

**Universidade Federal de Campina Grande**  
**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**  
**Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica**

# **Relatório de Estágio**

Arimatéia Araújo Nunes  
Matrícula: 20621672

Campina Grande, Julho de 2009.

**Universidade Federal de Campina Grande**  
**Centro de Engenharia Elétrica e Informática**  
**Unidade Acadêmica de Engenharia Elétrica**

## **Relatório de Estágio**

Relatório apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento parcial às exigências para obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.

**Orientador:**  
**Prof. Tarso Vilela Ferreira, M. Sc.**

Campina Grande, julho de 2009.

## SUMÁRIO

<u>1 – INTRODUÇÃO.....</u>	<u>7</u>
<u>2 – DESCRIÇÃO DAS EMPRESAS VINCULADAS AO ESTÁGIO.....</u>	<u>7</u>
<u>2.1 – Laboratório de Alta Tensão – LAT-EFEI.....</u>	<u>7</u>
<u>2.2 – AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S.A. ....</u>	<u>8</u>
<u>2.3 – PROCOBRE.....</u>	<u>8</u>
<u>2.4 – Orteng Balteau Produtos Elétricos.....</u>	<u>9</u>
<u>2.5 – Itaipu Transformadores.....</u>	<u>9</u>
<u>3 – ATIVIDADES DESENVOLVIDAS DURANTE O ESTÁGIO.....</u>	<u>9</u>
<u>3.1 – Detalhamento das Atividades.....</u>	<u>9</u>
<u>3.1.1 – Visita Técnica à Orteng Balteau Produtos Elétricos.....</u>	<u>10</u>
<u>3.1.2 – Visita Técnica à Itaipu Transformadores.....</u>	<u>10</u>
<u>3.1.3 – Atividades Realizadas no LAT-EFEI.....</u>	<u>13</u>
<u>3.1.3.1 – Levantamento das curvas de referência e demanda em grupo reduzido de amostras.....</u>	<u>13</u>
<u>4 – CONCLUSÃO.....</u>	<u>20</u>
<u>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</u>	<u>21</u>
<u>Tempo Suprindo a Máxima Potência (TSMP).....</u>	<u>22</u>
<u>Planilha com exemplos de projetos de transformadores eficientes, criada a partir da rotina produzida durante o estágio.....</u>	<u>25</u>



## **1 – INTRODUÇÃO**

Este documento tem por finalidade descrever as atividades realizadas durante o estágio do aluno Arimatéa Araújo Nunes, no período compreendido entre 3 de abril e 28 de julho. Estas atividades se desenvolveram nas instalações do Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá (LAT-EFEI). Foram realizadas também visitas técnicas a duas empresas: Orteng Balteau Produtos Elétricos e Itaipu Transformadores. O estágio foi cumprido com uma carga horária de 40 horas semanais, totalizando 660 horas, total de horas necessárias para a conclusão do estágio integrado. As atividades estavam vinculadas a projetos de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) junto à AES Sul e também com uma parceria do LAT-EFEI e o PROCOBRE. No decorrer deste relatório, serão descritas em detalhes as atividades realizadas durante o período de estágio. As atividades estavam sob orientação do professor Tarso Vilela Ferreira, M. Sc, e sob supervisão dos professores Manuel Luis Barreira Martinez, D. Sc., e do professor Estácio Wanderley Tavares Neto, D. Sc..

## **2 – DESCRIÇÃO DAS EMPRESAS VINCULADAS AO ESTÁGIO**

Neste item será feita uma breve descrição do local onde foi realizado o estágio, como também das empresas visitadas e envolvidas diretamente com o trabalho realizado no estágio.

### **2.1 – Laboratório de Alta Tensão – LAT-EFEI**

O Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá (LAT-EFEI) foi fundado em 04 de março de 1967 e está localizado no antigo prédio central, na Rua Coronel Rennó, 07, no centro de Itajubá. É um dos mais antigos Laboratórios da Universidade com cerca de 250 m<sup>2</sup>. O laboratório é utilizado como recurso didático em aulas, mas sua finalidade principal é o desenvolvimento de pesquisas, projetos de P&D, iniciação científica e a realização de ensaios em equipamentos e materiais elétricos.

O LAT-EFEI conta atualmente com um coordenador, o professor doutor Manuel Luis Barreira Martinez, com o professor doutor Estácio Wanderley Tavares Neto e um assistente, o técnico João Cândido Corrêa. Eles são responsáveis pela

organização e manutenção dos equipamentos, além da orientação dos alunos de graduação e pós-graduação que utilizam as dependências e instalações do laboratório. Além deles o laboratório dispõe de cerca de 25 colaboradores diretos.

Além das pesquisas, são realizados ensaios em equipamentos e materiais elétricos, na maioria das vezes em serviços prestados diretamente a empresas ou em convênio com fundações de pesquisa ligadas à universidade, como por exemplo, a Fundação de Pesquisa e Assessoramento a Indústria (FUPAI) e a Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão de Itajubá (FAPEPE).

Entre os ensaios realizados no laboratório em equipamentos e materiais elétricos, podem-se citar:

- Ensaios de Tensão Aplicada (em 60 Hz);
- Ensaios de Impulso e Corona;
- Ensaio de Curto Circuito e a Vazio em Transformadores;
- Ensaios de Envelhecimento de Cabos;
- Ensaios de Rigidez Dielétrica de Óleos Isolantes;
- Ensaios de Compatibilidade Elétrica em Câmara Climática (LAT-EFEL, 2009).

O laboratório dispõe de uma oficina bem equipada, além de diversos equipamentos de medição e todos os equipamentos de segurança pessoal, necessários à realização dos ensaios segundo as normas técnicas em vigor sem que sejam oferecidos riscos aos usuários.

Encontram-se também disponíveis no laboratório computadores conectados em rede e utilizados pelos alunos e estagiários para realização de simulações computacionais, armazenamento de dados de ensaios e elaboração de relatórios de pesquisa. Também são desenvolvidos artigos técnicos, normalmente direcionados para apresentação em seminários nacionais e internacionais de engenharia elétrica.

## **2.2 – AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S.A.**

A AES Sul é subsidiária da AES Corporation, uma companhia global do setor de geração e distribuição de energia elétrica. A empresa adquiriu em leilão a Companhia Centro Oeste de Distribuição de Energia Elétrica (ex-CEEE) no Rio Grande do Sul,

passando a chamar-se AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S.A. Além disso, a AES incorporou a CESP-TIETÊ-SP, responsável por 9 plantas hidroelétricas com capacidade instalada de 2.664 MW, e agora detém o seu controle acionário. Abaixo, podem-se observar **informações gerais sobre a área de atuação da AES Sul:**

- Atende a 118 municípios das regiões metropolitana e centro-oeste do Estado do Rio Grande do Sul;
- Carteira com aproximadamente um milhão de clientes, nas categorias residencial, industrial e rural, entre outros;
- Superfície servida aproximada de 99.512 km<sup>2</sup>;
- Aproximadamente 4 milhões de pessoas beneficiadas;
- 48 subestações;
- 68 transformadores para subestações;
- 39.329 transformadores de distribuição;
- 1.187 MVA de potência instalada;
- 1.620 km de linhas de transmissão;
- 53.417 km de redes de distribuição;
- 5 Superintendências Regionais;
- 15 Bases Operacionais;
- 1 Centro de Treinamento e Desenvolvimento: São Leopoldo;
- 1 Centro de Operação de Distribuição: São Leopoldo;
- 1 Centro de Operação na Subtransmissão: São Leopoldo (AES Sul, 2009).

### **2.3 – PROCOBRE**

O PROCOBRE é uma rede de instituições latino-americanas cuja missão é a promoção do uso do cobre, impulsionando a pesquisa e o desenvolvimento de novas aplicações e difundindo sua contribuição ao melhoramento da qualidade de vida e o progresso da sociedade.

O PROCOBRE faz parte da Internacional Copper Association (ICA, Associação Internacional do Cobre), com sede em Nova Iorque, encarregada de liderar a promoção do cobre mundialmente (PROCOBRE, 2009).

## **2.4 – Orteng Balteau Produtos Elétricos**

Fábrica de transformadores de corrente e potencial de 0,6 kV a 36,2 kV, fornecedora de soluções em sistemas de medição de energia e proteção do sistema elétrico para os mercados brasileiro e de exportação, adquirida pelo Grupo Orteng.

A Balteau é resultado da aquisição de uma das unidades da empresa Areva, concretizada em julho de 2006 (ORTENG, 2009).

## **2.5 – Itaipu Transformadores**

Localizada em Itápolis-SP, a Itaipu fabrica transformadores de 5 kVA até 5 MVA, de distribuição, especiais e de força, para os mais variados segmentos (ITAIPU, 2009).

## **3 – ATIVIDADES DESENVOLVIDAS DURANTE O ESTÁGIO**

O estágio iniciou-se em março de 2009 através de um projeto de P&D junto a AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S.A. e também uma parceria entre o LAT-EFEI e o PROCOBRE. Este projeto terá duração de 2 anos e está sob a responsabilidade da UNIFEI e da FUPAI.

Esta pesquisa visa o projeto de transformadores de distribuição aéreos eficientes para a rede de média tensão da AES Sul, através de uma rotina confeccionada no software MATLAB<sup>®1</sup>, versão R2007a. Os transformadores a serem projetados são de potência nominal de 10 kVA e classe de isolamento de 25 kV.

No LAT-EFEI desenvolveram-se algumas atividades como: ensaios com cabos, com e sem mufla; ensaios com transformadores; ensaios com pára-raios; ensaios com isoladores; utilização de um equipamento chamado Dielectric Response Analyzer For Insulation Diagnosis (DIRANA<sup>®2</sup>), ilustrado na Figura 1. Foram desenvolvidas também as pesquisas referentes ao P&D de transformadores eficientes.

---

1 MATLAB é uma marca comercial registrada da The MathWorks, Inc.

2 DIRANA é uma marca comercial registrada da OMICRON Electronics.

Durante o estágio, realizaram-se visitas técnicas à Itaipu Transformadores e a Orteng Balteau Produtos Elétricos.



Figura - Fotografia do Equipamento DIRANA da OMICRON (OMICRON, 2008).

### **3.1 – Detalhamento das Atividades**

Os itens a seguir trazem detalhes acerca das atividades desenvolvidas durante o estágio.

#### **3.1.1 – Visita Técnica à Orteng Balteau Produtos Elétricos**

Nesta visita pôde-se compreender o processo de fabricação de transformadores de corrente e de potencial. Viu-se o processo de confecção da bobina, tanto do primário como do secundário, como também como eram feitas as camadas de isolamento com papel. O processo de construção do núcleo também foi nos apresentado, como eram feitos os encaixes das lâminas, das bobinas no núcleo e dos bornes nas extremidades dos condutores das bobinas. A isolamento do núcleo do primário e do secundário também foi apresentada: durante o processo o núcleo era levado a um forno, visando à retirada de umidade, e em seguida para uma câmara onde era injetada resina em estado líquido em alta temperatura. No processo de injeção de resina utilizaram-se também formas feitas de ferro que continham a parte ativa do transformador em questão. Após certo tempo, quando a resina estivesse em estado sólido, essa forma era solta. A visita concluiu-se no laboratório de alta tensão da empresa, onde se puderam conhecer os ensaios realizados, como também o processo de aprovação dos equipamentos fabricados.

#### **3.1.2 – Visita Técnica à Itaipu Transformadores**

Esta visita teve como objetivo a compreensão do processo de fabricação de transformadores, desde o projeto até os ensaios para a aprovação do equipamento.

A visita iniciou-se com uma apresentação detalhada de cada setor da produção, incluindo-se a caldeiraria, passando pela pintura, montagem final do transformador, montagem da parte ativa, corte do núcleo, corte da perna central do núcleo, montagem do núcleo, corte dos papéis empregados entre as camadas do enrolamento, encapamento do condutor de seção retangular, confecção dos canais de óleo, corte das cabeceiras, enrolamento da bobina de baixa tensão (BT), enrolamento da bobina de alta tensão (AT), enchimento do óleo, tratamento e armazenamento do óleo, além dos ensaios.

Na caldeiraria pode-se conhecer toda a produção do tanque do transformador. Inicialmente é realizado o corte e modelagem das chapas nas quais são feitos os radiadores dos transformadores. Após o tratamento das chapas, as mesmas são soldadas aos pares, conforme mostrado na Figura 2. Em seguida tubos com cortes transversais, apresentados na Figuras 3, são soldados aos pares de placas, conforme mostrado na Figura 4.



**Figura – Fotografia das chapas do radiador cortadas, modeladas e soldadas aos pares.**



**Figura – Fotografia dos tubos nas quais as chapas do radiador serão soldadas.**



**(a)**



**(b)**

**Figura – (a) Vista de perfil dos radiadores; (b) Vista frontal dos radiadores.**

Conhecendo a confecção do radiador, partiu-se para a produção do tanque, na qual se observou o corte das chapas do tanque, como mostrado na Figura 5. Na Figura 6 observa-se a chapa com as curvaturas e com as extremidades soldadas, dando forma ao tanque.



**Figura – Fotografia da chapa do tanque cortada.**



**Figura – Fotografia da chapa com as curvaturas e soldada.**

Finalmente a tampa é confeccionada, sendo em seguida o radiador e o fundo do tanque são soldados ao tanque, tendo assim o tanque pronto, como mostrado na Figura 7. O processo de pintura pode ser visto na Figura 8.



**Figura – Fotografia do tanque pronto esperando a pintura.**



**Figura – Fotografia dos tanques passando pelo processo de pintura.**

Em seguida, os processos de enrolamento dos condutores de BT e AT são realizados, como mostrado nas Figuras 9 e 10, respectivamente.



**Figura – Fotografia do enrolamento BT sendo confeccionado.**



**Figura – Fotografia do enrolamento AT sendo confeccionado.**

Após a visita aos setores de bobinamento AT e BT, conheceu-se o setor de corte das lâminas de aço-silício que compõem o núcleo dos transformadores, conforme mostrado nas Figuras 11 e 12. Foi visto o corte das lâminas da culatra, tanto superior quanto inferior, como também o corte das lâminas das pernas laterais e da perna central, para o caso de transformador trifásico. Em seguida, realiza-se a montagem do núcleo, apresentada nas Figuras 13 e 14.



**Figura – Fotografia de lâminas de aço-silício cortadas que compõem a perna central.**



**Figura – Fotografia de lâminas de aço-silício.**



**Figura – Fotografia de núcleo monofásico sendo montado.**

**Figura – Fotografia de núcleo trifásico pronto para encaixe das bobinas.**

Na Figura 15, pode-se observar o processo de montagem da parte ativa, núcleo e bobinas, onde a culatra superior é colocada. Neste processo são realizadas algumas outras tarefas a saber:

- Soldas das ligações dos enrolamentos e ligações terminais, como mostrado na Figura 16;
- Conexões dos TAP, apresentadas na Figura 17;
- Aterramento do núcleo nas barras de ferro, como mostrado na Figura 18;
- Colocação dos isolamentos de papelão, apresentada na Figura 19;
- Colocação do calço de madeira, cuja finalidade é isolar as bobinas da barra de ferro que prende as lâminas do núcleo, como mostrado nas Figuras 20 e 21.



**Figura – Fotografia da parte ativa pronta para receber a culatra superior.**



**Figura – Fotografia mostrando as soldas das ligações dos enrolamentos BT (estrela) e dos condutores nos terminais.**



**Figura – Fotografia do TAP de um transformador.**



**Figura – Fotografia mostrando o aterramento do núcleo na barra de ferro, onde a mesma serve para pressionar e prender as lâminas do núcleo.**

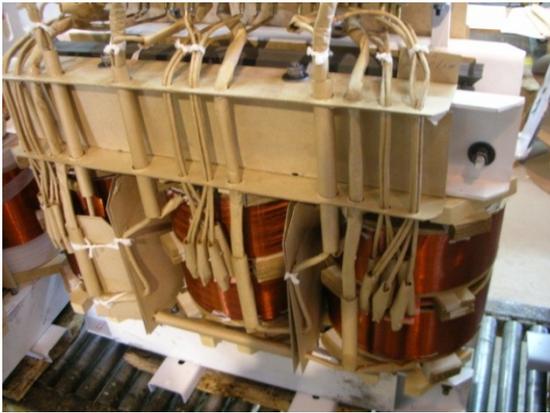


Figura – Fotografia mostrando os isolamentos de papel da parte ativa.

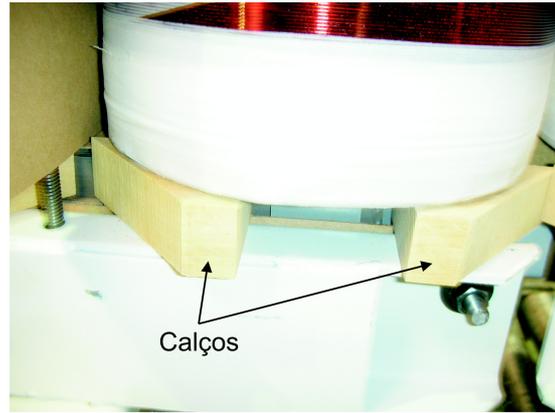


Figura – Fotografia mostrando os calços de madeira isolando a bobina da barra de ferro.



Figura – Fotografia das barras de ferro que prendem o núcleo.

Nesta visita também se acompanharam os processos de encapamento do condutor retangular, apresentado na Figura 22; o processo de corte do papel isolante inserido entre as camadas da bobina e o corte do papel utilizado como canal de óleo, para que o mesmo possa circular no interior das camadas da bobina, como mostrado na Figura 23.



**Figura – Fotografia mostrando o condutor retangular, neste caso sendo usado na BT, e o isolamento do mesmo.**

**Figura – Fotografia mostrando os isolamentos de papel entre camadas da bobina.**

Ao término da construção do tanque e da parte ativa observou-se a montagem final do transformador, onde a parte ativa era colocada dentro do tanque e parafusada no mesmo, como pode ser visto nas Figuras 24 a 27.



**Figura – Fotografia da parte ativa dentro do tanque.**



**Figura – Fotografia mostrando os terminais BT sendo parafusados.**



**Figura – Fotografia mostrando os terminais AT sendo encaixados.**



**Figura – Fotografia mostrando a tampa sendo parafusada.**

Depois de conhecer todo o processo de produção do transformador, continuou-se a visita no setor de engenharia da fábrica, onde todos os projetos eram calculados. Neste setor, foi possível conhecer o software utilizado nos cálculos do projeto, como também alguns dados de projetos já consolidados, para efeito de conhecimento. A visita foi finalizada conhecendo-se o laboratório da fábrica, onde se pode presenciar um ensaio de impulso em um transformador.

### **3.1.3 – Atividades Realizadas no LAT-EFEI**

As atividades realizadas durante o estágio tinham como objetivo a escolha dos parâmetros adequados para o projeto de transformadores eficientes. Os métodos utilizados para a escolha destes parâmetros serão descritos nos itens seguintes.

#### **3.1.3.1 – Levantamento das curvas de referência e demanda em grupo reduzido de amostras**

Este trabalho teve como objetivo principal a verificação da confiabilidade dos dados coletados dos transformadores e da confiabilidade das curvas de referência obtidas através de rotina, como também a familiarização da equipe com as ferramentas utilizadas na análise. Os dados coletados foram analisados quanto à sua confiabilidade, para que pudessem ser detectados erros nas medições. Quanto às curvas de referência, que serão descritas posteriormente, foram analisadas para validar a rotina utilizada para obtenção destas curvas, pois esta rotina reduz consideravelmente o tempo gasto, caso esta análise fosse realizada manualmente.

Inicialmente foram realizadas análises com as demandas diárias coletadas pela AES Sul de 23 transformadores<sup>3</sup> monofásicos com ligação fase-fase no terminal de alta tensão, e um nível de 220 V no terminal de baixa tensão.

Todos os transformadores localizavam-se na área rural do Rio Grande do Sul. Os dados foram coletados em intervalos de 5 minutos durante as vinte e quatro horas diárias, por uma semana, e salvos em planilhas do Excel<sup>®4</sup>. Com a ajuda do Grapher<sup>®5</sup>, as curvas das demandas diárias referentes aos dias úteis foram plotados em um mesmo gráfico, junto com as curvas de referência. Tais curvas refletem a probabilidade do transformador em operação suprir a referida demanda. Por exemplo, a curva de 99% indica que, em determinado horário, apenas 1% dos transformadores apresenta demanda superior a curva de 99%, como apresentado na Figura 28. No presente trabalho, as curvas foram obtidas a partir de análises estatísticas, através de uma rotina confeccionada por Jussara Dias, estagiária do LATEFEI. Nesta rotina, os dados de

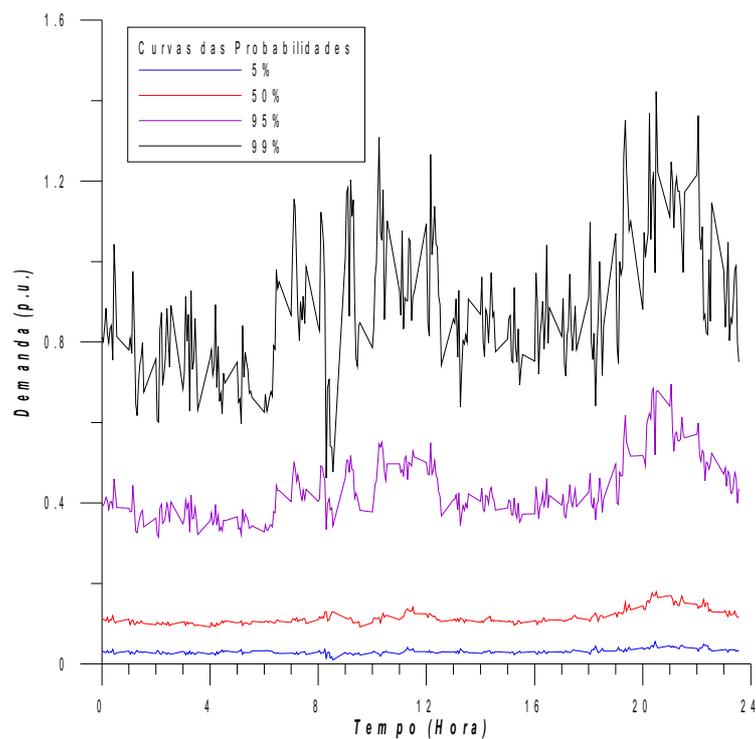
---

3 Transformadores de distribuição de 15 kVA/15 kV da rede da AES Sul.

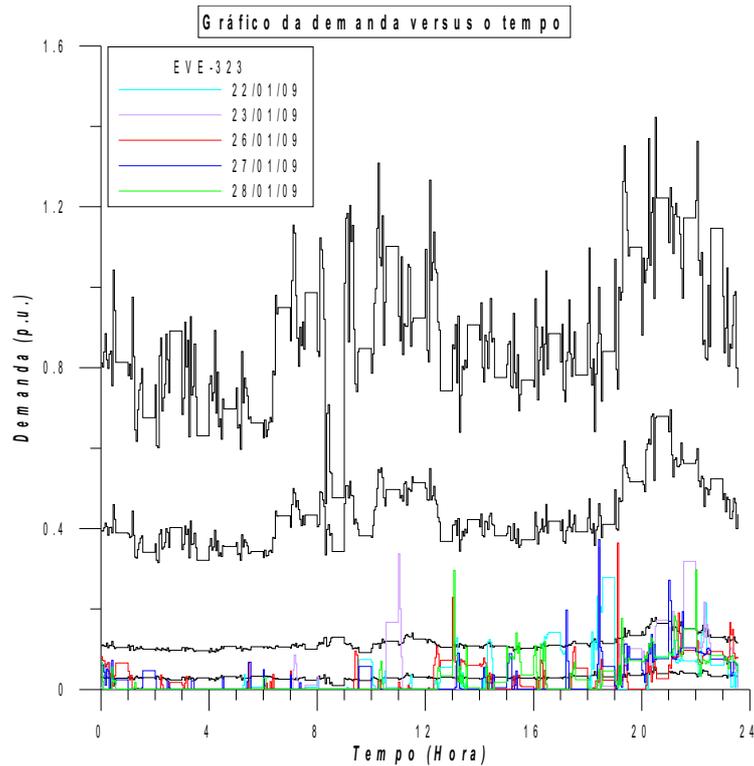
4 Microsoft Excel é uma marca comercial registrada da Microsoft Corporation, Inc.

5 Grapher é uma marca comercial registrada da Golden Software, Inc.

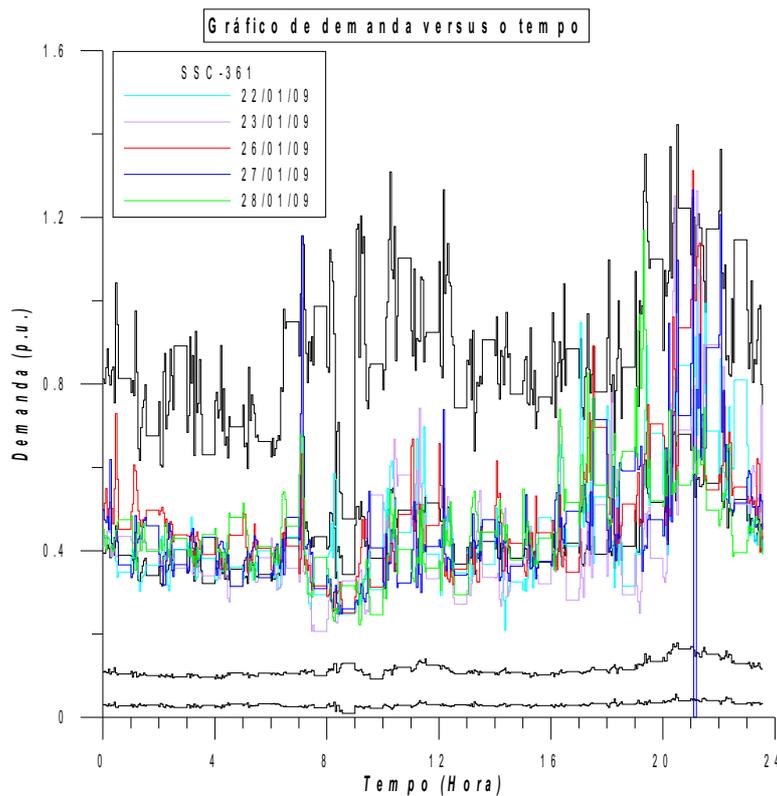
entrada foram as demandas diárias dos 23 transformadores analisados. Inseriram-se as curvas de referência no mesmo gráfico das demandas diárias para efeito comparativo, entre um transformador e o conjunto como um todo. Na Figura 29 apresentam-se as curvas das demandas diárias e as curvas de referência para o transformador de 15 kVA denominado EVE-323, e na Figura 30 para o SSC-361. Nestas últimas duas figuras, as curvas em preto representam as curvas de referência, anteriormente mostradas na Figura 28 de forma isolada.



**Figura - Gráfico com as curvas de referência.**



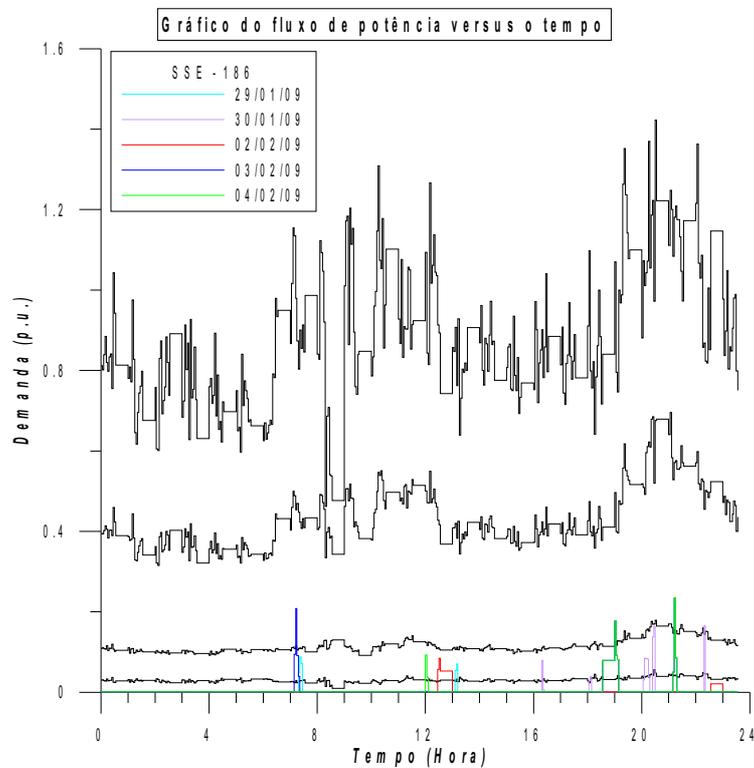
**Figura - Gráfico com as curvas das demandas diárias do transformador EVE-323.**



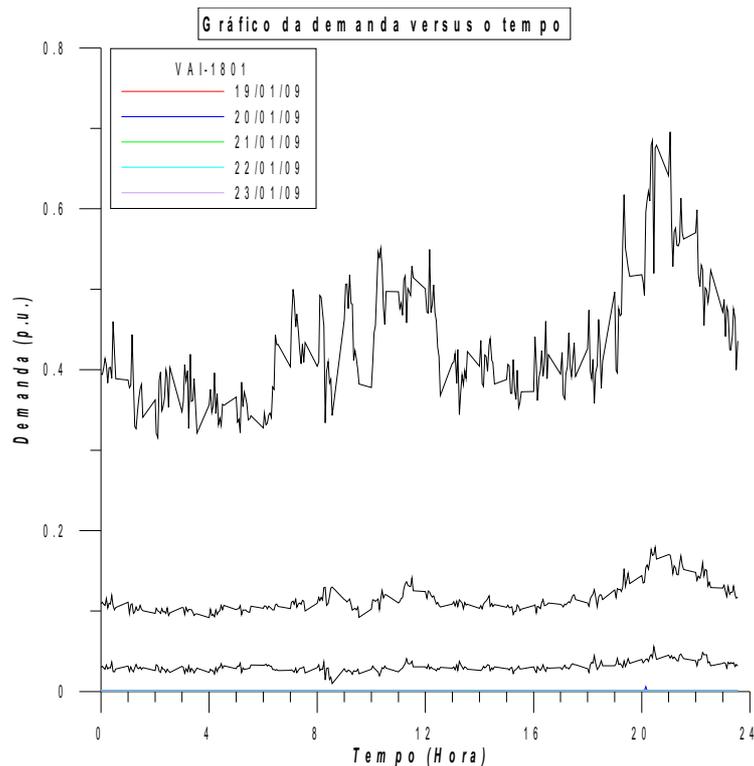
**Figura - Gráfico com as curvas das demandas diárias do transformador SSC-361.**

Após terem sido plotados os gráficos, um relatório foi produzido contendo todos os gráficos para os 23 transformadores de 15 kVA/15 kV da rede da AES Sul. Neste

relatório foram feitos comentários acerca das curvas da demanda, visando mostrar situações anormais quanto à operação destes transformadores, como também possíveis erros de leitura dos equipamentos na coleta dos dados. Como exemplo, temos o transformador SSE-186, cujas curvas são apresentadas na Figura 31. Para este transformador verificou-se a predominância da ausência de demanda, como também a presença de picos positivos de demanda. Desta forma pode-se concluir que o transformador tem poucos minutos com demanda sendo solicitada durante os cinco dias úteis, caracterizando erro na coleta dos dados. Outro exemplo que caracteriza erro na coleta dos dados está representado na Figura 32, devido o transformador VAI-1801 apresentar ausência de demanda durante o período analisado.



**Figura - Gráfico com as curvas das demandas diárias do transformador SSE-186.**



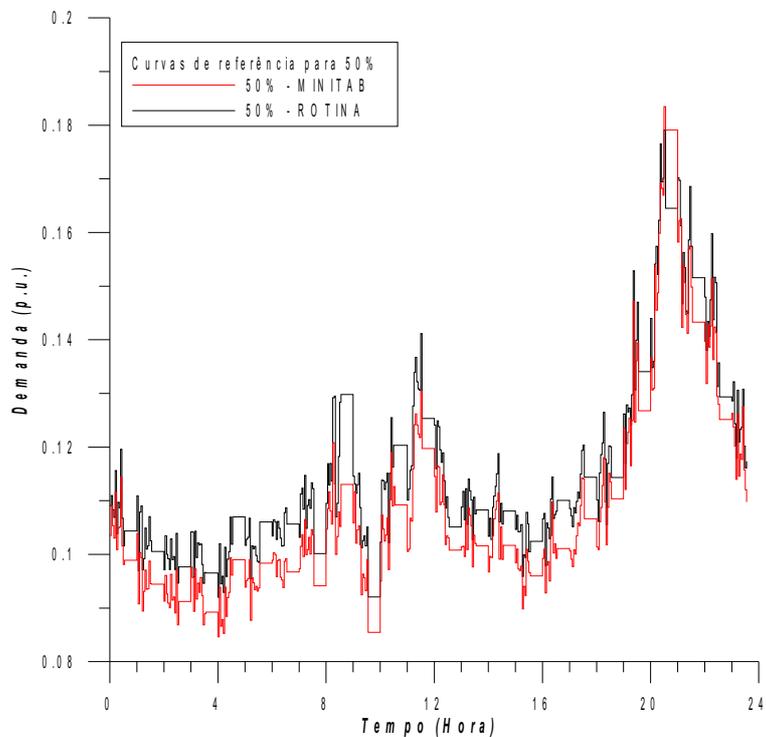
**Figura - Gráfico com as curvas das demandas diárias do transformador VAI-1801.**

Outro trabalho produzido foi a análise das curvas de referência através da análise estatística junto ao MINITAB<sup>®6</sup>. Esta atividade teve como objetivo a comparação entre os pontos das curvas de referência gerados a partir do MINITAB<sup>®</sup> e da rotina confeccionada no LAT-EFEI, para verificar a confiabilidade dos pontos gerados pela rotina. A rotina é utilizada devido a facilidade e a velocidade serem muito superiores, dado que tal rotina processa os arquivos em lote, enquanto que no MINITAB<sup>®</sup> cada conjunto de dados precisaria ser carregado manualmente pelo operador, bem como o salvamento dos resultados obtidos. Para este trabalho, inicialmente foram inseridos os dados das demandas diárias dos 23 transformadores em uma planilha do MINITAB<sup>®</sup>. Desta forma, obtiveram-se 288 colunas referentes aos dados que foram coletados a cada 5 minutos, e 115 linhas referentes aos 5 dias úteis dos 23 transformadores. Assim a análise estatística foi realizada para cada horário, ou seja, para os 115 dados coletados às 00:05 hora, depois para outros 115 dados às 00:10 hora. Foram realizadas então 288 distribuições estatísticas, obtendo-se 288 conjuntos de pontos, referentes as probabilidades de 1 à 99%. De posse destes dados, foram selecionados apenas os pontos referentes às probabilidades de 1, 5, 50, 95 e 99%,

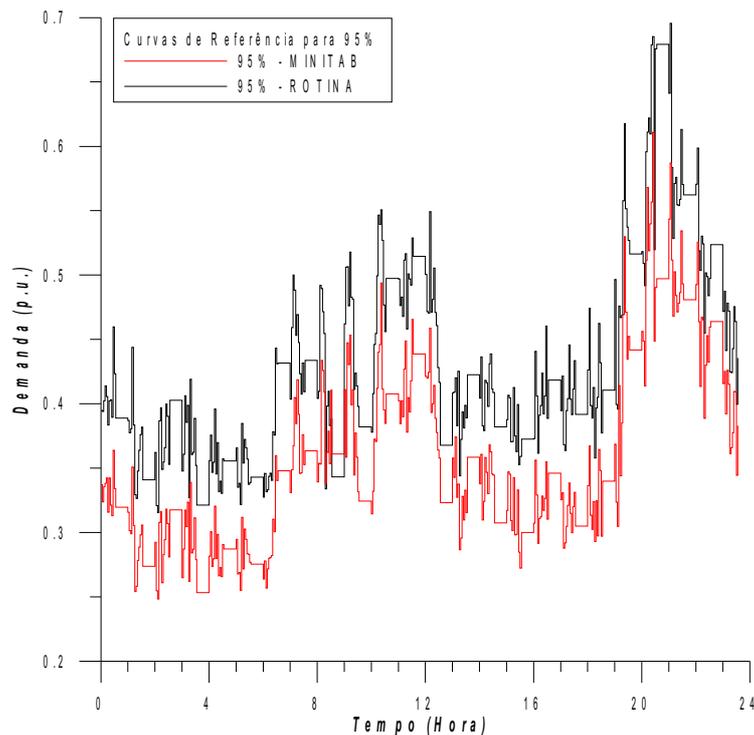
---

<sup>6</sup> Minitab é uma marca comercial registrada da Minitab, Inc.

resultando em 5 conjuntos de 288 pontos para cada probabilidade. Com estes pontos, utilizou-se do GRAPHER<sup>®</sup> para plotar as 5 curvas de referência. Em um mesmo gráfico foram inseridas a curva obtida através do MINITAB<sup>®</sup> e a curva obtida pela rotina, como apresentado nas Figuras 33 e 34.



**Figura - Gráfico comparativo entre as curvas de referência de 50% geradas pelos pontos obtidos através do MINITAB e da rotina.**



**Figura - Gráfico comparativo entre as curvas de referência de 95% geradas pelos pontos obtidos através do MINITAB e da rotina.**

Após terem sido plotados os gráficos das curvas de referência para as probabilidades de 1, 5, 50, 95 e 99%, um relatório foi produzido traçando-se comentários acerca dos gráficos comparativos entre as curvas obtidas pela rotina e pelo MINITAB®.

### 3.1.3.2 – Análise do TSMP para Projeto de Transformadores Eficientes

Ao concluir a análise das curvas de referência, optando pelos pontos obtidos pela rotina, iniciou-se a confecção de um relatório destinado a AES Sul. Este relatório visava a análise do Tempo Suprindo Máxima Potência (TSMP), mais conhecido como Fator de Energia Consumida (FE). O TSMP reflete o tempo, em horas/dia, que um transformador poderia operar com potência nominal (ver Anexo A). O estudo do TSMP tinha como objetivo principal a decisão de quais valores do mesmo iriam ser adotados para serem utilizados para o projeto de transformadores eficientes. Esta análise foi realizada devido o TSMP ter influência significativa no projeto de transformadores eficientes, pois este parâmetro descreve a solicitação diária ao transformador pela carga. Assim um TSMP baixo, indica que o transformador está operando em vazio a maior parte do dia, determinando que o transformador eficiente a ser projeto tenha as perdas no núcleo

reduzidas. Caso o TSMP seja alto, indica que o transformador esta operando sob carga a maior parte do dia, determinando assim, que o transformador eficiente a ser projetado tenha as perdas no cobre reduzidas. Esta atividade foi realizada em que etapas conforme mostra a Figura 35.

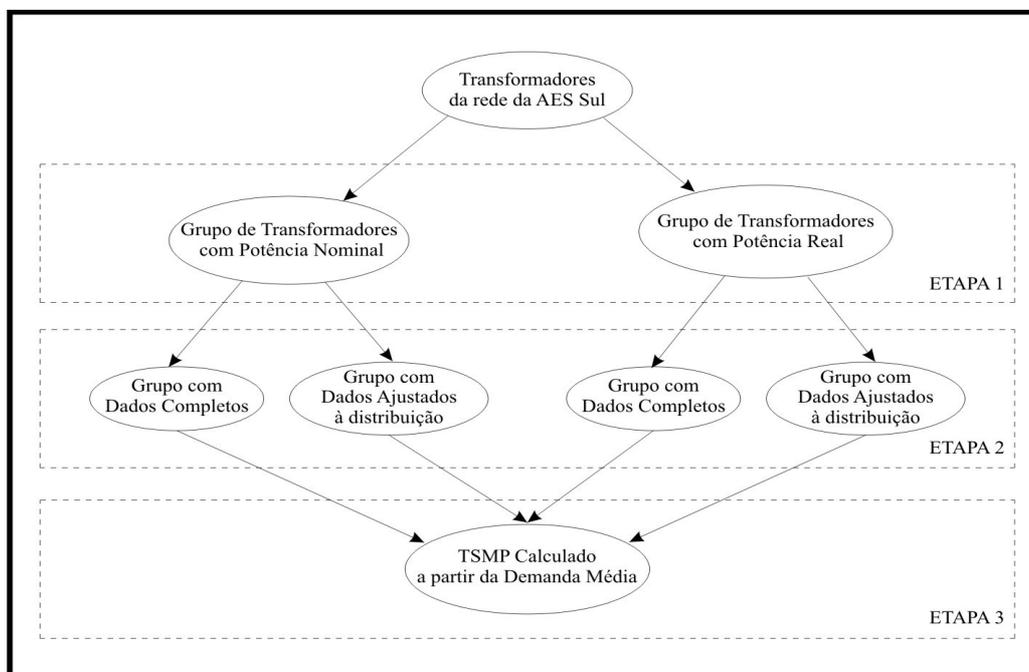


Figura – Etapas seguidas na análise do TSMP.

A análise do TSMP foi realizada com 10 transformadores de 5 kVA, 30 de 10 kVA e 29 de 15 kVA, sendo todos monofásicos com ligação fase-fase no terminal de alta tensão e um nível de tensão (220 V) no terminal de baixa tensão, localizados na zona rural da área de concessão da AES Sul. Esta análise foi realizada formando-se dois grupos, os transformadores com potência nominal e com potência real, onde chamou-se esta fase da análise de etapa 1, como mostra a Figura 35. O grupo de transformadores com potência nominal era composto pelos 69 transformadores, cuja potência considerada é a potência indicada na placa do equipamento. O outro grupo considerado nesta análise foi o dos transformadores com potência real. Neste grupo, a potência considerada é a demanda máxima solicitada pela carga. Para formar este grupo, realizou-se um remanejamento no grupo de transformadores com potência nominal, considerando agora a demanda máxima. Como exemplo tem-se: um transformador de 10 kVA operando com demanda máxima semanal de 2 kVA foi remanejado para a planilha dos transformadores de 5 kVA. Desta maneira, formou-se o novo grupo contendo novos transformadores de 5, 10 e 15 kVA, onde o conjunto dos transformadores de 5 kVA é formado apenas pelos transformadores que operam com a

demanda máxima igual ou inferior a 85% de sua potência nominal (para os transformadores de 5 kVA, demanda máxima  $\leq 4,25$  kVA). Seguindo este método, os grupos dos transformadores de potência real de 5, 10 e 15 kVA foram formados.

O grupo de transformadores de potência nominal é composto por: 10 transformadores de 15 kVA, 30 transformadores de 10 kVA e 29 transformadores de 15 kVA. Após o remanejamento criou-se o grupo de potência real, formado por: 22 transformadores de 5 kVA, 36 transformadores de 10 kVA e 11 transformadores de 15 kVA. Percebe-se que tanto o grupo de potência nominal como o grupo de potência real possuem 69 transformadores, que se mencionou anteriormente, é o total de transformadores analisados.

Na Tabela 1 observa-se a lista de transformadores analisados, como também os transformadores remanejados indicados pela legenda.

Realizou-se este remanejamento para tomar a decisão, baseada na análise, de como os transformadores iriam ser tratados com relação às demandas. Assim foram realizadas as análises estatísticas dos dados coletados (demanda) em intervalos de 5 minutos, 15 minutos e 1 hora, utilizando o software MINITAB®.

Tabela – Transformadores analisados de 5, 10 e 15 kVA.

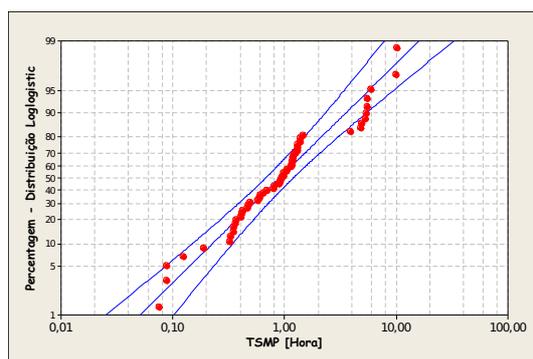
Transformadores agrupados de acordo com a sua potência nominal				
5 kVA	10 kVA		15 kVA	
AGU362	AGU239	RPA521	AGU611	SAN931
CPS528	AGU278	SBV9221	CDL288	SCR1217
ITA4713	CSU163	SBV9427	CPS119	SGA11325
SGA7369	CSU181	SCR227	EVE323	SIN-1331
SGA11025	CSU373	SCR338	FOR6086	SMS4013
SIN473	CSU585	SCR1183	FVN202	SPE10250
SSE5518	CSU687	SFR38	GXA62	SSC278
SVI120	ETR229	SGA8447	LIV3289	SSC361
TOR10933	JAG291	SIN-919	LIV3292	SSE186
VSO48	LIV3447	SSE6547	LIV3717	VAI1064

	LIV3700	UNI20096	LIV3850	VCO110
	LIV3782	VAI371	MAR9100	VCR488
	LIV6171	VAI843	MAT164	VSO161
	QUE10869	VCR238	MUC117	VSO749
	QUE11028	VCR881	RPA870	
<p>Legenda:</p> <p>Transformadores com demanda máxima semanal superior a 4,25 kVA e igual ou inferior a 8,5 kVA e remanejados para o grupo de transformadores de 10 kVA.</p> <p>Transformadores com demanda máxima semanal igual ou inferior a 4,25 kVA e remanejados para o grupo de transformadores de 5 kVA.</p> <p>Transformadores com demanda máxima semanal igual ou inferior a 8,5 kVA e remanejados para o grupo de transformadores de 10 kVA.</p> <p>Transformadores com demanda máxima semanal superior a 8,5 kVA e remanejados para o grupo de transformadores de 15 kVA.</p>				

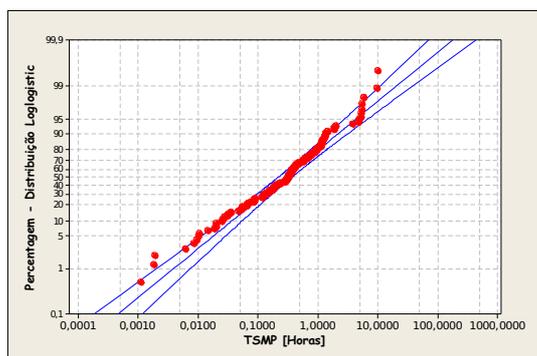
Os dados coletados das curvas de probabilidade, oriundas do MINITAB<sup>®</sup>, foram inseridos em tabelas visando facilitar a análise (Tabelas 2, 3 e 4). No entanto, apenas os dados referentes às probabilidades de 1, 5, 50, 95 e 99% foram coletados, visto que apenas os dados referentes a estas probabilidades eram suficientes, pois trazem consigo todas as informações necessárias para a conclusão. No decorrer da análise, observou-se que as distribuições para os dados completos apresentaram pontos fora das curvas das distribuições, logo se decidiu eliminá-los, implicando em uma melhor distribuição dos dados, onde se nomeou esta fase da análise de etapa 2, como mostra a Figura 35. Os pontos eliminados foram os que apresentavam valores nulos ou muito próximos de zero. Estes pontos foram retirados visando a comparação com os dados completos<sup>7</sup>. Desta maneira, formaram-se os seguintes conjuntos de dados: Dados Completos para Potência Real, Dados Ajustados à Distribuição para Potência Real, Dados Completos para Potência Nominal e Dados Ajustados à distribuição para Potência Nominal. As Figuras 35 a 37 mostram as distribuições produzidas no MINITAB<sup>®</sup> para os dados dos transformadores de 15 kVA, para os grupos de potência nominal e real e dos dados ajustados ou não a distribuição.

Não foi necessário ajustar os dados à distribuição para o grupo de potência real, visto que os mesmo se encontravam sobre as retas.

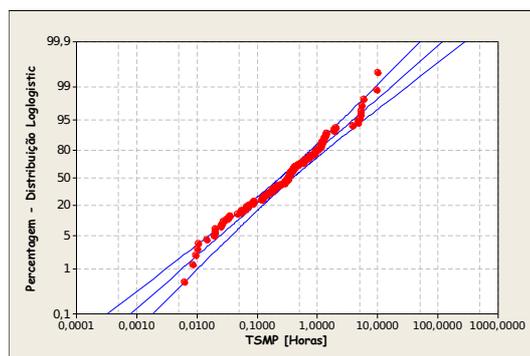
<sup>7</sup> Foi chamado de Dados Completos o conjunto de dados que sofreu nenhuma exclusão de dados nulos ou próximos de zero. Desta maneira foi chamado de Dados Aperfeiçoados o conjunto de dados que tiveram os valores nulos ou próximos de zeros excluídos.



**Figura – Transformadores de 15 kVA com Potência Real – Dados Completos – TSMP 5 Minutos.**



**Figura – Transformadores de 15 kVA com Potência Nominal – Dados Completos – TSMP 5 Minutos.**



**Figura – Transformadores de 15 kVA com Potência Nominal – Dados Ajustados à Distribuição de Probabilidade – TSMP 5 Minutos.**

As tabelas, contidas no relatório em questão, contêm informações sobre o TSMP para os dados coletados a cada 5 minutos, 15 minutos e uma hora. Esta fase chamou-se de etapa 3, como mostra a Figura 35. Traz ainda os valores médios para o TSMP, como também os limites inferiores e superiores. As Tabelas 2, 3 e 4 são exemplos de tabelas inseridas no relatório destinado a AES Sul. Estas tabelas apresentam o TSMP, para o grupo de transformadores com potência nominal e real, respectivamente, referente à potência de 15 kVA, para as probabilidades de 1, 5, 50, 95 e 99%. Analisando estas tabelas referentes ao transformador de 15 kVA, observou-se que ao considerar como potência real, o valor médio cresceu significativamente em relação aos dados do grupo de potência nominal.

Tabela – TSMP Diário dos Transformadores de 15 kVA com Potência Nominal – Dados Completos - Valores a partir das curvas de probabilidade.

5 minutos			15 Minutos			Horas		
Média	Limite Mínimo	Limite máximo	Média	Limite Mínimo	Limite máximo	Média	Limite Mínimo	Limite máximo
	0			0			0	

<b>1%</b>	0,004	0,002	0,008	0,003	0,001	0,006	0,000	0,000	0,001
<b>5%</b>	0,019	0,012	0,030	0,015	0,009	0,024	0,004	0,002	0,008
<b>50%</b>	0,287	0,221	0,373	0,266	0,202	0,350	0,275	0,200	0,377
<b>95%</b>	4,430	2,831	6,933	4,776	2,980	7,652	3,098	2,296	4,181
<b>99%</b>	20,530	10,927	38,573	24,117	12,407	46,881	6,312	4,462	8,929

Tabela – TSMP Diário dos Transformadores de 15 kVA com Potência Nominal – Dados Ajustados à Distribuição - Valores a partir das curvas de probabilidade.

	5 minutos			15 Minutos			Horas		
	Média	Limite Mínimo	Limite máximo	Média	Limite Mínimo	Limite máximo	Média	Limite Mínimo	Limite máximo
<b>1%</b>	0,006	0,003	0,011	0,004	0,002	0,008	0,006	0,003	0,011
<b>5%</b>	0,024	0,015	0,037	0,019	0,012	0,031	0,024	0,016	0,037
<b>50%</b>	0,305	0,239	0,391	0,284	0,219	0,368	0,298	0,232	0,382
<b>95%</b>	3,897	2,553	5,949	4,168	2,671	6,503	3,674	2,393	5,642
<b>99%</b>	16,246	8,970	29,425	18,806	10,061	35,152	15,034	8,241	27,428

Tabela – TSMP Diário dos Transformadores de 15 kVA com Potência Real – Dados Completos - Valores a partir das curvas de probabilidade.

	5 minutos			15 Minutos			Horas		
	Média	Limite Mínimo	Limite máximo	Média	Limite Mínimo	Limite máximo	Média	Limite Mínimo	Limite máximo
<b>1%</b>	0,051	0,025	0,102	0,042	0,020	0,088	0,031	0,014	0,069
<b>5%</b>	0,142	0,087	0,233	0,124	0,073	0,209	0,100	0,056	0,177
<b>50%</b>	0,899	0,676	1,196	0,862	0,640	1,161	0,813	0,590	1,121
<b>95%</b>	5,692	3,418	9,479	5,996	3,514	10,233	6,616	3,724	11,752
<b>99%</b>	16,014	7,835	32,731	17,789	8,397	37,686	21,423	9,535	48,133

Analisando as Tabelas 2 e 3, percebe-se que excluindo os dados nulos ou próximos de zero para os transformadores com potência nominal, o valor médio sofreu um pequeno acréscimo para os três tipos de coleta de dados.

Através da rotina citada anteriormente neste documento, obtiveram-se as curvas de referência para os dois grupos, potência nominal e real, para que fosse calculado o TSMP<sup>8</sup> destas curvas e comparado com os TSMPs<sup>9</sup> que tinham sido calculados. As

8 Chamado de TSMP das curvas características.

9 Chamado de TSMP médio.

Figuras 38 e 39 trazem alguns dos gráficos inseridos no relatório enviado à AES Sul. Estas figuras representam as curvas características para o grupo dos transformadores de 15 kVA, potência nominal e real, para a probabilidade de 50 e 95%.

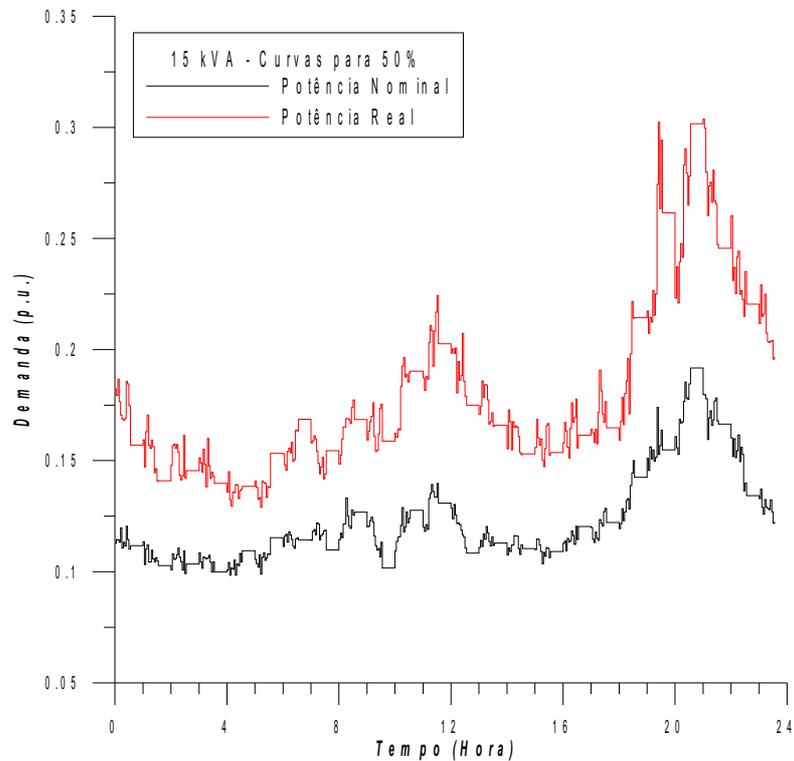


Figura – Curvas de 50% para os transformadores de 15 kVA – Valores a partir das distribuições.

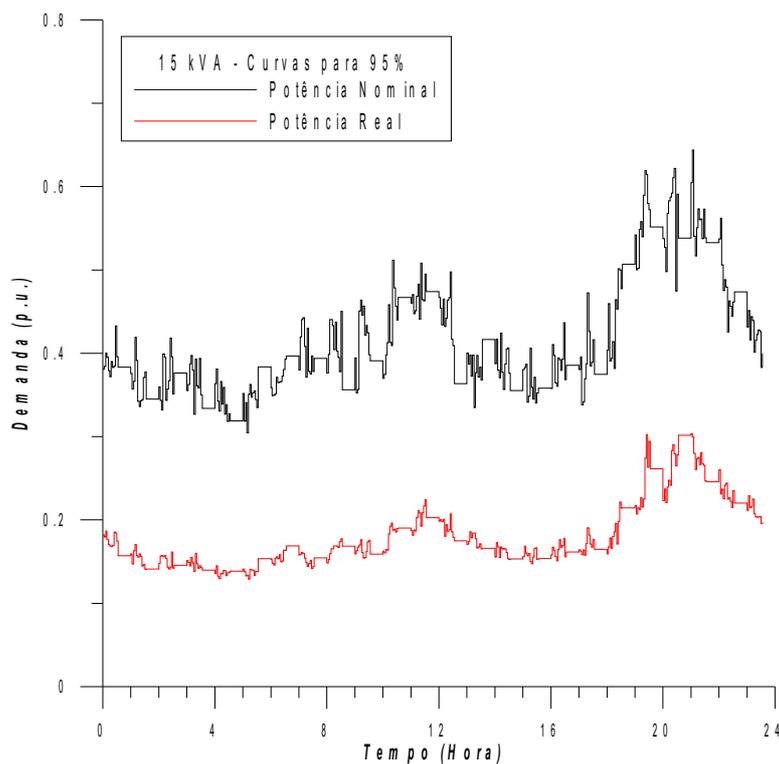


Figura – Curvas de 95% para os transformadores de 15 kVA – Valores a partir das distribuições.

As Tabelas 5 e 6 mostram os TSMPs calculados sobre as curvas de referência (Figuras 38 e 39), para os grupos de potência nominal e real para os transformadores de 15 kVA.

Tabela – TSMP Obtido das Curvas de Probabilidade para os Transformadores de 15 kVA – Potência Nominal

TSMP	Transformadores de 15 kVA - Potência Nominal				
	1%	5%	50%	95%	99%
<b>5 Minutos</b>	0,009	0,032	0,375	4,334	16,363
<b>15 Minutos</b>	0,009	0,032	0,375	4,325	16,227
<b>Hora</b>	0,009	0,032	0,375	4,314	16,127

Tabela – TSMP Obtido das Curvas de Probabilidade para os Transformadores de 15 kVA – Potência Real

TSMP	Transformadores de 15 kVA - Potência Real				
	1%	5%	50%	95%	99%
<b>5 Minutos</b>	0,029	0,087	0,821	0,821	23,609
<b>15 Minutos</b>	0,028	0,086	0,820	0,820	23,208
<b>Hora</b>	0,028	0,086	0,817	0,817	23,071

Nas Tabelas 7 e 8 observa-se a comparação entre o TSMP médio e o TSMP das curvas características para os dados dos transformadores de 15 kVA, com os grupos de potência nominal e real.

Tabela – TSMP dos Transformadores de 15 kVA – Potência Nominal

<b>Transformadores de 15 kVA - Potência Nominal</b>					
<b>TSMP Curvas Características</b>	<b>1%</b>	<b>5%</b>	<b>50%</b>	<b>95%</b>	<b>99%</b>
<b>5 Minutos</b>	0,000	0,000	0,119	5,013	14,000
<b>15 Minutos</b>	0,000	0,000	0,119	5,010	13,992
<b>Hora</b>	0,000	0,000	0,119	5,003	13,973
<b>TSMP Média Diária</b>	<b>1%</b>	<b>5%</b>	<b>50%</b>	<b>95%</b>	<b>99%</b>
<b>5 Minutos</b>	0,004	0,019	0,287	4,430	20,530
<b>15 Minutos</b>	0,003	0,015	0,266	4,776	24,117
<b>Hora</b>	0,000	0,004	0,275	3,098	6,312

Tabela – TSMP dos Transformadores de 15 kVA – Potência Real

<b>Transformadores de 15 kVA - Potência Real</b>					
<b>TSMP Curvas Características</b>	<b>1%</b>	<b>5%</b>	<b>50%</b>	<b>95%</b>	<b>99%</b>
<b>5 Minutos</b>	0,003	0,016	0,595	9,989	30,846
<b>15 Minutos</b>	0,003	0,016	0,594	9,879	28,986
<b>Hora</b>	0,003	0,015	0,590	9,843	28,522
<b>TSMP Média Diária</b>	<b>1%</b>	<b>5%</b>	<b>50%</b>	<b>95%</b>	<b>99%</b>
<b>5 Minutos</b>	0,051	0,142	0,899	5,692	16,014
<b>15 Minutos</b>	0,042	0,124	0,862	5,996	17,789
<b>Hora</b>	0,031	0,100	0,813	6,616	21,423

Terminado o relatório, decidiu-se recomendar o uso do conjunto de transformadores como sendo o de Potência Real, como também utilizar o TSMP calculado a partir da curva característica. Após decidir qual TSMP adotar, iniciou-se a confecção dos projetos dos transformadores. O projeto é calculado a partir de uma rotina<sup>10</sup> produzida no software MatLab®, onde tem-se alguns parâmetros de entrada como: tensão do primário e secundário, classe de isolamento, potência, frequência, indução, espessura e largura do condutor BT, quantidade de condutores axiais e radiais por bobina BT, quantidade de camadas BT, espessura do isolamento das espiras BT, área do condutor AT, distância entre o enrolamento de BT e AT, altura do calço, TSMP, custo

<sup>10</sup> A rotina calcula o projeto de transformadores eficientes.

do aço-silício, custo do cobre, custo fixo da produção do transformador, custo de compra do transformador padrão, etc. Inserindo-se todos os parâmetros de entrada a rotina calcula as dimensões da parte ativa do transformador, calcula o preço de venda do transformador, o Tempo de Retorno no Investimento (TRI), perdas no cobre, perdas no núcleo. Após calcular esses e outros dados, o programa faz uma otimização, selecionando apenas projetos que atendam as especificações e também que sejam viáveis financeiramente. Inicialmente a coleta dos dados dos projetos, que a rotina mostrasse que eram viáveis, era realizada manualmente, perdendo-se muito tempo para concluir este trabalho. Desta maneira, criou-se uma rotina no MatLab<sup>®</sup> para fazer a coleta destes dados de forma automática reduzindo o tempo da análise drasticamente. Os dados coletados pela nova rotina são organizados em uma planilha do Excel<sup>®</sup>, onde também constam alguns dados de entrada importantes no projeto (Ver Anexo B).

#### 4 – CONCLUSÃO

Neste estágio, foi possível consolidar alguns conceitos, antes vistos em sala de aula, por meio de vários ensaios realizados no Laboratório de Alta Tensão (LAT-EFEI), como: ensaios de impulso, de tensão suportável, de tangente de perdas, etc.

No LAT-EFEI, conheceram-se equipamentos novos como o DIRANA, da OMICRON, e aprimoraram-se os conhecimentos quanto à utilização dos geradores de impulso, da ponte Schëring<sup>11</sup>, etc.

As visitas técnicas realizadas durante o período de estágio foram de grande valia para a formação profissional do autor, pois junto à Orteng Balteau Produtos Elétricos pôde-se ver todo o processo de construção de transformadores de corrente e de potencial. Na Itaipu Transformadores, foi possível entender o processo de fabricação de transformadores de potência em detalhes, compreendendo toda a produção do equipamento, desde os cálculos do projeto até o ensaio e aprovação ou não do equipamento, enriquecendo os conhecimentos autor.

Ao visitar a Itaipu Transformadores, conseguiu-se entender completamente o projeto de um transformador, sendo possível assim, entender toda a rotina de cálculo de transformadores, partindo daí para projetos mais próximos da realidade.

Todo o estudo de transformadores realizado durante o estágio consolidou e ampliou significativamente o conhecimento adquirido pelo autor durante a graduação do curso de Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Campina Grande. Além disso, o trabalho proporcionou experiências novas em se tratando da vida acadêmica, agregando habilidades que certamente servirão em pesquisas futuras, no decorrer do mestrado.

Com relação ao estudo do TSMP, decidiu-se recomendar o uso do conjunto de transformadores como sendo o de Potência Real, como também utilizar o TSMP calculado a partir da curva característica, visto que adotando estas recomendações, o TSMP obtido será superior, resultando em projetos de transformadores eficientes baseados em maiores cargas. Ao se trabalhar com transformadores localizados em zona rural, obtêm-se TSMPs baixos. Desta maneira optou-se por escolher TSMPs com valores superiores, para que as perdas no núcleo tivessem menor atenção comparadas as perdas no cobre.

---

<sup>11</sup> A ponte de Schëring é usada para medir perdas em dielétricos.

Logo, pode-se afirmar que este estágio cumpriu com seus objetivos, aprimorando os conhecimentos e a experiência profissional do autor.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AES Sul. AES Sul Distribuidora Gaúcha de Energia S.A.. Disponível no sítio: <http://www.aessul.com.br>. Acessado em 2009.

de Oliveira, H. R. P. M.; Batista, E. L.; Martinez, M. L. B.; Coriolano, D. L. e Picanço, A. F. Análise Econômica da Substituição de Transformadores Padrão por Eficientes. Congresso Brasileiro de Eficiência Energética - CBEE.

*ITAIPU. Itaipu Transformadores. Disponível no sítio: [www.itaiputransformadores.com.br](http://www.itaiputransformadores.com.br). Acessado em 2009.*

LAT-EFEI. Laboratório de Alta Tensão da Universidade Federal de Itajubá. Disponível no sítio: [www.lat-efei.org.br](http://www.lat-efei.org.br). Acessado em 2009.

OMICRON. DIRANA (Dielectric Response Analyzer for Insulation Diagnosis) User Manual. 2008.

ORTENG. Orteng Balteau Produtos Elétricos. Disponível no sítio: <http://www.ortengrj.com.br>. Acessado em 2009.

PROCOBRE. Disponível no sítio: [www.procobre.org](http://www.procobre.org). Acessado em 2009.

# **ANEXO A**

**Tempo Suprindo a Máxima**

**Potência (TSMP)**

O Tempo Suprindo a Máxima Potência (TSMP) ou Fator de Energia Consumida (FE) indica o tempo total durante um dia (24 horas) que o transformador operando a plena carga necessitaria para apresentar as perdas série de um ciclo normal de carga média. Algumas etapas são necessárias para deduzir a equação utilizada no cálculo do Fator de Energia Consumida.

O custo das perdas sob carga é calculado segundo a equação abaixo:

$$CWL = i^2 R \Delta T C_{EE}$$

Organizando a equação:

$$CWL = 3 R C_{EE} i^2 \Delta T$$

Multiplicando a equação anterior por  $\ln^2 \ln^2$  e por  $3 U_n^2 / 3 U_n^2$ :

$$CWL = 3 R \ln^2 \ln^2 C_{EE} i^2 \Delta T$$

Organizando a equação:

$$CWL = 3 R \ln^2 C_{EE} i^2 \Delta T$$

Fazendo  $W_L = 3 R i^2$ ;  $S_i = 3 U_n i$ ;  $S_n = 3 U_n I_n$ , tem-se:

$$CWL = W_L C_{EE} i^2 \Delta T$$

Discretizando a amostra em intervalos, tem-se  $n_d = 24 \Delta T$ :

$$CWL/\text{dia} = W_L C_{EE} i^2 n_d$$

Para obter o custo das perdas em um ano multiplica a equação por 365, encontrando:

$$CWL/\text{ano} = 365 W_L C_{EE} i^2 n_d$$

$$CWL/\text{ano} = 365 W_L C_{EE} FE$$

Logo,

$$FE = 24 n_d i^2 = 1 n_d S_i S_n$$

Onde:

$R$  é a resistência em corrente contínua dos enrolamentos em ohms ( $\Omega$ );

$i$  é a corrente eficaz em Amperes (A);

$C_{EE}$  é o Custo da Energia em R\$/Wh;

$U_n$  é a tensão nominal em Volts (V);

$I_n$  é a corrente nominal em Amperes (A);

$S_i$  é a potência instantânea em Watts (W);

$S_n$  é a potência nominal em Watts (W);

$W_L$  é a perda sob carga em Watts (W);

$n_d$  é o número de intervalos de tempo utilizados para discretizar a carga diária.

O TSMP calculado para a curva de demanda abaixo é 19,29 horas/dia. Percebe-se, por definição, que a área em destaque da curva de demanda corresponde à área formada pela curva do TSMP.

