de mesmo projeto. Vários métodos de medições no domínio da frequência podem ser utilizados, como por exemplo: impedâncias de entrada; funções de transferência; matriz de admitâncias; etc.

Desenvolvimento de transformadores de ultra-alta tensão (1000 – 1200 kV). A China e Índia, para a expansão e interligação dos sistemas de longa distância, estão efetivamente implantando sistemas de transmissão em ultra-alta tensão em corrente alternada em complementação aos sistemas de transmissão em corrente contínua. No Brasil, ainda não se visualiza a utilização deste nível de tensão. Para a transmissão de grandes blocos de potência a longa distância, têm sido empregados sistemas de corrente contínua em 600 kV (usinas do Rio Madeira) e 800 kV (Usina de Belo Monte). Tem sido reportada a experiência para desenvolvimento dos transformadores de 1000 – 1200 kV, relacionada aos estudos para a especificação, projeto, fabricação, testes de fábrica e de campo, transporte, montagem etc. Os pontos críticos identificados foram: projeto do isolamento, suportabilidade a curto-circuito, desempenho térmico, blindagem a corona e transporte. O enfrentamento destes desafios tem fornecido subsídios para o aprimoramento do projeto e fabricação de transformadores em outros níveis de tensão.

Aplicação de supercondutores de alta temperatura em transformadores. Até décadas atrás, a supercondutividade ocorria apenas em temperatura muito baixa. Posteriormente, foram descobertos materiais que apresentavam esta mesma condição para temperaturas mais alta e ficaram conhecidos como supercondutores de alta temperatura (*High Temperature Superconductor – HTS*). As pesquisas de HTS estão sendo direcionadas para diversos equipamentos de distribuição e transmissão de energia elétrica, como por exemplo cabos, máquinas, limitadores de corrente de curto-circuito, armazenadores de energia magnética (SMES) e transformadores. A aplicação de HTS a transformadores permitirá a fabricação de equipamentos menores e menos pesados, mais eficientes, com menor nível de ruído e maior capacidade de sobrecarga. Permitirá ainda substituir o óleo por gás (nitrogênio), podendo atuar ainda como dispositivo limitador de corrente de curto-circuito. Têm sido reportado avanços tecnológicos no desenvolvimento destes equipamentos, a partir da análise de materiais de segunda geração (YBCO), com possibilidade de redução dos custos envolvidos, além de melhorias quanto aos aspectos de manutenção e controle de qualidade.

Desenvolvimento de transformadores de instrumento ópticos. Os transformadores de instrumento ópticos apresentam algumas vantagens em relação aos convencionais. Pode-se citar ausência de óleo isolante, melhor precisão, eliminação da saturação e peso reduzido. Em contrapartida, apresentam dificuldades de integração com os sistemas de medição, proteção e controle das subestações existente, além de uma possível resistência de utilização por parte dos técnicos das empresas e maior custo. Os dois primeiros itens acredita-se que poderão ser superados em pouco tempo. Com relação ao custo do transformador de instrumento óptico, tem sido noticiado que este seria competitivo dependendo da classe de tensão.

Aprimoramento de transformadores de instrumento aplicados aos sistemas de redes inteligentes (Smart Grid). Enfatizam-se cada vez mais os conceitos de redes inteligentes não só na distribuição de energia, mas também na transmissão e geração. Neste sentido, é crítico o desempenho dos sensores de tensão e corrente, que devem acompanhar os progressos das tecnologias digitais e sistemas de comunicação objetivando a gestão inteligente das redes elétricas. Várias soluções não convencionais de sensores de tensão e corrente têm sido apresentadas, como por exemplo sensores ópticos, bobinas de núcleo de ar (Rogowski), divisores capacitivos e resistivos, soluções híbridas (sensores com dispositivos eletrônicos e sistemas de comunicação). Estes sensores oferecem vantagens como alta precisão, pequeno tamanho, linearidade e potencial menor custo.

Desenvolvimento de reatores em derivação controláveis. Tradicionalmente, os reatores em derivação são utilizados para compensar a capacitância das linhas de transmissão de maneira a limitar as sobretensões durante energização, religamento e rejeição de carga. Por outro lado, esta compensação reativa reduz o SIL (*Surge Impedance Loading*) equivalente da linha, e, dessa forma, os reatores em derivação fixos restringem a transferência de energia dentro de níveis aceitáveis de tensões. No sistema brasileiro, constituído de muitas linhas de longas distâncias operando em diversos níveis de tensão, existem instalados um grande número de reatores fixos nas linhas. Durante principalmente a carga máxima e/ou situações de emergências, a transferência de energia entre os subsistemas exige a instalação de outros equipamentos (capacitores) de compensação para que esta operação possa ser realizada de forma segura. Com base neste conceito, visualizou-se a aplicação de reatores controláveis em lugar dos reatores fixos, de maneira a ser possível operá-los com baixo valor de potência nos períodos de carga máxima e emergências e com alto valor de potência nas situações de carga leve, energização e rejeição de carga. Este tipo de equipamento foi então concebido sobre a ótica dos equipamentos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission System*). Entretanto, os reatores controláveis são equipamentos mais simples, pois podem ser operados considerando a saturação magnética e/ou utilizando disparo de tiristores para o controle da potência. Em âmbito internacional, identificou-se que a China, Rússia e Índia estão aplicando estes reatores com sucesso. Tendo em vista a semelhanças dos sistemas destes países com o sistema brasileiro, principalmente na transmissão de longa distância, julga-se de extrema importância o desenvolvimento deste tipo de equipamento adequado às características do sistema brasileiro e aos critérios de operação e planejamento.

Solicitações impostas aos disjuntores durante chaveamento de reatores. Uma pesquisa internacional realizada no período de 2004-2007, com o envolvimento de 90 empresas de 30 países, levantou indicadores que permitiram concluir que a frequência de falha dos disjuntores a SF6 foi de 0,30 falhas por 100 disjuntores/anos de serviço. O chaveamento de reatores *shunt* foi associado a uma apreciável taxa de falha em comparação aos outros tipos de chaveamento. Por outro lado, experiências vêm demonstrando que os resistores de pré-inserção vêm sendo substituídos com sucesso por chaveamento sincronizado. Isto pode ser comprovado por meio de medições que mostram que a aplicação destes dispositivos reduz de forma significativa os desgastes nos contatos dos disjuntores em função do tempo de exposição dos contatos à corrente de arco. Neste sentido, é esperada uma redução de falhas em disjuntores que manobram reatores.

Revitalização dos disjuntores existentes. Desenvolvimentos, metodologias e técnicas têm sido indicados visando fazer melhor uso dos disjuntores existentes. Neste contexto, se insere análise de deterioração dos equipamentos e materiais, ciclo de vida, vida residual, extensão da vida útil, obsolescência, gestão dos ativos, monitoramento, manutenção preventiva. Procura-se, enfim, estabelecer as melhores práticas objetivando fornecer subsídios para a tomada de decisão com relação à permanência dos equipamentos no sistema dentro dos parâmetros requeridos de segurança, desempenho, economia e impacto ambiental.

Desenvolvimento de disjuntores a vácuo de alta tensão. Em função das características do gás SF6, quando este é liberado na atmosfera, contribui para redução da camada de ozônio. Embora este efeito seja muito pequeno quando comparado a outros gases, enfatiza-se cada vez mais os processos de fabricação para reduzir as possibilidades de vazamento, e se intensificam as pesquisas para substituição do SF6. Neste sentido, os disjuntores a vácuo se apresentam como uma alternativa para disjuntores de alta tensão, considerando que este tipo de disjuntor já vem sendo empregado com sucesso na área de distribuição. Têm sido apontados desenvolvimentos desses equipamentos na faixa de tensão de 72 kV a 245 kV.

Monitoramento integrado de subestações. Dispositivos de monitoramento para equipamentos em subestações de alta tensão estão no mercado há várias décadas. Entretanto, estes dispositivos vêm sendo aplicados individualmente, equipamento por equipamento. Atualmente existe a necessidade de integração dos sinais provenientes destes dispositivos, tendo em vista principalmente a aplicação da tecnologia de rede inteligente (*Smart Grid*). O monitoramento dos equipamentos de uma subestação e a integração dos sinais decorrentes são primordiais para a implantação desta nova concepção da rede. Para o estabelecimento adequado de um projeto de monitoramento de uma subestação, é necessária a realização de estudos de viabilidade técnica econômica para definir a arquitetura de integração para a aquisição, análise e distribuição de dados. Modelos matemáticos devem ser desenvolvidos com a finalidade de análise e tratamento dos dados coletados para fins de diagnósticos e prognósticos, facilitando e otimizando a programação de manutenções de cada equipamento monitorado. Atualmente existem diversos sistemas de monitoramento que oferecem excelentes aplicativos de coleta e armazenamento de dados. Entretanto ainda são necessários aprimoramentos nos sistemas de diagnóstico, em que estes dados serão tratados e analisados, objetivando fornecer subsídios para a gestão dos ativos principalmente para os processos de manutenção e determinação da vida útil..

Uso de sistemas especialistas na manutenção de equipamentos. Na área de manutenção, este tipo de sistema está sendo largamente utilizado, principalmente devido à rotatividade e aposentadoria de empregados com grande experiência nas instalações existentes. A base de dados relacionada ao desempenho dos equipamentos pode ser aprimorada com a inclusão dos problemas detectados e das soluções encontradas ao longo do tempo de operação. Esta complementação pode ser fornecida pelos especialistas a partir da indicação de sinais observados e das interpretações inferidas. Com esta base de conhecimento, será possível analisar a situação atual e verificar a existência de situação equivalente, quando a solução indicada passaria imediatamente a ser analisada visando a sua aplicação e, assim, reduzir o tempo de tomada de decisão.

5.2 Resultados da segunda rodada Delphi

Para a segunda rodada Delphi (consulta via Internet) foi elaborado um questionário com os 16 temas mais relevantes indicados no item anterior extraídos da primeira rodada Delphi presencial. Porém, desta vez foi solicitado aos respondentes que avaliassem os itens considerando as seguintes dimensões: i) Expansão do Sistema atual ii) Melhoria do Sistema Existente iii) Custos iv) Desempenho do Sistema v) Meio Ambiente.

Esta segunda rodada estava em pleno andamento na época do encaminhamento deste informe e portanto ainda não temos os resultados finais, que serão apresentados durante o XXII SNPTEE.

6.0 CONCLUSÃO

Como resultado das prospecções realizadas, foram selecionados 51 temas mais promissores em termos de desenvolvimento de projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) para equipamentos de alta tensão. Identificados e classificados os temas mais promissores, seguiram-se às atividades de hierarquização. Foi utilizando a metodologia Delphi e com base nas respostas dos especialistas, foi possível selecionar 16 temas, objetivando estabelecer uma ordem de prioridade dos mais promissores. Dessa forma, espera-se que os investimentos em P&D nos temas apontados possam trazer benefícios para redução dos custos decorrentes das diversas atividades para implantação de equipamentos, com melhoria do desempenho, redução dos impactos ambientais e indicação de novos processos e tecnologias que possam ser utilizados para aumentar a capacidade dos sistemas de transmissão existentes e aplicados na expansão do Sistema Elétrico.

7.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Maduro-Abreu A., Saavedra A. R., Araújo J. A., Murça L. B., Fragelli R. R., Frontin S. de O., Rego V. B., Prospecção e Hierarquização de inovações Tecnológicas Aplicadas a Linhas de Transmissão, Editora Goya Brasília, 2010.

(2) Maduro-Abreu A., Saavedra A. R., Araújo J. A., Murça L. B., Fragelli R. R., Frontin S. de O., Rego V. B., Mendonça G.P., Prospecção e Hierarquização de inovações Tecnológicas Aplicadas a Linhas de Transmissão, XXI SNPTEE , Florianópolis. 2011.

8.0 DADOS BIOGRÁFICOS



SERGIO DE OLIVEIRA FRONTIN: Mestrado em Sistemas de Potência (1971) pelo Rensselaer Polytechnic Institute – Troy (Estados Unidos), graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Ex-professor da Pontifícia Universidade Católica do RJ (1972 a 1977), Instituto Militar de Engenharia (1978) e Universidade Estadual do RJ (1980 a 1986). Trabalhou em Furnas Centrais Elétricas S.A, Itaipu Binacional, Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (Cepel) e Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel). Atualmente é professor colaborador da Universidade de Brasília e consultor nas áreas de Energia.

ANTONIO C. P. BRASIL JUNIOR. Graduado em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal do Pará (1982) com mestrado em Engenharia Mecânica pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro (1985). Seu Doutorado na área de Thermique et Energetique foi obtido na Ecole Centrale de Lyon - França em 1992. Atualmente é professor associado da Universidade de Brasília, com lotação no Departamento de Engenharia Mecânica e no Centro de Desenvolvimento Sustentável. Na área de ciências mecânicas os principais temas de interesse são: Elementos finitos em fluidos, escoamentos turbulentos e escoamentos ambientais. Alternativamente atua na área de desenvolvimento sustentável, com interesses nos modelos para o desenvolvimento nos biomas amazônia e pantanal, explorando temáticas de pesquisa que envolvam de maneira interdisciplinar a sustentabilidade de opções tecnológicas.

ALEXANDRE MADURO-ABREU. Professor Adjunto do Departamento de Administração, da Universidade de Brasília - UnB. Graduado em Administração de Empresas, Especialista em Gestão e Marketing do Turismo (CET/UnB), Mestre e Doutor em Desenvolvimento Sustentável (CDS/UnB). Desenvolve pesquisas nas seguintes áreas: consumo, valores, desenvolvimento sustentável, gestão e planejamento local, desenvolvimento rural e energia.

JOSÉ ALEXANDER ARAÚJO. Professor Adjunto 4 do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (UnB). Engenheiro Mecânico pela Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Mestre em Engenharia Mecânica pela UnB. Ph.D em Ciências da Engenharia pela University of Oxford – UK. Pesquisador de produtividade nível 2 do CNPq. Membro fundador e integrante do Comitê Executivo do Comitê de Mecânica da Fratura, Fadiga e Integridade Estrutural da Associação Brasileira de Ciências Mecânicas-ABCM. Membro correspondente do Working Group do CIGRE Internacional WG-B2.49 "Safe Design Tensions for Conductors Fitted with Elastomer Cushioned Suspension Units". Membro afiliado da Academia Brasileira de Ciências. Membro do Sub-Comitê Nacional da Cigré (CIGRE SCB2 WG11).

BIANCA MARIA SALATIEL MATOS DE ALENCAR, Engenheira Eletricista formada pela Universidade de Brasília – UnB (2009) e Mestre em Engenharia de Sistemas Eletrônicos e de Automação (2012) pela mesma instituição. Trabalhou na Companhia Energética de Brasília – CEB Distribuição (2011-2012) na área de planejamento elétrico. Atualmente é analista de infraestrutura no Ministério de Minas e Energia.

CLAUDIR AFONSO COSTA, Engenheiro Eletricista formado pelo Instituto de Educação Superior de Brasília e Mestrando em Engenharia Elétrica na Universidade de Brasília. Trabalhou na Companhia Energética de Minas Gerais e Agência Nacional de Energia Elétrica. Atualmente é Analista de Infraestrutura no Ministério da Integração Nacional, onde atua na Gestão de Contratos de obras eletromecânicas do projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional.

CLAUDIO A. FRATE, é Ph.D em Desenvolvimento Sustentável, pela Universidade de Brasília, onde também fez mestrado. Graduou-se em engenharia elétrica – ênfase sistemas de potência - pela Universidade de Fortaleza. Foi Visiting Scholar na Texas Agriculture and College Station - USA. É Pesquisador Associado da UnB onde pesquisa as pontes criadas entre a sociedade, a economia e a natureza para o aproveitamento de fluxos energéticos da água, do vento e da biomassa.

LAURIS RODRIGUES PERFEITO, Engenheira Eletricista formada pela Universidade de Brasília – UnB (2012). Estagiou na Themag Engenharia e Gerenciamento Ltda (2011-2012) na Engenharia do Proprietário do projeto do Bipolo 1 de $\pm 600\text{kV}$ CC da Transmissão do Rio Madeira. Atualmente atua como projetista na área de Sistemas de Proteção, Controle e Automação de Subestações em Alta Tensão na Engevix Engenharia S.A.

LEONARDO BRANT MURÇA, Engenheiro Mecânico pela Universidade de Brasília (UnB-2009), Mestre em Ciências Mecânicas (UnB-2011). Desenvolveu pesquisas na área transmissão de energia elétrica com foco para o comportamento mecânico de cabos condutores. Atualmente trabalha no setor de óleo & gás como engenheiro de desenvolvimento de produtos.

RAFAEL FERNANDO MENDONÇA DE ALENCAR, Engenheiro Mecânico pela Universidade de Brasília - UnB em 2011. Ex-estagiário na Petrobras na Gerência de Grandes Consumidores (GRCCO). Trabalha e desenvolve estudos com o grupo de Fadiga, Fratura e Materiais (GFFM-UnB) na área de fadiga ocasionada por vibrações eólicas em linhas de transmissão. Atualmente é mestrando em integridade de materiais de engenharia pela UnB.

THAMISE SAMPAIO VASCONCELOS VILELA, Engenheira Mecânica pela Universidade de Brasília - UnB em 2011. Ex-estagiário no Centro de Apoio ao Desenvolvimento Tecnológico (CDT). Foi pesquisador bolsista na área de fadiga por fretting na École Centrale de Lyon, França. Trabalha e desenvolve estudos com o grupo de Fadiga, Fratura e Materiais (GFFM-UnB) em pesquisas associadas à falha por fadiga provocada por vibrações eólicas em linhas de transmissão. Atualmente é aluna de mestrado em Ciências Mecânicas na UnB.

GLIENDER PEREIRA DE MENDONÇA, Pós Graduado em Gestão de Negócios de Energia Elétrica pela FGV - Fundação Getúlio Vargas e em Direito dos Contratos pela UniDF – Centro Universitário do Distrito Federal, atuando desde 2001 no segmento de Energia Elétrica. Fez parte do quadro de funcionários da Aneel e Eletronorte e, atualmente, ocupa das funções de Gerente de Relações Institucionais e Regulatórias e Gerente dos Programas de Pesquisa e Desenvolvimento da TAESA - Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A.

PAULO VOLLU CYRIACO, Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal Fluminense em 2006 e pós-graduado no MBA em Gestão de Negócios pelo Ibmecc Business School em 2013. Atualmente é Coordenador Técnico na área de subestações e equipamentos da Gerência de Engenharia de Operação e Manutenção, da TAESA - Transmissora Aliança de Energia Elétrica S.A.