

CONTROLE E MONITORAMENTO DE TEMPERATURA DE CONDUTORES EM LINHAS ÁREAS DE ALTA TENSÃO

CARLOS A. M. NASCIMENTO E ANTÔNIO C. CASTRO

Cemig Distribuição S.A.
Av. Barbacena, 1200 – Santo Agostinho -
Belo Horizonte – MG / Brasil
E-mail: caxandre@cemig.com.br

*Alexandre S. Paulino; Hugo M. Matoso; Marcello D. G. Júnior;
Saulo L. S. Mariano; Moisés Ferber; Geraldo A. C. França; João A. Vasconcelos*

*Laboratório de Computação Evolucionária, Depto. de Engenharia Elétrica - UFMG
Belo Horizonte - MG / Brasil
E-mail: joao@cpdee.ufmg.br*

Abstract— The main objective of this work is to present the experimental results gotten with the R&D project called “Application of the Atmospheric Boundary Layer Study in Overhead Transmission Line Ampacity”. Its focus is on on-line measurement of the conductor temperature along one OHTL’s path by Power Donut-2 monitoring system. The experimental part was implemented in the region of Acuruí/MG, in an OHTL of 138 kV, where the temperature of the conductor was widely monitored using the GPRS wireless technology. This paper shows the stages developed for implantation and operation of the Power Donut-2 monitoring system, where the objective is to constantly supervise the temperature of the conductor and to use the thermal profile of the conductor in studies to increase the energy transmission capacity. This work is presented in four parts: (i) introduction, description and the state of the art in real time monitoring; (ii) the methodologies for ampacity evaluation [Nascimento and Vasconcelos, 2007], (iii) the installation of the sensors Power Donut-2 in the line located at Acuruí/MG and (iv) presentation of the obtained experimental results and the perspectives to continue this research.

Keywords— Deterministic ampacity, Statistic ampacity, Overhead transmission lines, Weather parameters, Real-time on-line monitoring system and GPRS communication protocol.

Resumo— O objetivo desse trabalho é apresentar os resultados experimentais obtidos com o projeto de P&D-162 da Aneel/Cemig/UFMG denominado “Aplicação do Estudo da Camada Limite Atmosférica na Ampacidade de Linhas Aéreas” focado no monitoramento em tempo real de quatro vãos de uma linha aérea da Cemig. A parte experimental foi implementada na região de Acuruí/MG através de uma linha aérea de 138 kV amplamente monitorada por medições em tempo real da temperatura dos condutores utilizando a tecnologia wireless GPRS. Esse trabalho irá mostrar as etapas desenvolvidas para implantação e operação do sistema de monitoramento Power Donut-2, onde o objetivo foi supervisionar constantemente a temperatura do condutor e usar o perfil térmico do condutor nos estudos de aumento da capacidade de transmissão das linhas aéreas, que é o foco central do referido projeto de P&D. O trabalho está dividido em quatro partes: (i) introdução, histórico e estado da arte no monitoramento em tempo real de linhas aéreas; (ii) as metodologias para cálculo da ampacidade de linhas aéreas [Nascimento e Vasconcelos, 2007], (iii) a instalação dos sensores Power Donut-2 na linha no sítio de Acuruí/MG e (iv) apresentação dos resultados experimentais obtidos e perspectivas sobre a continuidade da pesquisa.

Palavras-chave— Linhas Aéreas, Ampacidade Determinística, Ampacidade Estatística, Parâmetros Climatológicos, Monitoramento em Tempo Real e Comunicação GPRS

1 Introdução

A engenharia de controle e monitoramento da capacidade de transmissão das linhas aéreas vem se desenvolvendo através do uso de tecnologias de sensoriamento remoto, as quais objetivam medir a mudança de estado dos condutores aéreos em tempo real. A mudança de estado por sua vez influencia nas variações de temperatura e na altura do condutor ao solo, e com isso, influi diretamente na capacidade de transmissão dessas instalações.

A partir do monitoramento das condições dinâmicas dos condutores é possível operar o sistema com informações precisas. A capacidade térmica do condutor é definida na fase do projeto eletromecânico da linha aérea para uma dada corrente elétrica (I), que por sua vez, está associada a

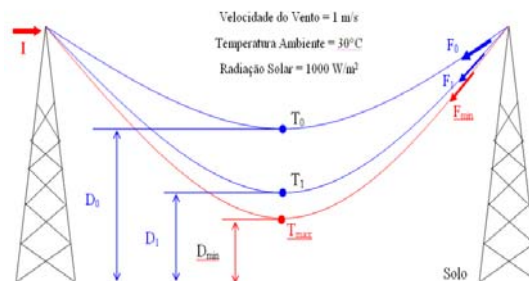


Figura 1. Variáveis: corrente elétrica (I), temperatura do condutor (T), Força Mecânica (F) e altura ou distância do condutor ao solo (D)

uma dada condição climatológica, que normalmente é prescrita, conforme mostra a Figura 1.

A temperatura (T_0) do condutor define a temperatura de lançamento do condutor da linha (sem corrente elétrica). A temperatura (T_1) define a

temperatura de projeto. A temperatura (T_{max}) define a temperatura limite máxima de operação do condutor. As temperaturas (T_0 , T_1 , T_{max}) se correlacionam respectivamente, às distâncias do condutor ao solo (D_0 , D_1 , D_{min}) e aos esforços mecânicos associados (F_0 , F_1 , F_{min}).

1.1 Histórico no Monitoramento em Tempo Real de Linhas Aéreas

O primeiro sistema de monitoramento de linha de energia surgiu nos EUA durante os anos 80. O primeiro protótipo foi denominado por Power Donut [Furtado, 1997].

Esse sistema foi desenvolvido para monitorar a temperatura superficial do condutor, que é uma das formas de se medir indiretamente a altura do condutor ao solo. A Figura 2a mostra detalhe desse tipo de sensor instalado em condutor aéreo de alta tensão.

Nos anos 90 surgem dois novos tipos de sistemas de monitoramento. O CAT1, conforme mostra a Figura 2b, foi derivado da área de mineração, onde o sensor de carga (célula de carga) utilizado para medir o peso de minério nas esteiras rolantes foi adaptado para medir a força mecânica de esticamento do condutor na linha, sendo outra forma viável de obter indiretamente a altura do condutor ao solo. Tanto na medição da temperatura ou na força mecânica é possível obter com boa aproximação a altura do condutor ao solo, através de fórmulas analíticas.

O sistema Sonar, conforme mostra a Figura 2c, foi derivado do setor petroquímico, onde o sensor de ultra-som para medição de altura do reservatório de combustíveis foi adaptado para medir diretamente a altura do condutor ao solo.

No final dos anos 90 surgiu outro sistema denominado Laser que mede os eixos de variação do condutor em relação ao solo e o balanço lateral do condutor em relação às estruturas das linhas.

A título de ilustração é mostrado na Figura 3 um dia típico de monitoramento em uma linha de 138 kV (condutor Linnet), com informações de três sistemas distintos [Nascimento, 2001].

As informações disponibilizadas pelos sistemas de monitoramento e os limites para essas variáveis nas fases de projeto e de operação são utilizadas para operar o sistema de forma otimizado e, principalmente, agregando ainda mais segurança à operação em tempo real das linhas aéreas.

As informações monitoradas diretamente no condutor são transmitidas em tempo real, através de sistemas de telecomunicações até um centro de controle. Algoritmos específicos tratam as informações dos carregamentos, elétrico e térmico, dos condutores para uso em controle e monitoramento da altura do condutor ao solo nas linhas aéreas.



Figura 2. Sensores utilizados para monitorar linhas aéreas em tempo real.

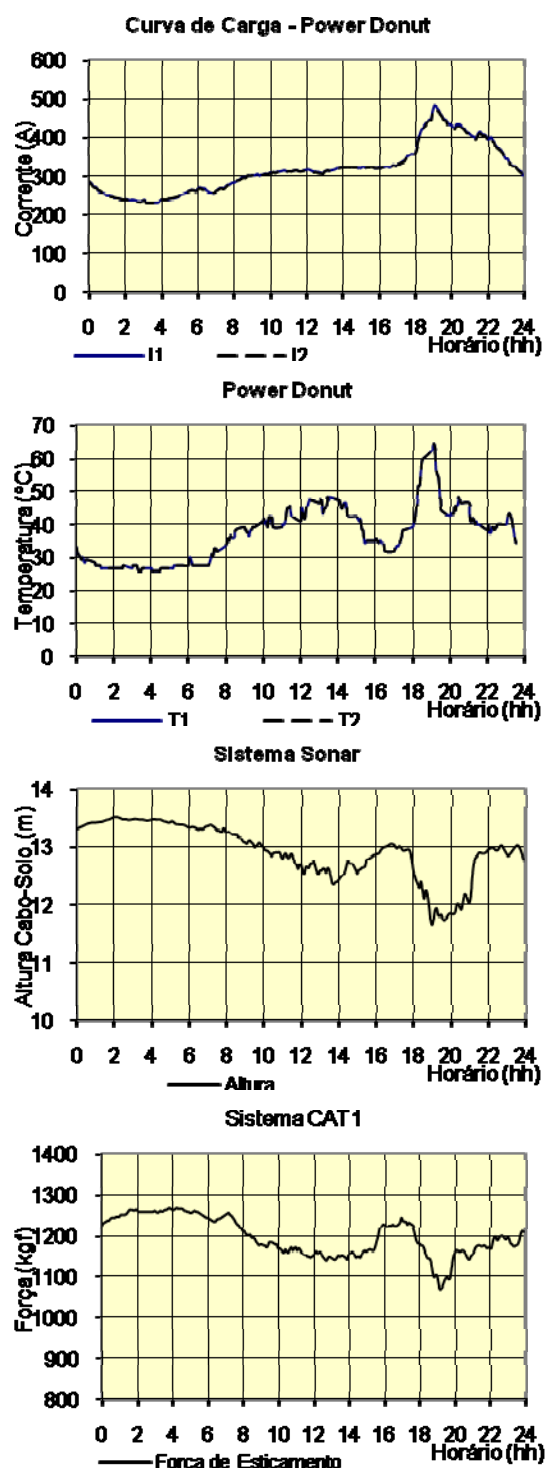


Figura 3. Exemplo de informações monitoradas em tempo real por três sistemas distintos em uma mesma linha sob um dia típico.

A base digital das medições de campo é disponibilizada, em ambiente WEB, de duas formas

básicas: histórico dos registros e valor atual ou dinâmico.

Com essas informações é possível implementar um algoritmo com algum tipo de processamento estatístico e inteligência artificial para a função de predição, dentre outras funções operativas, como ainda, alertar e orientar o centro de controle do sistema elétrico na busca da maximização do nível de carregamento das linhas para evitar cortes de carga indesejáveis.

Em [Silva, 2005] é mostrado uma aplicação prática sobre o aumento plausível na capacidade de transmissão das linhas aéreas com o uso da tecnologia de monitoramento comparado aos valores tradicionais calculados na fase de projeto e sem a necessidade de alteração do projeto original, o que pode representar uma otimização considerável aplicada às linhas aéreas em operação.

Em [Nascimento, 2007] é mostrado com mais detalhes técnicos o princípio de funcionamento dos principais sistemas de monitoramento, as suas vantagens e desvantagens, as principais aplicações e as comparações entre os sistemas mais utilizados no setor de energia.

1.2 Monitoramento em Tempo Real de Linhas Aéreas no Brasil

O custo dos sistemas e equipamentos importados ainda é muito elevado e restringe a aplicação em larga escala industrial dessa tecnologia no Brasil. Outras formas alternativas de monitoramento estão em fase de desenvolvimento em centros de pesquisa em todo o mundo, mostrando que o mercado para essa tecnologia ainda é promissor. Em [Nascimento, 2007] está resumido dois novos sistemas de monitoramentos que a Cemig, em parceria com o CPqD e a UFJF estão desenvolvendo.

Nesse contexto, a Cemig em parceria com a UFMG, via projeto de p&d 162, vem desenvolvendo novos estudos que buscam minimizar a necessidade de se monitorar vários pontos em cada linha aérea, objetivando reduzir o custo de expansão dessa tecnologia no Brasil.

2 Objetivos e Motivação

Neste trabalho, objetiva-se apresentar os resultados preliminares obtidos sobre a influência da regionalização climatológica na capacidade de transmissão das linhas aéreas através do registro da temperatura do condutor usada no cálculo da ampacidade. Ampacidade nada mais é do que a capacidade da linha em transportar energia elétrica, limitada pelo aquecimento dos seus condutores, o qual é devido à corrente elétrica associada à carga alimentada e às condições climatológicas, como temperatura ambiente, velocidade e direção de vento, radiação solar e umidade, dentre outras.

Para atingir esse objetivo, várias etapas de desenvolvimento estão sendo implementadas no P&D-162, tais como:

- i) estudar, experimental e numericamente, a influência da regionalização climatológica no perfil térmico do condutor ao longo da linha;
- ii) fazer adaptações do método de cálculo do perfil térmico do condutor levando em consideração o estudo da camada limite da atmosfera;
- iii) definir uma modelagem matemática que considere as influências do clima ao longo de todo percurso da linha, e;
- iv) validar essa metodologia através de dados de uma linha real em operação.

3 Formulação de Cálculo da Ampacidade de Linhas Aéreas

A ampacidade é função do perfil térmico dos condutores obtida na fase de projeto da linha, que está relacionada a três fatores fundamentais: i) distância do condutor ao solo – segurança operacional, dependente do peso e da dilatação térmica do material do condutor, que é definida em normalização técnica pertinente [NBR 5422, 1985], ii) energia a ser transportada ou carga admissível da linha, e iii) limite térmico máximo do condutor, isto é, preservar a vida útil devido à elevação excessiva do perfil de temperatura do condutor [Nascimento, 1999].

A partir desses três fatores é possível selecionar um condutor com perfil térmico que atenda a carga requerida no projeto da linha. Com o cálculo do perfil térmico do condutor é definida a corrente elétrica associada a uma temperatura de operação, e conseqüentemente, definida a ampacidade da linha.

A elevação de temperatura dos condutores das linhas aéreas pode ser calculada em regime permanente e em regime dinâmico. Os detalhes desta formulação podem ser encontrados em [ANJAN, 2000].

3.1 Cálculo do perfil térmico do condutor em regime dinâmico

O fenômeno termodinâmico no condutor é regido por uma equação de difusão, conforme (3.1):

$$\nabla^2 T + \frac{q}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.1)$$

onde

T	Temperatura	°C
q	Potência térmica por unidade de comprimento	W / m
k	Condutividade térmica do condutor	W m / °C
α	Difusão térmica.	m ² / s
t	Tempo	s

A difusão térmica é dada por $\alpha = \frac{k}{\gamma C_p}$, onde

γ	Densidade de massa	Kg / m^3
C_p	Calor específico	$\text{W} / \text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}$

É possível mostrar que (3.2) é solução de (3.1), desde que efeitos menos relevantes, tais como os aquecimentos devidos aos fenômenos ferromagnéticos, ionização, evaporação, entre outros, sejam desconsiderados, isto é, que se considerem apenas os efeitos preponderantes: variação da temperatura do filme condutor no tempo, o efeito Joule, a radiação solar como fontes de calor e a convecção e irradiação na superfície do condutor como perdas de calor para o meio circundante [MORGAN, 1982].

$$M c_p \frac{dT_s}{dt} = P_J + P_S + P_M - P_R - P_C \quad (3.2)$$

Através da escolha de um passo de tempo adequado ($dt=\Delta t$), pode-se assumir a solução da equação (3.2) como [Anjan, 2000]:

$$T_s = \sum_0^t \frac{(P_J + P_S + P_M - P_R - P_C) \Delta t}{M c_p} + T_I \quad (3.3)$$

Em (3.2 e 3.3), tem-se que:

M	Densidade linear de massa do condutor	Kg / m
T_s	Temperatura média do condutor	$^\circ\text{C}$
C_p	Calor específico	$\text{W} / \text{kg} \text{ } ^\circ\text{C}$
P_J	Ganho de calor por efeito Joule por unidade de comprimento	W / m
P_S	Ganho de calor por radiação solar por unidade de comprimento	W / m
P_M	Ganho de calor por efeito ferro-magnético por unidade de comprimento	W / m
P_R	Perda de calor por radiação por unidade de comprimento	W / m
P_C	Perda de calor por convecção por unidade de comprimento	W / m
T_I	Temperatura inicial do condutor	$^\circ\text{C}$

3.1 Cálculo do perfil térmico do condutor em regime permanente

No balanço térmico do condutor, os ganhos de calor devido aos fenômenos ferromagnéticos (P_M), à ionização (corona) (P_I) e a perda de calor por vaporização (P_V) são menos relevantes e, portanto, são desconsideradas. Apenas os termos preponderantes, ganho de calor por efeito Joule (P_J) e por radiação solar (P_S), e as perdas de calor por convecção (P_C) e por radiação na superfície do condutor (P_R), são considerados.

A equação de equilíbrio (3.4) traduz o balanço energético para o volume de controle na superfície periférica do condutor conforme mostra a Figura 4.

A condição térmica do condutor pode ser definida em regime permanente ou estática, conforme equações (3.5) e (3.6).

$$W_A - W_D = 0 \quad (3.4)$$

$$(P_J + P_S) - (P_C + P_R) = 0 \quad (3.5)$$

$$(W_S + W_J) - (W_R + W_C) = \Delta W_{AC} \quad (3.6)$$

Em (3.6):

- W_S – Energia absorvida por efeito da radiação solar por unidade de comprimento;
- W_J – Energia absorvida pelo condutor por efeito Joule por unidade de comprimento;
- W_R – Energia dissipada para o meio ambiente devido à irradiação por unidade de comprimento;
- W_C – Energia dissipada para o meio ambiente devido à convecção por unidade de comprimento;
- ΔW_{AC} - Energia acumulada.

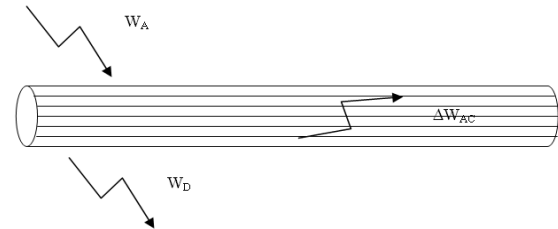


Figura 4. Calor absorvido ($W_A = W_S + W_J$), Calor Dissipado ($W_D = W_R + W_C$) e Calor Armazenado no condutor (ΔW_{AC}).

A ampacidade é finalmente obtida através de (3.7).

$$I = \sqrt{\frac{P_C + P_R - P_S}{R_0 (1 + \alpha_0 T_m)}} \quad (3.7)$$

Em (3.7), as grandezas intervenientes são:

I	Corrente eficaz (Ampacidade)	A
R_0	Resistência à corrente contínua por unidade de comprimento a uma temperatura T_0	Ω / m
α_0	Coefficiente de variação da resistência com a temperatura	$1 / ^\circ\text{C}$
T_m	Variação de temperatura média da seção do condutor $(T_s + T_0) / 2$	$^\circ\text{C}$
T_s	Temperatura do condutor	$^\circ\text{C}$
T_0	Temperatura de referência	$^\circ\text{C}$

A Figura 5 mostra um exemplo dos resultados obtidos para o regime permanente sendo possível observar que: i) o perfil de temperatura do condutor tem correlação polinomial com a ampacidade, e ii) a velocidade do vento tem grande contribuição na variação de ampacidade e no perfil térmico do condutor.

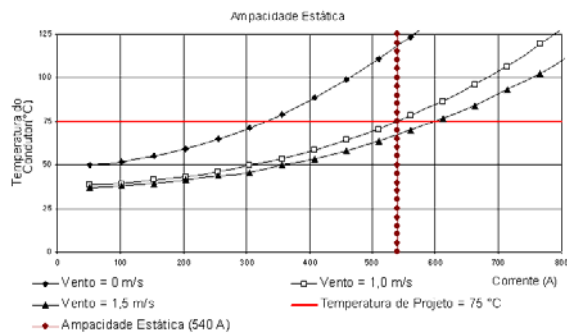


Figura 5. Representação Geométrica de um Cálculo de Ampacidade Estática (Regime Permanente – Condutor Linnet).

4 Sítio Experimental de Acuruí/MG

Para monitorar as condições operativas dos condutores de linhas aéreas foi utilizada a região de estudo de Acuruí, distante de 50 km de Belo Horizonte-MG conforme mostra a Figura 6a. [VALLE, 2005]. A Figura 6b apresenta a linha de 138 kV sob estudo do p&d-162 no mapa topográfico da região de Acuruí, digitalizada com a localização dos quatro sensores Power Donut-2 que foram instalados para o estudo do perfil térmico da linha.

4.1 Sistema Power Donut-2

Para o monitoramento da linha foi adquirido o sistema Power Donut-2 em função de facilidade no processo de instalação em campo e devido a comunicação na tecnologia via telefonia móvel celular - GPRS, o que facilita a aquisição dos dados em tempo real no protocolo IP e WEB a partir do centro de controle da Cemig e da possibilidade de replicação das informações para a UFMG.

A Figura 7a mostra os testes em laboratório realizados na UFMG para a certificação das medições de temperatura e corrente dos sensores. A Figura 7b mostra uma visão interna da montagem do sensor Power Donut-2, composto basicamente por: (i) um transformador de corrente, (ii) sistemas de controles, digital e analógico, e (iii) modem de comunicação via GPRS.

4.2 Instalação dos Sensores Power Donut-2

A Figura 8 apresenta o processo de instalação dos sensores Power Donut-2 em campo. Esse sistema possui um diferencial em relação aos outros sistemas de monitoramento devido à sua característica de mobilidade e de fácil instalação em linha viva. Outra vantagem desse sistema é minimizar a possibilidade de vandalismo, uma vez que, o sensor está instalado ao potencial do condutor na linha aérea.



Figura 6. Localização da região de Acuruí-MG e detalhe da localização da linha de estudo na região de Acuruí-MG.



Figura 7. Testes iniciais do sensor de temperatura no laboratório de alta tensão da UFMG e detalhe da arquitetura do sensor Power Donut-2.



Figura 8. Processo de instalação dos sensores Power Donut-2 em campo utilizando bastão e caminhão isolado.

4.3 Aquisição dos Dados em Tempo Real dos Sensores Power Donut-2

A Figura 9 apresenta um diagrama simplificado da arquitetura da base de informações para aquisição dos dados em tempo real através dos sensores instalados em campo até o centro de controle da Cemig e da UFMG.

O uso da tecnologia GPRS mostrou ser viável para o controle e monitoramento de informações remotamente no campo. Dessa forma, a aquisição de dados nos condutores na alta tensão poderá ser realizada com a tecnologia GPRS.

Outras vantagens são atribuídas para a comunicação GPRS, como por exemplo, o custo reduzido para transmissão dos pacotes de dados e a baixa ocorrência de manutenção no sistema de comunicação.

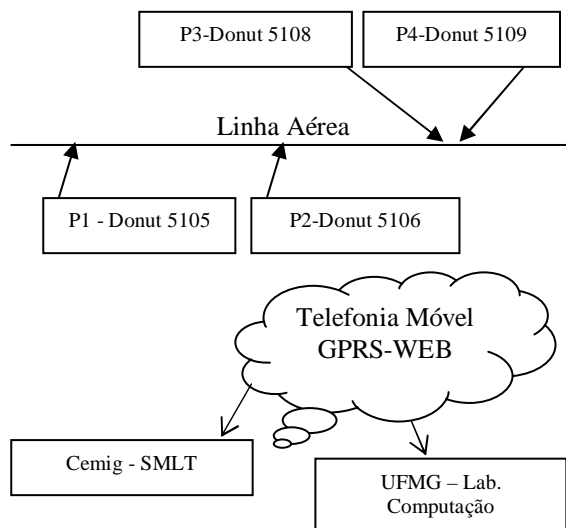


Figura 9. Diagrama simplificado com a arquitetura da base de informações para aquisição dos dados em tempo real na Cemig e na UFMG.

5 Análise dos Resultados e Conclusões

A Figura 10 apresenta os primeiros resultados brutos obtidos com as medições de campo.

Com esses primeiros resultados já se pode observar que existe uma diferença entre o perfil de temperatura do condutor ao longo da linha.

Apesar da linha aérea em estudo estar com uma corrente reduzida (60 A), a variação do perfil de temperatura do condutor confirma a existência de uma variação climática considerável ao longo da mesma.

O próximo passo do projeto p&d-162 será correlacionar a variação climática na região com o perfil térmico do condutor sob condições de carga elevada na linha para pesquisar como a variação do perfil térmico do condutor irá se comportar nestas condições.

Por hipótese, se a variação de temperatura for pequena ao longo da linha na carga elevada, pode-se concluir que será possível explorar mais o nível atual de carregamento dessa linha.

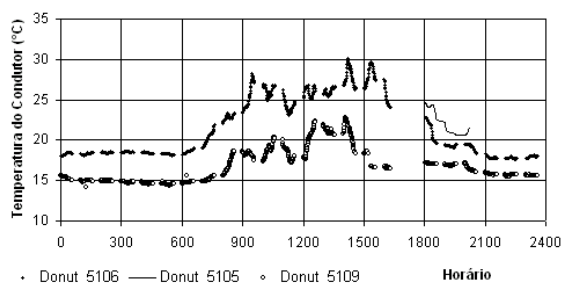


Figura 10. Primeiros dados coletados pelos sensores Power Donut-2.

Mas ao contrário, se a variação no perfil térmico do condutor for elevado, a possibilidade de aumento do nível de carregamento se torna muito mais complexo de ser implementado, uma vez que, nesta

hipótese seria necessário monitorar vários pontos ao longo de toda linha para garantir a segurança operacional.

Agradecimentos

O projeto de p&d-162 está sendo financiado pela Cemig Distribuição S.A. e pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG através do Laboratório de Computação Evolucionária. Agradecemos as referidas entidades pelo investimento realizado nas pesquisas.

Referências Bibliográficas

- Morgan, V.T., (1982). The Thermal Rating of Overhead-Line Conductors, *Part I. The Steady-State Thermal Model*. 174.
- Nascimento, C.A.M. e Vasconcelos, J.A., (2007). Análise Sistemática da Ampacidade de Linhas Aéreas de Transmissão nas Abordagens Determinística e Estatística, *Décimo Segundo Encontro Regional Ibero-americano do CIGRÉ*, Foz do Iguaçu-Pr.
- Nascimento, C. A. M., (2007). Desenvolvimento de Tecnologias para Controle e Monitoramento em Tempo Real da Capacidade de Transmissão em Linhas de Energia Elétrica, *VII Simpósio de Automação de Sistema Elétricos*, Salvador/Ba.
- Furtado, T.A., (1997). Carregamento elétrico de linhas aéreas de transmissão, informações coletadas na LT Experimental Bonsucesso - Nova Lima. *XIII - ERLAC - Foz do Iguaçu*.
- Nascimento, C.A.M., (2001). Aplicação de Tecnologias de Monitoramento em Tempo Real para Aumentar a Capacidade de Transmissão em LTs Aéreas.- *XVI SNPTEE - Campinas/SP*.
- Nascimento, C.A.M. (2002). Aplicação de Tecnologias de Monitoramento em Tempo Real para Aumentar a Capacidade de Transmissão em LTs Aéreas.- *XV SENDI - Salvador/BA*.
- Da Silva, H. F. (2005). Uma alternativa técnico-econômica para aumentar a capacidade de transmissão via monitoramento em tempo real de linhas aéreas. *XVIII SNPTEE GOP-250*, Curitiba/PR-Brasil.
- Nascimento, C. A. M., (1999). Metodologia experimental para a utilização de condutores termorresistentes (TAL) em linhas e redes - *Dissertação de Mestrado - UFMG - Dpto de Eng. Mecânica*.
- Valle, R.M., (2005). Introdução do estudo da camada limite da atmosfera em projetos de linhas aéreas de transmissão - *XVIII - SNPTEE - Curitiba/Pr-Brasil*.
- Anjan, K. Deb. (2000). Powerline ampacity system, theory, modeling and applications - *book, CRC Press - NY-USA*.
- NBR-5422, (1985). Projetos de linhas aéreas de transmissão de energia elétrica - *Norma ABNT*.