



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

BR/GTM/23  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO - XIII**

**GRUPO DE ESTUDO DE TRANSFORMADORES, REATORES, MATERIAIS E TECNOLOGIAS EMERGENTES -  
GTM**

**APLICAÇÃO DE METODOLOGIAS DE DIAGNÓSTICO DE FALHAS EM TRANSFORMADORES ISOLADOS A  
ESTER NATURAL**

**Neffier A. Gómez (\*)**  
Universidade Federal do Paraná

**Helena M. Wilhelm**  
Diagno

**Cleusomir C. dos Santos**  
Eletrobras Eletronorte

**Guilherme B. Stocco**  
Lactec

**RESUMO**

Em ésteres naturais isolantes (ENI's) com diferentes composições químicas e teores de água e no óleo mineral isolante (OMI) gerou-se gases dissolvidos pelo envelhecimento acelerado em laboratório sob condições de estresse térmico e elétrico. Pela técnica de análise de gases dissolvidos (AGD) verificou-se maior geração dos gases etano e de acetileno nos ensaios de estresse térmico e elétrico, respectivamente. Também foram aplicadas metodologias de diagnóstico de falhas aplicadas para OMI como os modelos de Duval, Rogers, IEC 60599, Dornenburg e Cigre. Os resultados preliminares indicaram a possibilidade da emissão de diagnóstico de falhas em equipamentos isolados a ENI's pela AGD.

**PALAVRAS-CHAVE**

Análise de gases dissolvidos, emissão de diagnóstico, métodos de interpretação, ésteres naturais isolantes, AGD.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A manutenção preditiva é a metodologia mais rentável do ponto de vista econômico aplicada a transformadores. Consiste em acompanhar os diversos componentes de um sistema e intervir quando verificado que estes se encontram na iminência de falhar, evitando a substituição precoce de equipamentos que ainda apresentem boas condições de funcionamento. Uma das técnicas utilizadas para realizar este tipo de manutenção é a cromatografia em fase gasosa. Com a cromatografia em fase gasosa é possível identificar e quantificar os gases dissolvidos presentes no líquido isolante que são originários de falhas ou defeitos de funcionamento do transformador, como ocorrência de pontos quentes por mau contato ou degradação do papel isolante, sobreaquecimento generalizado devido ao excessivo envelhecimento do óleo ou papel isolante e descargas elétricas de alta ou baixa energia devido às falhas do isolamento (1).

Atualmente não existem procedimentos de manutenção preditiva normatizados para diagnosticar defeitos em equipamentos isolados com ésteres naturais, ou óleo vegetal, pela análise de gases dissolvidos (AGD). Sabe-se que os gases chave gerados durante a degradação do éster natural isolante, são os mesmos gerados em equipamentos isolados a óleo mineral, o que permite concluir, num primeiro momento, que as mesmas metodologias de emissão de diagnóstico comumente utilizadas para óleo mineral podem ser aplicadas aos ésteres naturais isolantes (ENI's) (2).

O presente trabalho teve por objetivo geral gerar, identificar e quantificar gases dissolvidos em ENI's de diferentes bases, com baixo e alto teor de ácido oleico, a partir de ensaios de envelhecimento acelerado. Avaliar a

(\*) BR-116-KM 98, nº 8813 – Jardim das Américas – CEP 81531-980 Curitiba, PR, – Brasil  
Tel: (+55 41) 3361-6200 – Fax: (+55 41) 3361-6007 – Email: harvy2g@gmail.com

confiabilidade de aplicação de metodologias de diagnóstico de falhas usadas para óleo mineral isolante (OMI) para diagnosticar falhas em equipamentos elétricos isolados a ENI foi um dos objetivos específicos da pesquisa.

## 2.0 - DESENVOLVIMENTO DA PESQUISA

### 2.1 Parte experimental

#### 2.1.1 Materiais

Três ENI's e um isolante mineral foram utilizados no presente trabalho. Os ENI's BIOVOLT A (BA) e BIOVOLT HW (BHW) foram adquiridos da MINERALTEC e o ENVIROTEMP FR3 (FR3) foi adquirido da Cooper Power System. O BHW é formulado a partir de um óleo com alto conteúdo de ácido oleico, o BA é proveniente do óleo de milho e o FR3 é formulado a partir de óleo de soja. O OMI tipo AV-60 foi adquirido da Petrobras.

#### 2.1.2 Caracterização físico-química dos óleos

Os diferentes tipos de ENI's e o OMI foram caracterizados de acordo com as normas vigentes, ABNT NBR 15422 e Resolução N. 36 da ANP, respectivamente.

#### 2.1.3 Ensaios de simulação de estresse térmico e elétrico

Os ENI's entregues pelos fornecedores apresentavam cerca de 100 ppm de água. Para diminuir o teor de água para 30 ppm foi necessário secar os óleos. A secagem foi realizada com sílica. Primeiro a sílica foi seca em estufa por 24 horas a 100 °C para eliminar o excesso de umidade. Depois foi pré-aquecida num IV 2002-Analisador de umidade por infravermelho, marca GEHAKA, por 30 minutos e acondicionada num dessecador. Essa sílica seca foi adicionada aos ENI's, sob agitação constante, em recipientes que foram depois fechados. Foram investigados óleos com teores de água de 30, 200 e 400 ppm (ver Tabela 1). Esse aumento no teor de água do óleo foi obtido pela sua exposição à umidade do ambiente até atingir o teor de água desejado. O controle do teor de água foi realizado pelo método do Karl Fisher de acordo com a norma ABNT NBR 10710 - Método B. O OMI foi utilizado conforme recebido, com 17 ppm de água.

TABELA 1 - Teor de água nos ENI's utilizados nos ensaios.

TEOR DE ÁGUA (ppm)	OBSERVAÇÃO
30	Teor de água geralmente encontrado no óleo no enchimento do transformador.
200	Teor de água máximo admitido no óleo em equipamento novos, após contato e antes da energização (1).
400	Teor de água máximo admitido no óleo para provocar uma investigação no transformador em serviço (1).

#### a. Ensaios de simulação de estresse térmico (sobreaquecimento) nos óleos

A quantidade e o tipo de gás encontrado no óleo podem indicar a ocorrência de um defeito incipiente no equipamento devido à decomposição do líquido isolante pela ação do calor. Para avaliar o efeito do sobreaquecimento dos ENI's na formação de gases dissolvidos foi realizado um experimento acelerado em laboratório. Para tanto, foram usados 200 mL de óleo inseridos em frascos de vidro, nos quais foi borbulhado nitrogênio por 5 minutos para diminuir a concentração de oxigênio no óleo. Os frascos contendo as amostras dos ENI's foram fechados e mantidos em estufa, a uma temperatura de 150 °C, por 551 horas. Após esse intervalo de tempo, os frascos foram retirados da estufa, esfriados, abertos e coletada uma amostra de 50 mL, com uma seringa de vidro, para análise de ADG para avaliar a formação dos gases gerados nos óleos pela ação do estresse térmico. A análise de gases dissolvidos foi realizada por cromatografia em fase gasosa, de acordo com o procedimento descrito na norma ASTM D3612.

#### b. Ensaio de simulação de estresse elétrico nos óleos

Este ensaio foi realizado com o objetivo de avaliar a formação de gases nos ENI's, com diferentes teores de umidade (ver Tabela 1), sob ação de estresse elétrico, visando simular seu comportamento em condições de aplicação de descargas em transformadores em operação. Para tanto, a amostra de óleo foi submetida ao estresse elétrico pela aplicação de doze (12) descargas, utilizando para tanto dois eletrodos

de configuração plana com um gap de 2,5 mm/mm, em concordância com a norma ABNT NBR 6869 em um equipamento de rigidez dielétrica marca BAUR DTA.

## 2.2 Análise dos resultados

Durante sua função como isolante, os óleos geram gases que vão se dissolvendo no líquido. Os gases que são gerados pelo fluido isolante apresentam um maior nível ou concentração dependendo do estresse ao qual é submetido. Esta concentração do gás pode ser correlacionada com o tipo de falha que acontece no equipamento elétrico quando em serviço. Os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos a partir de simulações, feitas em laboratório, das falhas mais comuns que um transformador pode apresentar. A tentativa foi avaliar se com a aplicação dos métodos existentes, usados para avaliar o OMI, seria obtido no diagnóstico o tipo de falha simulado em laboratório. Para tanto, foram usados os gases gerados nos ENI's durante os testes de simulação, avaliando-se também a influência do teor de água do óleo na formação dos gases dissolvidos.

### 2.2.1 Simulação de estresse térmico ou sobreaquecimento

#### a. Análise da viscosidade

O ensaio de sobreaquecimento dos óleos isolantes foi acompanhado pelo monitoramento da viscosidade cinemática (cSt), na temperatura de 40 °C.

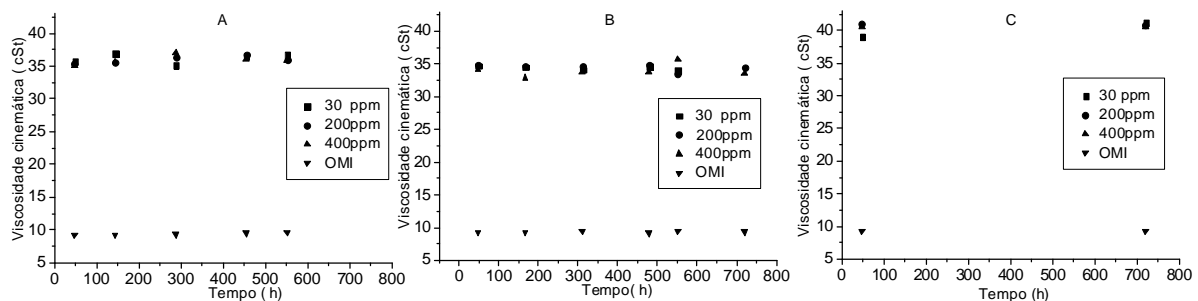


FIGURA 1 – Efeito do sobreaquecimento na viscosidade cinemática (a 40°C) por 551, 719 e 479 h para os ENI's: (A) FR3, (B) BA e (C) BHW, respectivamente, com teores de água próximo de 40, 200 e 400 ppm. O ( ▼ ) OMI foi usado para avaliar comparativamente o envelhecimento de cada um dos ENI's.

É possível observar que até o final do ensaio de sobreaquecimento, a viscosidade não apresentou um aumento significativo, além disso, o teor de água não influenciou esse parâmetro nas condições experimentais utilizadas. Esses dados estão de acordo com as conclusões de Wilhelm e colaboradores (3) que mostraram que o parâmetro que mais afeta a viscosidade é a concentração de oxigênio. Como nesse trabalho foram usados frascos fechados, o efeito do oxigênio na degradação do óleo não foi significativo. No caso do OMI, a viscosidade também não mudou de forma significativa durante o ensaio de sobreaquecimento.

#### b. Análise dos gases

Na Figura 2 são mostrados os gases gerados nos óleos após aquecimento por mais de 500 horas. Os resultados encontrados mostraram que o óleo FR3 apresentou muito mais gás etano dissolvido em comparação ao óleo BA, e, de uma forma geral, a concentração de gases gerados no óleo FR3 aumentou com o aumento do teor de água. Os óleos FR3, BA e BHW são formulados a partir de diferentes matérias primas e pequenas variações nas concentrações dos gases, observadas para os diferentes ENI's, podem ser, possivelmente, atribuídas a formulação dos óleos (tipo de matéria prima e aditivos). Segundo a literatura, o estresse térmico deveria gerar o gás etileno (1) em uma maior concentração, mas nos ensaios simulados em laboratório para o OMI e para os ENI's, isto só aconteceu para o BHW. Outros autores também identificaram maiores concentrações dos gases etano e metano na degradação do óleo tipo vegetal a qual foi atribuída à ocorrência de falhas de menor temperatura, as quais não excedem os 150 °C (4). Comparativamente ao OMI, nos ENI's é gerado muito mais etano, mostrando que este gás apresenta maior correlação com os triacilgliceróis (moléculas dos ésteres vegetais) do que com os hidrocarbonetos do OMI durante o processo de degradação térmica. Por outro lado, no OMI é gerado muito mais metano em relação aos outros gases chaves. A informação encontrada nestes ensaios tem concordância com estudos realizados por outros autores que fizeram comparações semelhantes entre os gases gerados e dissolvidos no OMI e no FR3, sob condições de estresse térmico a 120 °C (5).

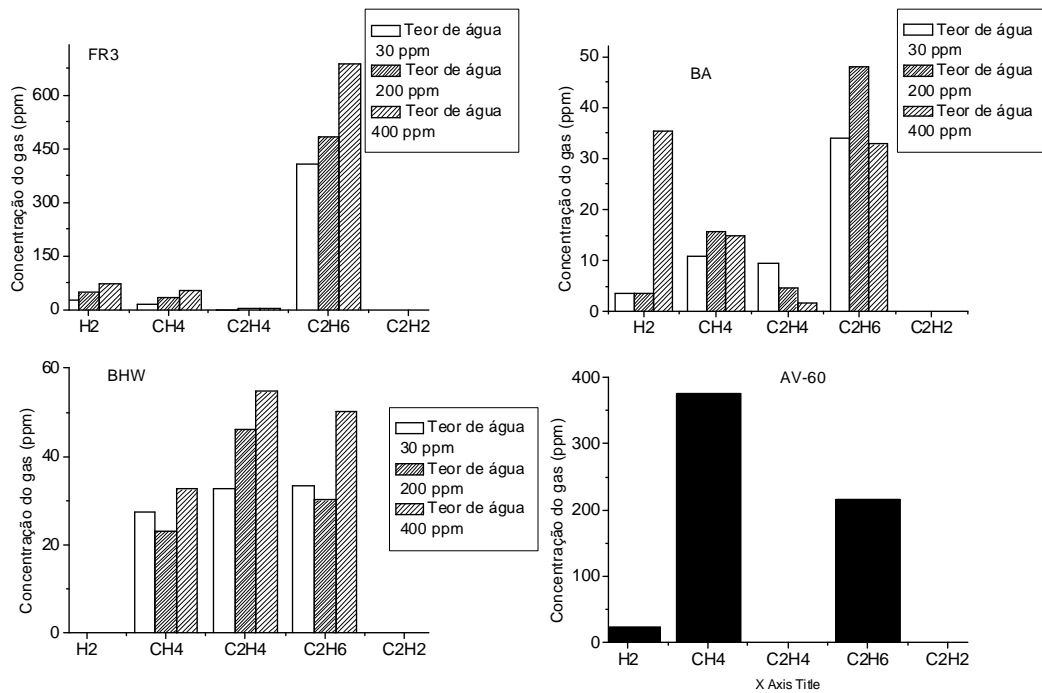


FIGURA 2 – Gases gerados nos ENI's e OMI em função do teor de água no óleo após submissão ao ensaio de estresse térmico.

### 2.2.2 Simulação de estresse elétrico

Para esse tipo de ensaio foram obtidos os dados apresentados na Figura 3.

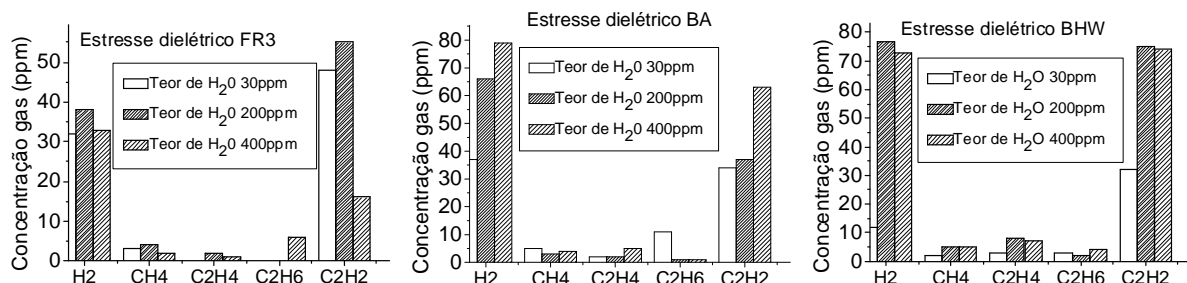


FIGURA 3 – Gases gerados nos ENI's e OMI em função do teor de água no óleo após submissão ao ensaio de estresse elétrico.

Os ensaios feitos com cada um dos isolantes vegetais mostrou a geração dos mesmos gases que são utilizados na análise de falhas elétricas no monitoramento dos óleos de tipo mineral isolante, prevalecendo a formação dos gases chaves acetileno e hidrogênio. A concentração desses gases aumentou com o aumento do teor de água em cada óleo. Dados similares foram encontrados na literatura para o FR3 (4), onde os autores atribuíram esse efeito à maior facilidade de movimento das cargas, provenientes dos eletrodos, pelas moléculas de água quando presentes no líquido isolante. É importante observar que os gases chaves gerados neste ensaio mostraram que para os ENI's o acetileno é o gás chave que vai indicar um defeito por descargas parciais ou arco elétrico, gás que, segundo a literatura, também indica falhas por defeitos elétricos na análise de equipamentos isolados a OMI (4). Para esse tipo de estresse, o gás etano, que foi o gás formado em maior concentração no ensaio de estresse térmico (ver Figura 2), é formado em concentração muito baixa em relação aos outros gases gerados.

### 2.2.3 Aplicação métodos de diagnostico de falhas

#### a. Estresse termico

No caso do ensaio de estresse térmico, foram obtidos nove diagnósticos acertados para os ENI's a partir da aplicação dos diferentes métodos de diagnóstico, tradicionalmente utilizados para OMI, em relação ao defeito

induzido no envelhecimento térmico realizado. Desses nove diagnósticos acertados a maioria foi obtida pela aplicação do triângulo de Duval (~90%) e de Rogers (~60%) (ver Tabela 2). Os métodos de Doernenburg e da IEC 60599 foram os que forneceram os menores números de acertos, resultados semelhantes foram observados em uma pesquisa feita por Muhamad e colaboradores (6) ao investigarem o óleo FR3. Para o OMI o método da IEC 60599 apresentou melhor resultado, pois as outras metodologias de diagnóstico falharam na predição do tipo de defeito induzido pelo ensaio de estresse térmico. O método CIGRE não deu informação em relação à falha simulada, sendo portanto, o menos indicado dentre os métodos testados.

TABELA 2 – Diagnóstico de defeito obtido para os ENI's após submissão ao ensaio de estresse térmico em recipiente fechado.

Óleo	Teor de água (ppm)	Tipo de modelo e diagnóstico obtido				
		Dornenburg	Rogers	IEC60599	Duval	Cigre
FR3	30	Não definido	Normal	Não definido	Falha térmica <300°C	Degradação de celulose
	200	Não definido	Normal	Não definido	Falha térmica <300°C	Não definido
	400	Não definido	Normal	Não definido	Falha térmica <300°C	Degradação de celulose
BA	30	Falha térmica	Falha térmica 150°C -300°C	Falha térmica <300°C	Falha térmica 300°C-700°C	Não definido
	200	Falha térmica	Falha térmica 150°C -300°C	Falha térmica <300°C	Falha térmica 300°C-700°C	Degradação de celulose
	400	Não definido	Normal	Não definido	Falha térmica <300°C	Não definido
BHW	30	Falha térmica	Falha térmica 150°C -300°C	Falha térmica <300°C	Falha térmica T>700°C	Não definido
	200	Falha térmica	Falha térmica 300°C-700°C	Falha térmica 300°C-700°C	Não definido	*Falha térmica *Não definido
	400	Falha térmica	Falha térmica 300°C-700°C	Falha térmica 300°C-700°C	Falha térmica T>700°C	*Falha térmica *Não definido
OMI	17	Não definido	Não definido	Falha térmica <300°C	Não definido	Não definido

#### b. Estresse elétrico

Para os ensaios de simulação do estresse elétrico, foram obtidos nove diagnósticos acertados para cada uma das quatro metodologias utilizadas (Tabela 3). O método do triângulo de Duval apresentou uma predição correta de 89% com relação ao tipo de defeito induzido pelo ensaio realizado em laboratório. O método de Rogers apresentou a maior incoerência na predição do defeito induzido em laboratório (22%). As técnicas de Dornenburg e IEC 60599 acertaram em 44 e 78 %, respectivamente, o tipo de defeito induzido.

É importante mencionar que os métodos de diagnóstico foram criados a partir de levantamentos estatísticos e que, em geral, os acertos dos métodos para o OMI estão ao redor de 80%. Por conta disso, em algumas situações foi obtido o diagnóstico de “não definido”. No caso do método CIGRE foram observados erros na interpretação do diagnóstico, pois em alguns dos resultados a falha indicada foi por defeito térmico quando na verdade foi simulado o estresse elétrico.

TABELA 3 – Diagnóstico de defeito obtido para os ENI's, após submissão ao ensaio de estresse elétrico.

Óleo	Teor de água (ppm)	Tipo de modelo e diagnóstico obtido				
		Doernenburg	Rogers	IEC 60599	Duval	Cigre
FR3	30	Não definido	Não definido	Descarga parcial	Não definido	*Descarga alta energia *Descarga parcial *Falha térmica *Degradação de celulose
	200	Descarga parcial	Descarga parcial (baixa energia)	Descarga (baixa energia)	Descarga (baixa energia)	*Descarga alta energia *Falha térmica *Degradação de celulose
	400	Descarga parcial	Descarga (baixa energia)	Descarga (baixa energia)	Descarga (baixa energia)	*Descarga alta energia *Falha térmica *Degradação de celulose
BA	30	Descarga parcial	Não definido	Não definido	Descarga (baixa energia)	*Descarga alta energia *Degradação de celulose
	200	Não definido	Não definido	Descarga parcial	Descarga (baixa energia)	*Descarga alta energia *Descarga parcial *Falha térmica *Degradação de celulose
	400	Não definido	Não definido	Descarga parcial	Descarga (baixa energia)	*Descarga alta energia *Descarga parcial *Falha térmica *Degradação de celulose
BHW	30	Descarga parcial	Não definido	Não definido	Descarga (baixa energia)	*Descarga alta energia *Degradação de celulose
	200	Não definido	Não definido	Descarga parcial	Descarga (baixa energia)	*Descarga alta energia *Descarga parcial *Falha térmica *Degradação de celulose
	400	Não definido	Não definido	Descarga parcial	Descarga (baixa energia)	*Descarga alta energia *Descarga parcial *Falha térmica *Degradação de celulose

### 3.0 - CONCLUSÃO

Os ensaios de estresse térmico mostraram que o parâmetro da viscosidade não muda de forma significativa quando o ENI estiver acondicionado em recipientes fechados. Esta informação é importante na utilização do ENI em equipamentos elétricos, porque em sistemas fechados a convecção do óleo e, conseqüentemente, a função de refrigeração, é preservada.

Segundo a análise de gases dissolvidos, aplicada aos resultados obtidos nas simulações de falhas, os hidrocarbonetos gerados em maior concentração nos ENI's nos ensaios de estresse térmico e elétrico foram o etano e o acetileno, respectivamente. Além disso foi observado que a quantidade de gás aumentou com o aumento do teor de água no líquido isolante.

No caso dos métodos de diagnóstico aplicados na interpretação das falhas dos ensaios simulados em condições de estresse térmico e elétrico, o resultado indicou que, de forma preliminar, é possível a emissão de diagnóstico de falhas em equipamentos isolados com ENI pela AGD. Dos métodos avaliados neste estudo, o melhor método, baseado no número de diagnósticos acertados com relação ao tipo de defeito simulado nas condições de estresse térmico e elétrico, foi o triângulo de Duval.

### 4.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) C57.104.2008. IEEE guide for interpretation of gases generated in OIL-immersed transformer s.l. : The institute of electrical and electronic engineers , 1992. p 27.

(2) N. Gómez, H. Wilhelm, C. C. Santos, G. Stocco. Aplicação de metodologias de diagnóstico de falhas em transformadores isolados a óleo vegetal a partir da análise de gases dissolvidos. Joinville : Congresso Brasileiro de engenharia e ciência dos materiais CBECIMAT, 4-8 de Novembro 2012.

- (3) H. Wilhelm, L. Tulio, R. Jasinski, G. Almeida. Aging markers for in-service natural ester-based insulating fluids. Dielectrics and electrical insulation, IEEE transactions on. Vol 18, Issue 3 June 2011. p.714-719.
- (4) N. Muhamad, B.Pjung and T Blackburn. Dissolved gas analysis for common transformer faults in soy seed-based oil. IET electric power application, 2011, p. 133-142).
- (5) C. Perrier, M. Marugan. DGA comparison between ester and mineral oils. Dielectric liquids ( ICDL) , IEEE international conference on dielectric liquids. Massy, France. June 26-30 2011, p. 1-4.
- (6) N. Muhamad, B. Pjung, T. Blackburn. Dissolved gas analysis of overheating fault in bio-degradable transformer oil. s.l. : Power engineering conference AUPEC Australasian Universities, 2008.p 14-17.

## 5.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Neffér Gómez nasceu em Bolívar Cauca, na Colômbia, fez graduação em Química -na Universidade del Valle (UV) no ano de 2005. Mestrando da UFPR na área de Engenharia e Ciências dos Materiais (PIPE), sendo bolsista do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC. Atua na linha de pesquisa de fluidos isolantes e biodiesel. Tem experiência na produção de novos materiais a base de polímeros.



Helena Maria Wilhelm é graduada em Química pela UFPR, Mestre pela UFSC, Doutora pela UNICAMP. Atua como pesquisadora e coordenadora de projetos P&D&I nas áreas de química, materiais e meio ambiente com ênfase em fluidos isolantes, no DIAGNO, LACTEC, MINERALTEC e ICT. É bolsista de Produtividade Desen. Tec. e Extensão Inovadora do CNPq desde 2006, e professora de pós-graduação dos programas PRODETEC (LACTEC) e PIPE (UFPR).

Cleusomir Carvalho dos Santos é graduado em Engenharia Elétrica e Eletrônica pela PUCMG, com pós graduação em Física pela UCB e mestrado em Engenharia Elétrica pela UnB. Atua como engenheiro na ELETROBRAS ELETRONORTE desde 06/07/1989, na área de engenharia de manutenção elétrica de equipamento de alta tensão de subestação.

Guilherme B Stocco é engenheiro Químico pela Pontifícia Universidade Católica (PUC) do Paraná e possui mestrado na área de Engenharia e Ciência dos Materiais (PIPE) da UFPR. Atualmente é pesquisador do Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento – LACTEC, professor no curso de Tecnologia em Processos Químicos e Tecnologia em Polímeros das Faculdades de Tecnologia Tupy (FTT) e Professor no curso de Engenharia de Produção das Faculdades Padre João Bagozzi. Tem experiência na área de fluidos isolantes e lubrificantes, com ênfase em Processos Químicos, atuando principalmente nos seguintes temas: regeneração de óleos isolantes, recuperação de agentes adsorventes e destruição de PCBs. Atua na gestão de projetos de P&D&I com a supervisão e coordenação de equipes multidisciplinares.