



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

BR/GLT/16  
13 a 16 de Outubro de 2013  
Brasília - DF

**GRUPO – III**

**GRUPO DE ESTUDO DE LINHAS DE TRANSMISSÃO – GLT**

**AQUISIÇÃO DE DADOS PARA IDENTIFICAÇÃO DE VÃOS CRÍTICOS EM LINHAS DE DISTRIBUIÇÃO**

**João Antônio de  
Vasconcelos (\*)**

**UFMG**

**Carlos Alexandre  
Meireles do Nascimento**

**CEMIG**

**Marcelo dos  
Santos Quirino**

**UFMG**

**Vitor Oliveira e  
Silva de Faria**

**UFMG**

**Filipe Silva  
Silveira**

**UFMG**

**RESUMO**

O objetivo desse informe técnico é apresentar a metodologia utilizada para posicionamento de sensores em uma linha aérea de 138 kV e os resultados da aquisição de dados realizada. O monitoramento de linhas de transmissão é uma atividade importante no auxílio da operação, sobretudo na escolha do nível de carregamento que respeite as condições de segurança. Outra aplicação importante é na utilização destes dados como parte da metodologia de identificação de vãos críticos em linhas aéreas, que se encontra em desenvolvimento no Laboratório de Computação Evolucionária no âmbito do projeto de P&D-310 Cemig/Aneel, denominado “Desenvolvimento de Metodologia para Identificação de Vãos Críticos em Linhas de Distribuição”. Os sensores são utilizados para capturar dados de corrente elétrica, temperatura do condutor e temperatura ambiente, embora outras grandezas também possam ser monitoradas como a inclinação do cabo, tensão, potências ativa e reativa. Os sensores foram instalados numa linha de distribuição entre as subestações de Barreiro e Nova Lima. Neste trabalho, são apresentadas as etapas de implantação e operação dos sensores bem como uma breve descrição do seu funcionamento. A definição da localização dos sensores foi feita considerando as facilidades de acesso e em um estudo estatístico aplicado a uma base de dados históricos de velocidade do vento de domínio público liberada pelo INMET e INFRAERO.

**PALAVRAS-CHAVE**

Sensor, Linhas de transmissão, Linhas aéreas, Sistema de monitoramento em tempo real.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

Monitorar linhas aéreas de transmissão ou de distribuição tem se tornado um procedimento cada vez mais utilizado e de interesse das concessionárias de energia para maximizar a exploração do ativo e evitar a violação de alguma condição de segurança.

Um dos principais objetivos de se monitorar uma linha de transmissão é auxiliar os operadores com informações da linha em tempo real. Para isso, o monitoramento e a captura de dados relacionados ao condutor, como temperatura superficial do condutor, temperatura ambiente, corrente elétrica, dentre outros, se tornam essenciais para as tomadas de decisão e operação de linha. Um baixo valor de velocidade do vento conjugado a uma direção do fluxo de ar paralela ao eixo do cabo e elevado valor de corrente elétrica, pode conduzir os cabos a uma perigosa aproximação do solo, violando os limites de segurança. Nesta situação, o carregamento da linha deve ser diminuído. Por outro lado, elevado valor de velocidade do vento conjugado a uma direção do fluxo de ar normal ao eixo do cabo e baixo valor de corrente elétrica podem permitir um aumento substancial no carregamento das linhas. Ambas as situações significam maximização da exploração do ativo dentro das normas de segurança.

(\*) Laboratório de Computação Evolucionária/Depto. de Engenharia Elétrica - UFMG - Av. Pres. Antônio Carlos, nº 6627 - sala 2108 - Bloco 2 - CEP 31.270-010 - Belo Horizonte, MG, Brasil – Tel.: (+55 31) 3409-4828 – E-mail: jvasconcelos@ufmg.br

Os sensores utilizados no nosso P&D são tipo Power Donut2 (1). Eles possuem dois sensores de temperatura que devem ser ajustados para garantir um bom contato térmico com o cabo condutor. Esses sensores de temperatura medem a temperatura superficial do condutor, cujo valor é utilizado indiretamente no cálculo da altura do condutor ao solo. Caso um destes sensores é afastado do cabo condutor, é possível ter uma estimativa da temperatura ambiente, embora este sensor não tenha sido previsto pelo fabricante para esta finalidade. Além destes valores de temperatura, o Power Donut mede também valores de corrente elétrica, tensão, inclinação do cabo, potência ativa e reativa. Neste trabalho são utilizados sete sensores instalados em uma linha de distribuição de 138 kV em pontos previamente selecionados.

A comunicação dos sensores com a central de monitoramento dos dados é feita, primariamente, com utilização da tecnologia GSM, responsável pelo envio das mensagens para a torre mais próxima. Por sua vez, os dados são transmitidos via protocolo seguro TCP/IP, para um IP estático pelo serviço wireless de dados GPRS (1). Com o GSM a tarifação é efetuada por tempo de conexão. Com o GPRS, a tarifação é efetuada com base na quantidade de dados transmitidos, o que é bem menos caro. A FIGURA 1 mostra o esquema de comunicação com a central.

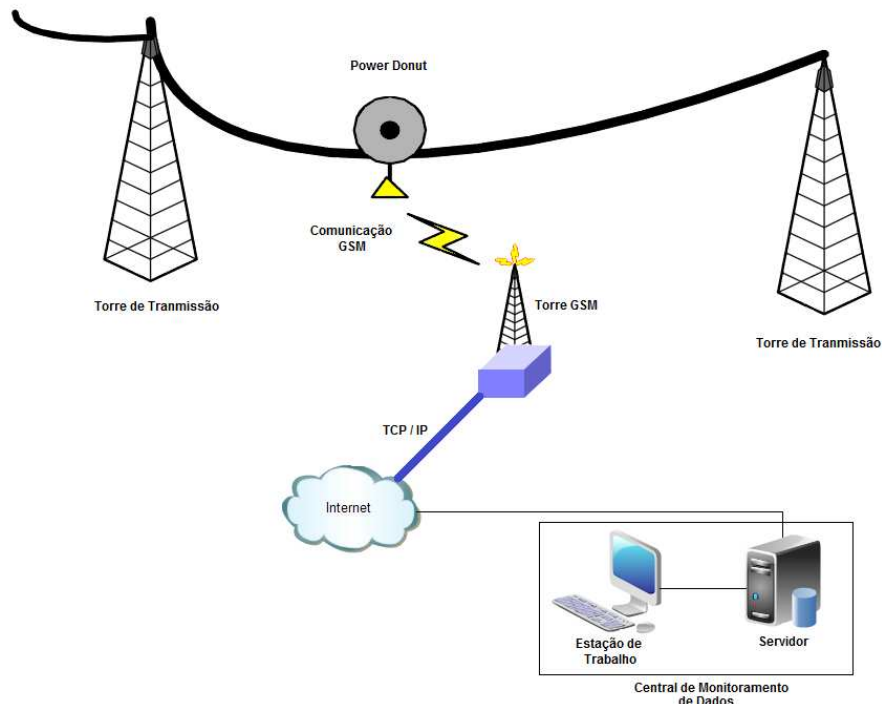


FIGURA 1 - Diagrama Estrutural de Comunicação para Aquisição de Dados.

## 2.0 - OBJETIVOS E MOTIVAÇÃO

O principal objetivo deste trabalho é apresentar a metodologia utilizada para posicionamento de sensores em uma linha aérea de 138 kV e os resultados da aquisição de dados em tempo real de temperatura da superfície do condutor, temperatura ambiente e corrente elétrica para fins de identificação de vãos críticos em linhas aéreas, em conformidade com o projeto P&D 310 CEMIG/ANEEL, utilizando-se de sete sensores instalados em vãos ao longo de uma linha de distribuição de 138 kV da CEMIG, na região de Nova Lima, interligando duas subestações de Barreiro 1 e Nova Lima 1.

## 3.0 - DISPOSITIVO POWER DONUT

O dispositivo Power Donut é um instrumento projetado para aquisição e registro de dados (2)-(3), e também pode ser utilizado para aplicações de monitoramento de alarme de alta tensão. É composto por quatro subsistemas, sistema de energia, sistema de comunicação, sistema computacional e sistema sensorial. Sua instalação se dá em pontos da linha que não possuem alimentação comercial, e seus dados podem ser monitorados via bluetooth ou tecnologia GPRS.

### 3.1 Alimentação

O equipamento utiliza a energia da própria linha para o seu funcionamento. Além disso, possui uma bateria de lítio que permite operar em condições de corrente inferiores a 50 Ampères por até 12 horas. A bateria é carregada automaticamente quando a corrente excede 120 Ampères, e a duração de regarga atinge aproximadamente seis horas.

### 3.2 Sensores

Seu sistema sensorial possui duas sondas de temperatura, além de circuitos internos capazes de medir a corrente no condutor, tensão fase-terra (até 500kV), potência ativa (Watts) e reativa (VARs), sendo também possível obter o ângulo de inclinação (relativa a horizontal) da curva catenária da linha onde o dispositivo é instalado. O sensor mede a tensão pelo monitoramento da corrente de carga devido ao campo elétrico que existe próximo ao condutor. A medição da corrente é feita por uma bobina de Rogowski e possui precisão de 0,5%.

### 3.3 Armazenamento e Comunicação

Os dados monitorados são armazenados em uma memória RAM flash on-board, em um processamento composto por dois microprocessadores de 32 bits. A comunicação faz uso de chip GSM, como é possível visualizar na FIGURA 2.



FIGURA 2 - Abertura do Donut-2 para inserção do chip de comunicação GSM/GPRS/EDGE

## 4.0 - INSTALAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DOS SENSORES

A linha aérea analisada se encontra na região de Nova Lima e interliga duas subestações da Cemig, são elas: Barreiro 1 e Nova Lima 1. A FIGURA 3 apresenta a linha de 138 kV sob estudo do P&D310 através do mapa da região de Belo Horizonte e Nova Lima, identificando a localização dos sete sensores instalados em vãos distintos.



FIGURA 3 - Região e localização dos sensores instalados em agosto de 2012.

Idealmente, os Donuts deveriam ser instalados nos vãos onde a média dos resfriamentos dos cabos é menor, priorizando assim o monitoramento dos climatologicamente críticos. Porém, a determinação dos vãos de instalação, inicialmente definidos pela CEMIG em conjunto a UFMG, foi definida considerando os seguintes fatores: (i) a facilidade de acesso ao trecho da linha; (ii) a qualidade do sinal de cobertura obtida pelo chip GSM; (iii) um estudo estatístico do comportamento dos ventos na região com base em análises de dados cedidos por estações climatológicas do INMET (próximas a região da linha de transmissão) e INFRAERO e (iv) simulações da CLA (Camada Limite da Atmosfera) através do software ANSYS de modo a se determinar os vãos onde a velocidade de incidência dos ventos, em módulo, é menor para uma série de resultados. Considerando este último fator, foram extraídos e analisados 725 simulações gerando um perfil estatístico (FIGURA 4) com a representação numérica da frequência com que cada vão apresentou a menor velocidade dos ventos.

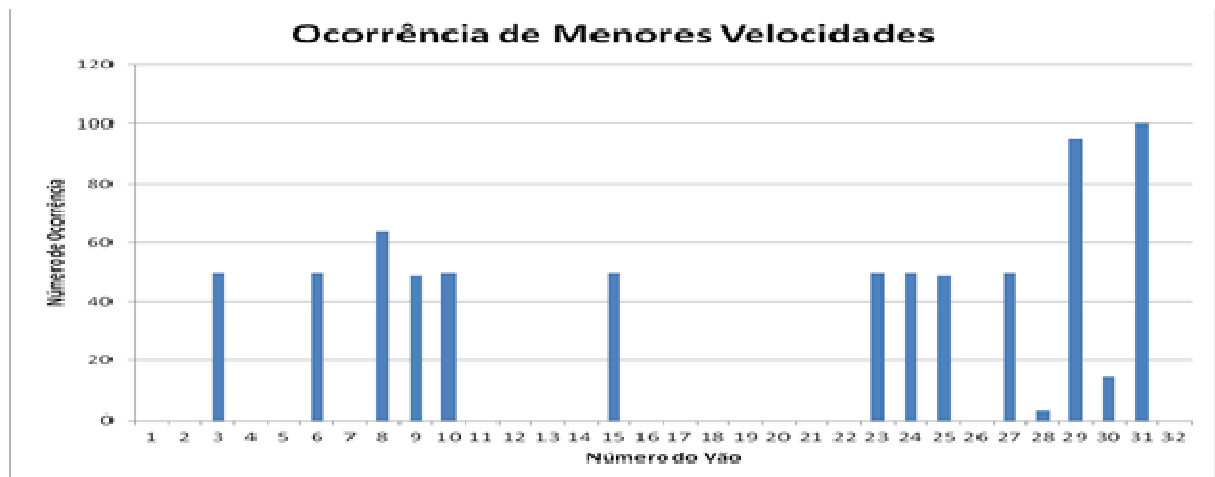


FIGURA 4 - Frequência de ocorrências dos vãos climatologicamente críticos encontradas através das 725 simulações.

Neste contexto, o comportamento dos Donuts são constantemente avaliados e planeja-se, hora necessário, alteração na localização dos sensores para melhoria da aquisição dos dados e devido ao comportamento dinâmico da velocidade do vento.

Dentre os sete dispositivos Power Donuts instalados inicialmente quatro foram configurados com uma das sondas medindo a temperatura da superfície do condutor e a outra medindo a temperatura ambiente. Esta implementação foi necessária pois as temperaturas obtidas pelas estações climatológicas próximas ao local não garantiam precisão confiável em função da distância estação-linha. Os outros três sensores obtiveram instalação padrão e registram por ambas as sondas a temperatura do condutor, garantindo assim maior precisão na medição pelo seu valor médio.

## 5.0 - AQUISIÇÃO DE DADOS EM TEMPO REAL

Através do programa de gerenciamento dos dados, desenvolvido pela empresa fabricante do Power Donut, é possível a captura e análise dos resultados adquiridos nos pontos de instalação (FIGURA 5). Um estudo e análise detalhada dos dados obtidos para validação foi feito após a realização de testes no Laboratório de Computação Evolucionária da UFMG. Esta análise se fez necessária tendo em vista que os mesmos dados são utilizados no escopo de uma metodologia genuína desenvolvida para identificação de vãos críticos em tempo real em linhas aéreas.

Os dados são coletados em tempo real e salvos em um banco de dados num intervalo de 70 segundos. A análise dos cálculos gerados para se determinar os vãos críticos é realizada a cada 5, 10 ou 15 minutos, conforme interesse do usuário. Nestas janelas de tempo são calculadas as médias dos valores da temperatura coletados (Tabela 1). Este intervalo é importante para a análise devido à inércia térmica do condutor, uma vez que a convecção é um processo lento e a alteração da temperatura devido à ação de rajadas de vento não é imediata.

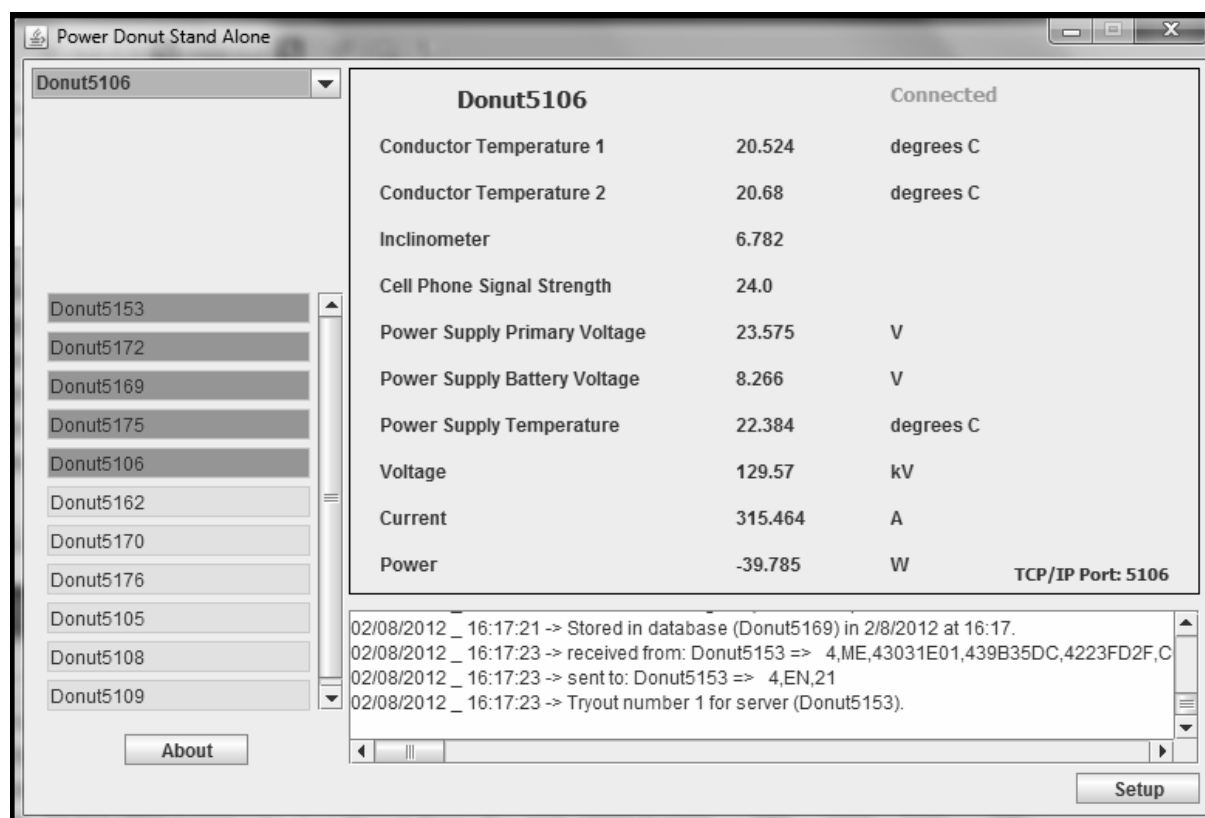


FIGURA 5 - Tela principal do software de aquisição de dados "Power Donut Stand Alone".

Tabela 1 - Média das temperaturas coletadas pelos sensores durante o dia 16/04/2013 em janelas de 5, 10 e 15 minutos.

Janela de	Tempo	DONUT 5153			DONUT 5172		
		Temperatura Média (°C)			Temperatura Média (°C)		
Período		5 min	10 min	15 min	5 min	10 min	15 min
	00h00m às 00h15m	19.385	19.334	19.308	21.325	21.312	21.325
	06h00m às 06h15m	19.514	19.501	19.476	20.514	20.304	20.097
	12h00m às 12h15m	28.452	28.401	28.481	29.591	30.180	30.340
	18h00m às 18h15m	23.996	23.893	23.815	22.330	22.095	21.884

Um programa computacional foi desenvolvido para a captura dos dados e armazenamento dos mesmos em um banco de dados para futuras consultas, cálculos e análises. O aplicativo e os dados são hospedados em um servidor onde se hospeda também o CSS (Critical Span System Software) desenvolvido no P&D 310. Os dados armazenados e considerados relevantes para o projeto P&D310 foram: instante de captura com precisão de milissegundos; temperaturas obtidas pelas duas sondas; inclinação do dispositivo na linha de transmissão; tensão e corrente no condutor.

Como referenciado anteriormente, a qualidade dos recebimentos dos dados através dos canais de comunicação foi avaliada. A Tabela 2 correlaciona uma amostra de quatro dos Donuts instalados e testados, com seu respectivo número de identificação e de vão onde está localizado.

Tabela 2 - Identificação e localização dos Donuts dos vãos 13, 16, 17 e 33.

Power Donut Id	Vão	Recebimento de dados
<b>Coordenadas Donut 5106</b>	<b>UTM 23 k 611494 – 7788582</b>	
5106	17-18	Correto
<b>Coordenadas Donut 5153</b>	<b>UTM 23 k 609833 – 7788698</b>	
5153	13-14	Correto
<b>Coordenadas Donut 5169</b>	<b>UTM 23 k 610534 – 7788649</b>	
5169	16-17	Correto
<b>Coordenadas Donut 5172</b>	<b>UTM 23 k 618025 – 7789680</b>	
5172	33-SE	Correto

## 6.0 - METODOLOGIA E TESTES

A aquisição dos dados de temperatura foi realizada seguindo duas configurações diferentes de instalação para os Power Donuts:

- (a) Na primeira, os dois sensores presentes no dispositivo foram utilizados para medir a temperatura superficial do condutor.
- (b) Na segunda, uma das sondas do dispositivo foi utilizada para medir a temperatura superficial do condutor e a outra foi afastada do condutor para medir a temperatura ambiente.

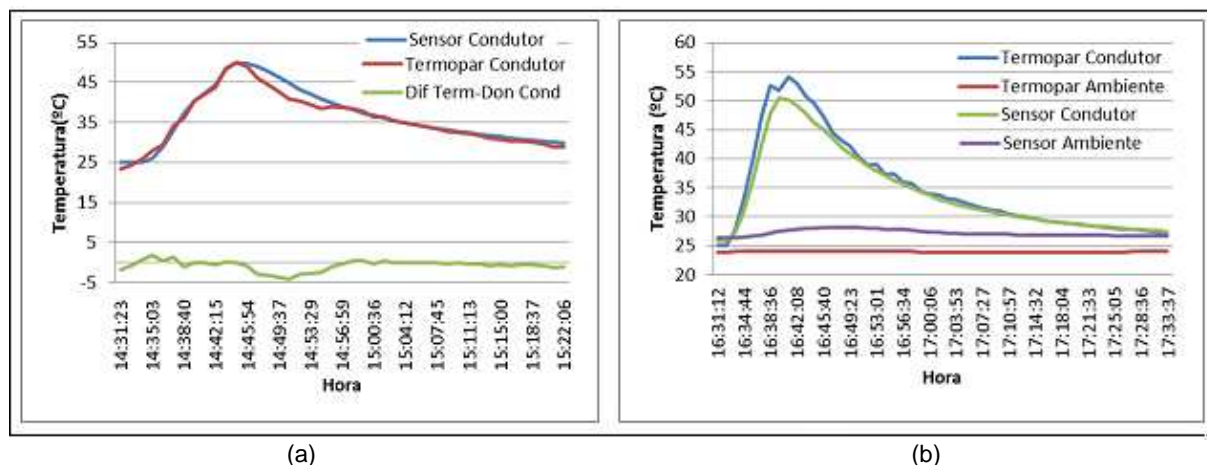


FIGURA 6 – (a) Temperatura superficial média do condutor medida com ambos os sensores e por termopar; (b) Temperaturas superficial e ambiente medidas pelos sensores e por termopares (à direita).

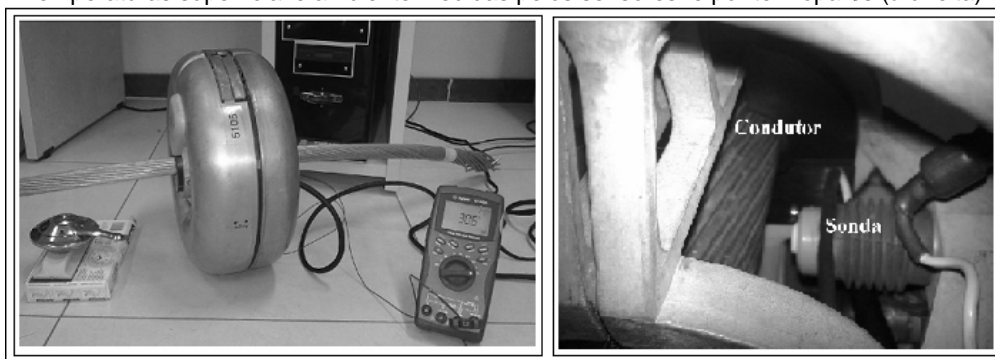


FIGURA 7 - Teste de verificação dos sensores de temperatura e detalhe do afastamento da sonda responsável pela medição da temperatura ambiente.

Os testes foram realizados em laboratório para verificar a precisão dos sensores. A FIGURA 6 (a) apresenta os resultados para a configuração (a) e a FIGURA 6 (b) para a configuração (b). Como pode ser observado na FIGURA 6 (a) a diferença de temperatura medida pelo sensor e termopar são inferiores a 5° C. A FIGURA 6 (b)



mostra por outro lado que a diferença na medida da temperatura ambiente é inferior a 3 ° C. Esta diferença se explica devido ao fenômeno da irradiação do calor do cabo condutor na medida realizada pelo sensor, fazendo com que esta seja ligeiramente superior à temperatura ambiente. A FIGURA 7 mostra a proximidade da sonda que mede a temperatura ambiente em relação ao cabo condutor.

## 7.0 - ANÁLISE DOS DADOS COLETADOS E CONCLUSÕES

Para traçar o perfil completo de temperatura da linha seria necessário obter informações de todos os vãos através de sensores. No entanto, essa é uma opção muito cara, tendo em vista o elevado custo dos sensores e do software para se fazer o monitoramento.

Através dos dados coletados durante períodos de monitoramento, é possível amostrar os comportamentos da temperatura na superfície do condutor e corrente elétrica. Estas grandezas são importantes para o desenvolvimento da metodologia de determinação dos vãos críticos em uma linha de transmissão. As FIGURA 8 e FIGURA 9 apresentam a distribuição das temperaturas e correntes medidas por quatro Donuts em um período de 24 horas. Pelo perfil de temperatura é possível notar que no período delimitado entre 10h e 18h ocorreram os maiores valores de temperatura na superfície do condutor e que é possível ter variações de temperatura entre vãos de até 10 °C (Donuts 5106 e 5153 às 22:30 horas). Esta grande diferença de temperatura é devido às diferenças de valor nas velocidades do vento e respectiva direção incidindo sobre os cabos.

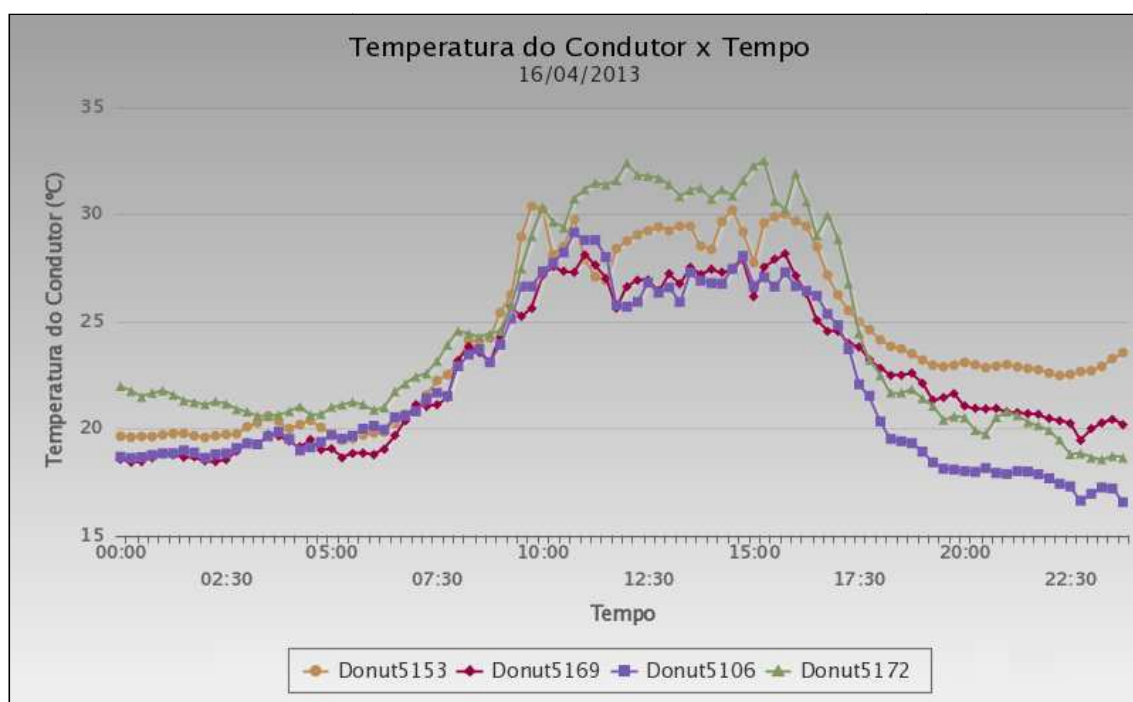


FIGURA 8 – Perfil de temperaturas na linha durante o período de um dia para quatro Donuts instalados (dados extraídos do software CSS)

Pela FIGURA 9 é possível observar um mesmo comportamento quanto aos valores de corrente ao longo do dia. Como a medição da corrente realizada por cada Donut se dá para uma mesma linha de transmissão, idealmente, os perfis deveriam ser iguais. Porém, se tratando de uma linha real, esperava-se que os valores fossem muito próximos como foi possível observar.

No período de 18:00 às 22:00 horas, observa-se um aumento no carregamento da linha devido ao pico da demanda. Entre 00:00 e 06:00 horas, há uma diminuição do carregamento da linha e com menor valor de temperatura ambiente e sem radiação solar na madrugada, ocorre grande redução na temperatura superficial do condutor.

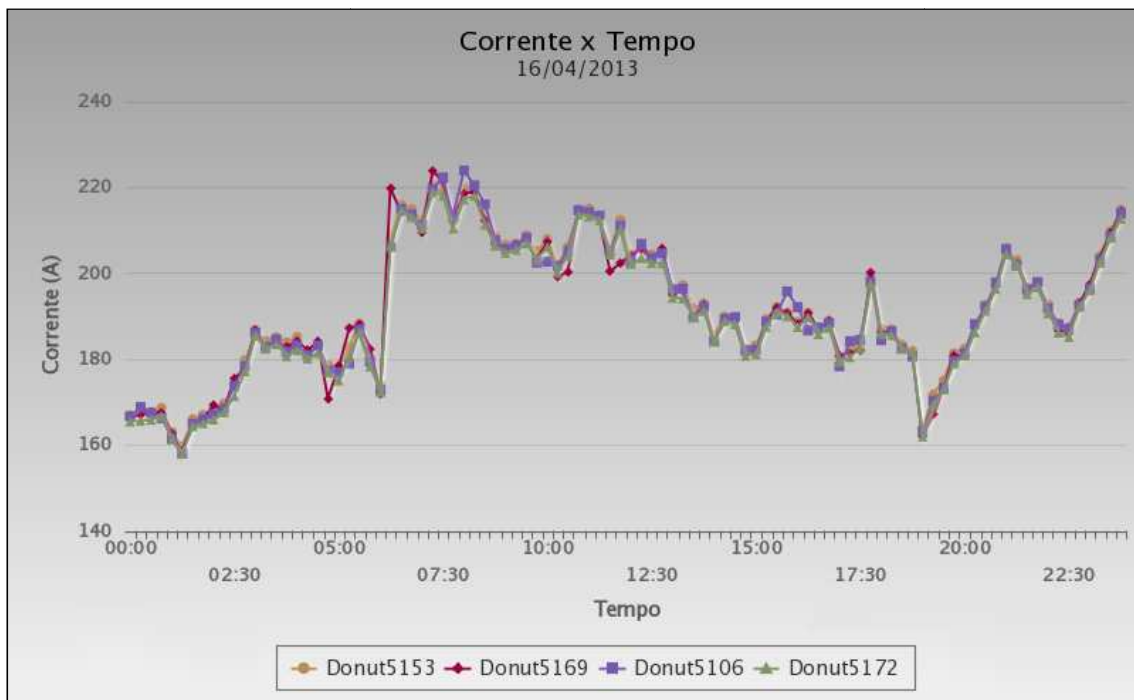


FIGURA 9 – Perfil de corrente na linha durante o período de um dia para quatro Donuts instalados (dados extraídos do software CSS)

A aquisição de dados se mostra então uma importante etapa no desenvolvimento do projeto. A metodologia desenvolvida enfatiza a sua importância, considerando o monitoramento de linhas aéreas com poucos sensores e se mostra extremamente vantajosa para as concessionárias de energia. As características descritas neste informe, ou seja, o sistema de aquisição de dados utilizando dispositivos específicos para a linha de transmissão, capturando e registrando dados relevantes em tempo real, foram implementados com o objetivo de disponibilizar uma solução de custo relativamente reduzido, enfatizando a importância da pesquisa e do desenvolvimento de metodologias pelo P&D310.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) USI – <http://www.usi-power.com/> - USi 84 – Business Park Drive – Armonk, New York, USA 105004 – 2006.

(2) H. Schrayshuen, "Monitoring Line Quantities Using the Power Donuts System". Niagara Mohawk Power Corporation.

(3) <http://www.usi-power.com/Products%20&%20Services/Donut/PowerDonut2%20Cell.pdf>

## 9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

**João Antônio de Vasconcelos:** Doutor pela École Centrale de Lyon - França (1994), Mestre pela UFPb (1985) e Engenheiro Eletricista pela UFMG (1982). É Professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG. É pesquisador nível 1B do CNPq. É membro fundador de duas sociedades científicas ICS (Intern. Compumag Society) e SBMAG (Soc. Bras. de Eletromagnetismo Aplicado). Possui mais de 220 trabalhos publicados entre periódicos, congressos e capítulos de livros nacionais e internacionais. Dentre estas publicações se destacam as contribuições na área da otimização mono e multiobjetivo, aplicadas a problemas modelados com e sem incertezas paramétricas. Orientou 12 alunos de doutorado, 18 alunos de mestrado e mais de uma centena de alunos de graduação. É o responsável pela criação do Lab. de Computação Evolucionária da UFMG, onde chefia uma equipe de aproximadamente 40 pesquisadores em níveis de pós-doutorado, doutorado, mestrado e graduação desde sua criação. Coordenou dezenas de projetos de pesquisa nacionais (CNPq, P&D ANEEL, FAPEMIG) e internacionais (CAPES-COFECUB, Lab. Int. Associado James Clerk Maxwell).

**Carlos Alexandre M. Do Nascimento:** Doutor pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica (2009) e Mestre em Engenharia Mecânica (1999), ambos pela UFMG, Engenheiro Mecânico pela PUC-Minas (1993) e Técnico em Eletrotécnica pelo CEFTE-MG (1986). Atualmente é Engenheiro de Tecnologia e Normalização da Cemig Distribuição S.A., sendo responsável pela gestão do programa de P&D da Aneel na Diretoria de Distribuição



e Comercialização da Cemig D. É membro regular da Cigré Brasil por meio da coordenação do Grupo de Trabalho GT-06 “Princípios para Projeto de Linhas Aéreas” e representante da Cigré Internacional por meio do Grupo B2-TAG-4 “Aspectos Elétricos de Linhas Aéreas”. Tem experiência na área de Engenharia de Distribuição e Transmissão de Energia, com ênfase em Engenharia de Otimização, Térmica e Computacional, atuando principalmente nos seguintes temas: monitoramento, otimização e projeto de linhas de transmissão, ampacidade, condutores especiais, supercondutores e sistemas ópticos. Possui 7 registros de patentes e 2 Registros de Software para sistemas de potência. Maiores detalhes podem ser vistos em seu CV Lattes.