

| | |
|--------------|--|
| Title | Análise da Distorção Harmônica nos Serviços Auxiliares de uma Usina Termoelétrica |
|--------------|--|

| | |
|-----------------------------|--|
| Registration N°: (Abstract) | |
|-----------------------------|--|

Neste trabalho é apresentado um estudo sobre Qualidade de Energia Elétrica (QEE) no sistema elétrico industrial de uma usina termoelétrica a base de carvão. O estudo teve enfoque na distorção harmônica gerada nos serviços auxiliares. Portanto, foram modeladas as principais cargas dos serviços auxiliares existentes na termoelétrica, utilizando o programa Alternative Transients Program (ATP), através de sua interface gráfica, o ATP Draw. Desta forma, é possível determinar os níveis de distorção harmônica em vários lugares da planta e aprofundar os estudos para mitigar as principais causas destes distúrbios. A redução da distorção harmônica junto com o aumento do fator de potência, permite um melhor rendimento da planta, aumentando o faturamento da empresa devido ao aumento de energia que é enviada ao sistema elétrico.

| Authors of the paper | | |
|--------------------------------|---------|----------------------------------|
| Name | Country | e-mail |
| Mauren Pomalis Coelho da Silva | Brasil | mali_pomalis@hotmail.com |
| Roberto Chouhy Leborgne | Brasil | rcl@ece.ufrgs.br |
| Daphne Schwanz | Brasil | daphne@ece.ufrgs.br |
| Marcelo Pessoa Gaidzinski | Brasil | marcelog@tractebelenergia.com.br |
| Arturo Suman Bretas | Brasil | abretas@ece.ufrgs.br |

| Entidade |
|---|
| Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS Av. Osvaldo Aranha, 103 – Porto Alegre/RS – Brasil |

| Key words |
|---|
| Qualidade de Energia Elétrica, Distorção Harmônica, Modelagem e Simulação, ATP Draw. |

1. INTRODUÇÃO

A presença de distorções harmônicas na rede, como a presença de qualquer outro distúrbio de Qualidade de Energia Elétrica (QEE), minimiza o desempenho do sistema elétrico e causa mau funcionamento ou danos nos elementos que o compõe.

O estudo apresentado se destinou a modelar e simular uma geradora termoeétrica através do software ATP Draw, para investigar os principais equipamentos causadores de distorção harmônica. Com a modelagem dos principais componentes, entre motores, transformadores, linhas e cargas, a simulação no domínio do tempo e a aplicação da Transformada Rápida de Fourier nas tensões e correntes simuladas, são obtidos os valores das distorções harmônicas nos pontos de interesse na planta elétrica. E assim, podem-se sugerir medidas de melhorias no sistema elétrico da mesma.

2. ANÁLISE E REGULAÇÃO DAS DISTORÇÕES HARMÔNICAS

Distorções harmônicas são tensões ou correntes senoidais com frequências que são múltiplos inteiros da frequência fundamental, a frequência com que o sistema de abastecimento foi projetado para funcionar.

Em [1] para o cálculo da Distorção Harmônica Total (DHT), considera-se até a 25ª harmônica (50ª em algumas normas), conforme mostram as equações (1) e (2).

$$DHT_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} I_h^2}}{I_F} \quad (1)$$

$$DHT_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h_{max}} V_h^2}}{V_F} \quad (2)$$

Os índices de distorção harmônica são muito utilizados para determinar o nível de contribuição total individual das frequências harmônicas em determinado ponto de estudo. Em função disso, deve-se ter parâmetros para que estes resultados possam ser comparados e, com isso, poder ser determinado se tal contribuição harmônica é muito significativa no sistema elétrico da planta. Por isso, devem-se comparar esses dados com os limites recomendados pela legislação do órgão regulador competente. Os parâmetros de qualidade de energia elétrica no Brasil - entre eles as Harmônicas - são conceituados, regulados e fiscalizados pela ANEEL através do Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional [2].

Segundo a ANEEL, para os cálculos de DHT, o espectro harmônico considerado deve compreender a faixa de frequências que inicie com a componente

fundamental e finalize, no mínimo, com a harmônica de ordem $h = 25$.

Tabela1 - Limites ANEEL

| Limites das distorções harmônicas totais - em porcentagem da tensão fundamental | |
|---|---|
| Tensão Nominal do Barramento | Distorção Harmônica Total de Tensão - DHT (%) |
| $V_n \leq 1 \text{ kV}$ | 10 |
| $1 \text{ kV} < V_n \leq 13,8 \text{ kV}$ | 8 |
| $13,8 \text{ kV} < V_n \leq 69 \text{ kV}$ | 6 |
| $69 \text{ kV} < V_n < 230 \text{ kV}$ | 3 |
| $V_n =$ Tensão nominal | |

3. ESTUDO DE CASO E METODOLOGIA APLICADA

O estudo apresentado é uma pesquisa de natureza aplicada, de perfil quantitativo, que utiliza os métodos de modelagem e simulação para um estudo de caso. A pesquisa é aplicada por ter em vista a solução de um problema existente na prática; é quantitativa por utilizar dados numéricos para classificação e análise; e seu método é através de experimentação em um modelo elaborado de acordo com um sistema real, para verificação das respostas às modificações propostas.

A modelagem do sistema foi realizada utilizando-se o software *Alternative Transient Program* (ATP), ele é um programa mundialmente utilizado na área de sistemas de potência. Este software é uma versão do *Electromagnetic Transients Program* (EMTP); ele é utilizado para simulação digital de fenômenos transitórios eletromagnéticos, e sua formulação matemática baseia-se na regra de integração trapezoidal, solucionando conjuntos de equações diferenciais dos componentes do sistema, no domínio do tempo. O ATP possui uma interface gráfica, chamada ATP Draw, que funciona como um pré-processador do ATP, através dele o usuário é capaz de construir um circuito elétrico qualquer, baseando-se na visualização e seleção de modelos disponíveis na interface gráfica.

Os parâmetros para modelagem de componentes de um sistema elétrico são o R, L e C (Resistência, Indutância e Capacitância). Esses parâmetros estão presentes em todo o circuito ou equipamento elétrico, em diferentes proporções. A modelagem foi focada nos serviços auxiliares da termoeétrica, como se sabe, uma usina termelétrica tem a função de gerar energia elétrica para os consumidores, mas para que ela se mantenha em funcionamento são necessários vários serviços paralelos e auxiliares a ela, que servem de suporte para que a usina permaneça em operação, eles são chamados de serviços auxiliares.

Os serviços auxiliares são o conjunto de equipamentos fundamentais para o bom funcionamento

da usina. Alguns dos principais são: motores, transformadores, conversores, inversores, painéis de distribuição, sistema de água, sistema de ar, aquecimento, ventilação, iluminação e aterramento. A configuração do sistema elétrico, localização dos principais elementos e algumas especificações costumam ser encontradas no diagrama unifilar da usina. A Figura 1 mostra o diagrama dos serviços auxiliares da termoeletrica que foi analisada.

simplificação da modelagem, sem perder a confiabilidade dos resultados.

Com relação aos circuitos trifásicos, sabe-se que, em plantas industriais, estes são considerados mais simples quando comparados aos sistemas de transmissão. Com isso, os circuitos foram modelados por uma impedância série com parâmetros R, L concentrados, e sua representação foi feita através do modelo *RLC3* do ATP Draw, desprezando-se a capacitância, por serem os trechos das linhas todos menores do que 1 km, ou seja, curtos.

Conforme [3] existem diferentes grupos de representações para transformadores, que dependem da modelagem utilizada. Para baixas e médias frequências, pode-se utilizar a determinação da matriz impedância ou da matriz admitância. Segundo [4] o grupo que utiliza representação por matrizes inclui o modelo *BCTRAN*, que é um modelo linear, e, para muitos casos, deve ser incluído o efeito de saturação e histerese na modelagem. No ATP Draw o modelo utilizado para representar os transformadores foi o *BCTRAN*.

Neste trabalho, para a modelagem dos motores de indução, foi utilizado o modelo *UM_* do ATP Draw, conforme [5], [6], [7], [8],[9] e [10]. Este é o modelo mais utilizado quando se trata de estudos de distorções harmônicas.

Por fim, as cargas não lineares existentes nos serviços auxiliares da planta termoeletrica da Unidade 3 foram todas representadas através de injeção de fontes de corrente, conforme recomendado em [11]. Cada um dos equipamentos com cargas não lineares foi representado com diversas fontes de corrente, que foram inseridas no ATP Draw com valores de frequência, de amplitude e de ângulo de defasagem.

5. SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Com todo o sistema elétrico da planta termoeletrica modelado no ATP Draw, foram realizadas simulações para quantificar as distorções harmônicas de corrente e tensão em alguns pontos dentro da planta termoeletrica, denominados P4, P10, P6, P8 e P2, conforme Figura 1.

5.1 Ponto P4

Esse é o ponto de maior tensão existente dentro do sistema modelado; o Ponto P4 está no secundário de um transformador que conecta os serviços auxiliares a barra de 230 kV, barra referente a conexão com o Sistema Interligado Nacional.

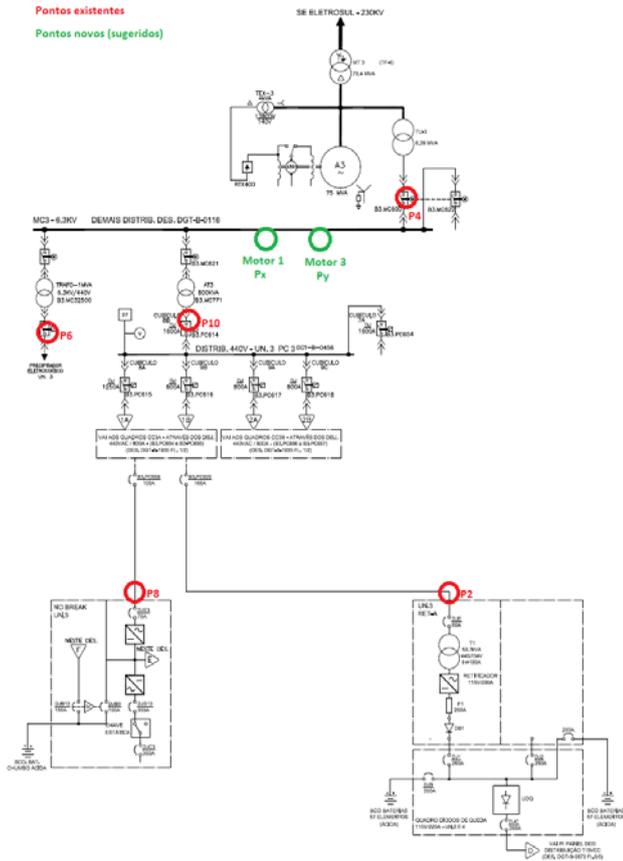


Figura 1: Diagrama Unifilar da Usina

4. MODELAGEM DOS COMPONENTES NO ATP DRAW

Nesta seção é apresentada a modelagem dos componentes utilizados na planta elétrica da usina termoeletrica. Os componentes que foram modelados são o gerador, os circuitos trifásicos, os transformadores, os motores e as cargas não lineares presentes no sistema. Os dados utilizados para a modelagem de cada um dos componentes estão descritos no Apêndice deste trabalho, respectivamente.

O gerador da usina termoeletrica, foi implementado no ATP Draw como uma fonte ideal de tensão (*AC Source*) em série com a reatância. Este gerador é um equivalente da tensão da barra da usina e do Sistema Interligado Nacional (SIN), visando maior

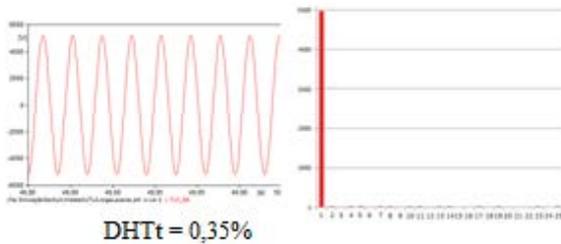


Figura 2: Tensão simulada no ponto P4

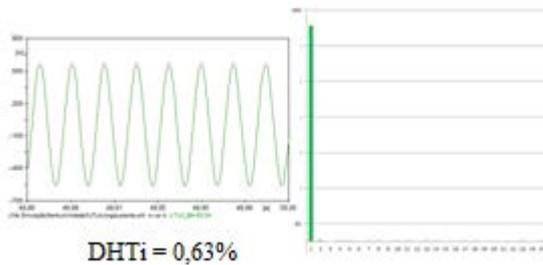


Figura 3: Corrente simulada no ponto 4

Conforme a Figura 2 e a Figura 3, o comportamento da tensão e da corrente medida no P4 não mostra distorções visíveis na forma de onda obtida no ATP Draw.

5.2 Ponto P10

Este ponto é localiza-se no secundário do transformador; no diagrama unifilar podemos observar a quantidade de cargas que estão conectadas àquela barra de 440 V, inclusive o retificador e o UPS, além de motores médios e pequenos.

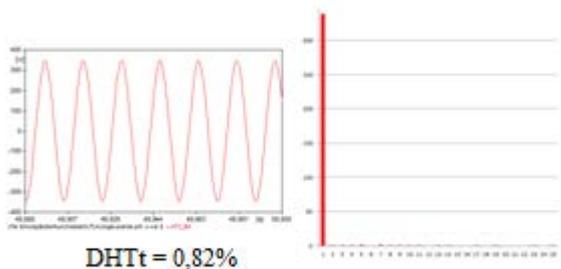


Figura 4: Tensão simulada no ponto P10

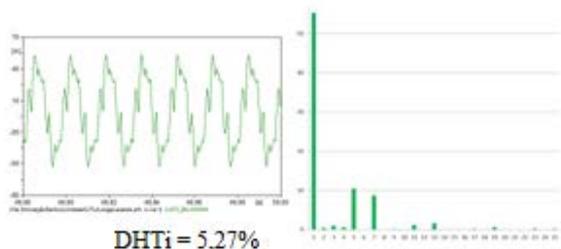


Figura 5: Corrente simulada no ponto P10

No ponto P10, a percebe-se a quantidade de distorção harmônica que está ocorrendo, conforme observa-se na Figura 4 e Figura 5, o ATP Draw apontou essas distorções provavelmente devido as cargas não lineares que estão conectado a barra de distribuição de 440 V.

5.3 Ponto P6

O ponto P6 está localizado no ponto de conexão do precipitador eletrostático.

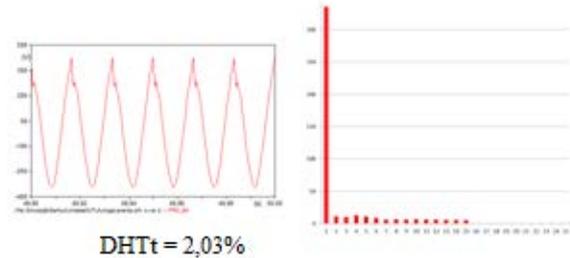


Figura 6: Tensão simulada no ponto P6

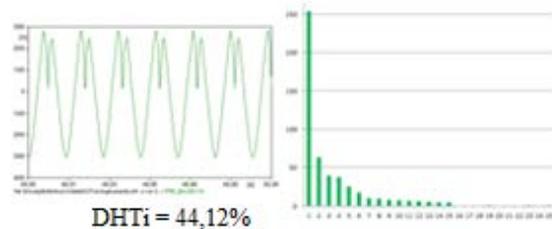


Figura 7: Corrente simulada no ponto P6

No ponto P6, a simulação realizada no ATP Draw mostra distorções consideráveis e bastante visíveis na forma de onda da tensão e de corrente, conforme a Figura 6 e a Figura 7.

5.4 Ponto P8

O ponto de monitoração P8 está no ponto de conexão do UPS.

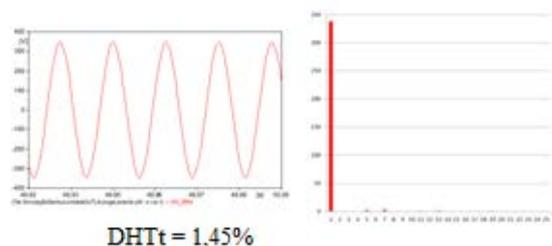
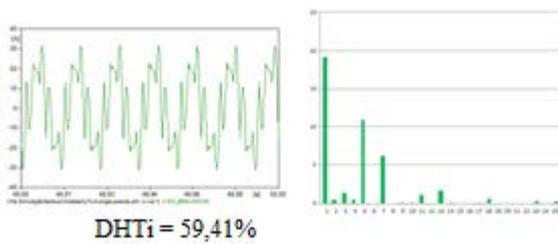


Figura 8: Tensão simulada no ponto P8

Tabela2 – Distorções Harmônicas Totais



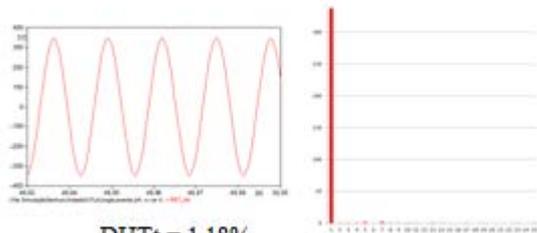
DHTi = 59,41%

Figura 9: Corrente simulada no ponto P8

Neste ponto, apesar do gráfico de tensão não mostrar distorções visíveis, o gráfico da corrente, mostra a quantidade de distorções geradas por esse equipamento, conforme Figuras 8 e 9.

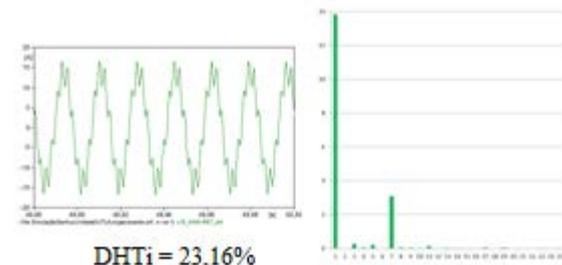
5.5 Ponto P2

Esse ponto está na conexão do retificador A.



DHTt = 1,18%

Figura 10: Tensão simulada no ponto P2



DHTi = 23,16%

Figura 11: Corrente simulada no ponto P2

No ponto P2 também as distorções de corrente são visíveis, destacando-se bastante pela deformação na forma de onda, conforme Figuras 10 e 11.

Como demonstrado graficamente para cada ponto de interesse, foi possível perceber visualmente quais os pontos apresentaram maiores distorções harmônicas na tensão e na corrente.

Fazendo-se a análise com a aplicação da Transformada Rápida de Fourier, chega-se aos seguintes níveis de distorção harmônica total, para cada um dos pontos analisados, conforme Tabela 2.

| Ponto | Distorções | | | |
|-------|------------|---------------|----------|---------------|
| | DHTt ATP | DHTt Medições | DHTi ATP | DHTi Medições |
| P2 | 1,18% | 0,92% | 23,16% | 22,69% |
| P4 | 0,35% | 0,37% | 0,63% | 1,56% |
| P6 | 2,03% | 1,45% | 44,12% | 48,51% |
| P8 | 1,45% | 1,04% | 59,41% | 60,34% |
| P10 | 0,82% | 0,61% | 5,27% | 4,63% |

Através dos resultados, verifica-se que a maior diferença entre os resultados está na distorção da corrente no Ponto P4, sendo este, ainda, um ponto de análise. Entretanto, pode-se dizer que a modelagem utilizada para esta planta está de acordo com o funcionamento real da mesma, tendo em vista os resultados obtidos e comparados com as medições realizadas *in loco*.

Do ponto de vista normativo, é possível realizar uma comparação com os limites estipulados pelo Prodist. Este, entretanto, não propõe valores limites para a DHT de corrente, somente de tensão. Assim, conforme os limites estabelecidos na Tabela 1, verifica-se que para o nível de tensão da barra analisada (13,8 kV), que é de 8%, nenhum dos pontos ultrapassa este limite, estando, portanto, de acordo com os níveis descritos no Prodist.

6. CONCLUSÃO

Conforme o analisado pode-se dizer que a modelagem realizada neste estudo representa corretamente os serviços auxiliares da termoeletrica em estudo, e sua simulação corresponde ao seu funcionamento. Os resultados de distorção harmônica simulados se aproximam muito da realidade da planta.

Conforme os resultados obtidos na simulação, observa-se que há um ponto mais crítico, e que deve ser adequado, o ponto P4. Este ponto ainda está em análise, mas acredita-se que a ação de outras fontes harmônicas, que não estão representadas nesta modelagem, possam estar conectadas nesta barra e ocasionando tais distorções. Em função disso, estão sendo realizadas novas medições para identificar tais fontes harmônicas.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ARRILLAGA, J.; WATSON, N. R. **Power system harmonics**. 2nd.ed. S.I.: John Wiley & Sons, 2003.
- [2] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). **Resolução Normativa nº 469/2011: PRODIST: módulo 8**, Revisão 4. Brasília, DF, 2011.

- [3] MARTINEZ-VELASCO, J. A. **Power system transients**. Parameter Determination.S.I.: CRC Press, 2010.
- [4] OLIVEIRA, M. O. **Proteção diferencial de transformadores trifásicos utilizando a transformada wavelet**. 2009. 129p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.
- [5] RAMOS, A. J. P.; FONTANA, E.; LIMA, M. C. Análise do desempenho de múltiplos compensadores estáticos em sistemas radiais fortemente carregados considerando a presença de cargas dinamicamente ativas. In: SOCIEDADE BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA (SBQEE),2.,1997,São Lourença. **Anais...** [S.l : s.n], 1997. p.1-6
- [6] GONÇALVES, J. A. R. **Estudo do comportamento do motor de indução trifásico sujeito a perturbações na qualidade da energia**. 2008. 164p.Dissertação (Mestrado em Engenharia Electrotécnica e de Computadores) - Universidade de Trás-os-montes e Alto douro, Vila Real, 2008.
- [7] GUIMARÃES, R. **Comportamento elétrico, mecânico e hidráulico de um sistema de bombeamento sob enfoque da eficiência energética**. 2008. 146p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- [8] ZAPPELINI, A. B. **Análise de eficiência energética em sistema de ar comprimido**. 2008. 134p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2008.
- [9] BAPTISTA, J. et al. Induction motor response to periodical voltage fluctuations. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL MACHINES (ICEM), 2010, Rome. **Proceedings...**[S.l: s.n], 2010,6p.
- [10] MEDEIROS. A. S. **Desenvolvimento de software para simulação de motores com dispositivos de partida baseada na integração do ATP com o TOpReDE**. 2011.64p.Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2011.
- [11] DUNGAN, R. C. et al. **Electrical power systems quality**.2nd.ed. S.I.: McGraw-Hill Education, 2002.

APÊNDICE

Anexo 1 – Dados de Entrada dos Geradores –Modelo AC Source

| Dados de Entrada | Gerador da Termoelétrica | Equivalente da Rede Básica |
|---------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| | Valor/Informação Utilizado(a) | Valor/Informação Utilizado(a) |
| Tensão [V] | 20500 | 230000 |
| Frequência [Hz] | 60 | 60 |
| Ângulo[°] | 75.5 | 0 |
| Número de Fases | 3 | 3 |
| Aterrado | Sim | Sim |
| Tempo de Início [s] | -1 | -1 |
| Tempo de Fim [s] | 100 | 100 |

Anexo 2 – Valores de R e L de cada Circuito Trifásico

| Trecho | Resistência [Ω] | Indutância [mH] |
|---|-----------------|-----------------|
| Barra MC3 – Transformador B3MC771 | 4,37213E-3 | 0,1091915 |
| Transformador B3MC771 – Barra 440V | 1,199988E-3 | 0,032004 |
| Barra 440V – Transformador T1 | 0,04023015 | 0,0398655 |
| Transformador T1 - Retificador | 0,0034275 | 0,03574035 |
| Barra 440V – Motor | 0,0252705 | 0,0391479 |
| Barra 440V – No-Break | 0,0162576 | 0,038455 |
| Barra MC3 – Transformador B3MC32500 | 4,37903E-3 | 0,109173 |
| Transformador B3MC32500 – Precipitador | 0,013130 | 0,1867568 |
| Barra MC3 - Motor 1 | 0,0214805 | 0,1230925 |
| Barra MC3 - Motor 2, 3, 4,5 e 6 (todos) | 0,1341005 | 0,132885 |

Anexo 3 – Dados dos Transformadores 1 e 2

| Dado | Transformador | |
|---------------------------------|---------------|-----------------------------|
| | 1 | 2 |
| Alta Tensão [kV] | 230 | 13.8 |
| Baixa Tensão [kV] | 13.8 | 6.3 |
| Potência [MVA] | 79.4 | 6.28 |
| Conexão | Y-D (330°) | D-D (0°) |
| Tensão (Circuito Aberto) [%] | 100 | 90 100 105 110 |
| Corrente (Circuito Aberto) [%] | 0.17 | 0.228 0.349 0.467 0.681 |
| Perdas (Circuito Aberto) [kW] | 0.3019 | 0.0153 0.0196 0.0224 0.0263 |
| Impedância (Curto-Circuito) [%] | 10.05 | 7.35 |
| Potência (Curto-Circuito) [MVA] | 79.4 | 6.28 |
| Perdas (Curto-Circuito) [kW] | 0.213 | 0.00532 |

| | | | |
|---------------------------------|-------|-------|--------|
| Impedância (Curto-Circuito) [%] | 7.64 | 6.34 | 3.63 |
| Potência (Curto-Circuito) [MVA] | 0.8 | 1 | 0.0507 |
| Perdas (Curto-Circuito) [kW] | 10.38 | 10.28 | 1.47 |

Anexo 4 – Dados dos Transformadores 3, 4 e 5

| Dado | Transformador | | |
|--------------------------------|---------------|-----------|-----------|
| | 3 | 4 | 5 |
| Alta Tensão [kV] | 6.3 | 6.3 | 0.44 |
| Baixa Tensão [kV] | 0.44 | 0.44 | 0.154 |
| Potência [MVA] | 0.8 | 1 | 0.0507 |
| Conexão | D-Y (330°) | D-Y (30°) | Y-D (30°) |
| Tensão (Circuito Aberto) [%] | 100 | 100 | 100 |
| Corrente (Circuito Aberto) [%] | 1.1 | 1.1 | 2.94 |
| Perdas (Circuito Aberto) [kW] | 2.53 | 2.53 | 0.327 |

Anexo 5 – Dados do Circuito Equivalente dos Motores

| Motor | General | | | |
|------------|-----------------|---------------------|------------|-----------|
| | Stator Coupling | Rotor Coils d and q | Pole Pairs | Tolerance |
| 1A | Y | 1 | 1 | 0.01885 |
| 2A, 2B | Y | 1 | 5 | 0.01885 |
| 3A, 3B, 3C | Y | 1 | 6 | 0.01885 |
| 4A, 4B | Y | 1 | 2 | 0.01885 |
| 5A, 5B | Y | 1 | 3 | 0.01885 |
| 6A, 6B | Y | 1 | 2 | 0.01885 |
| 7A, 7B, 7C | Y | 1 | 2 | 0.01885 |
| 8A | Y | 1 | 1 | 0.01885 |
| Motor | Magnet | | | |
| | LMUD | LMUQ | Sat. | |
| 1A | 0.1764 | 0.1764 | None | |
| 2A, 2B, 2C | 0.5650 | 0.5650 | None | |
| 3A, 3B | 0.8251 | 0.8251 | None | |
| 4A, 4B | 1.1481 | 1.1481 | None | |
| 5A, 5B | 0.6314 | 0.6314 | None | |
| 6A, 6B | 0.7860 | 0.7860 | None | |
| 7A, 7B, 7C | 1.2833 | 1.2833 | None | |
| 8A | 0.0310 | 0.0310 | None | |
| Motor | Stator | | | |
| | R | | L | |
| | 0 | d and q | 0 | d and q |
| 1 | 0 | 0.5938 | 0 | 0.0050 |
| 2 | 0 | 7.6521 | 0 | 0.0307 |
| 3 | 0 | 12.5951 | 0 | 0.0366 |
| 4 | 0 | 10.738 | 0 | 0.0393 |
| 5 | 0 | 6.4812 | 0 | 0.0247 |
| 6 | 0 | 5.5375 | 0 | 0.0240 |

| | | | | |
|---------------|---------------|---------|---------------|--------|
| 7 | 0 | 11.0389 | 0 | 0.0393 |
| 8A | 0 | 0.1036 | 0 | 0.0008 |
| Motor | Rotor | | | |
| | R | | L | |
| | land 2 | | land 2 | |
| 1 | 0.1047 | | 0.0050 | |
| 2 | 1.46681 | | 0.0307 | |
| 3 | 3.01369 | | 0.036 | |
| 4 | 3.3354 | | 0.0393 | |
| 5 | 2.1582 | | 0.0247 | |
| 6 | 1.9626 | | 0.0240 | |
| 7 | 3.2795 | | 0.0393 | |
| 8A | 0.7060 | | 0.0008 | |
| Motor | Init | | | |
| | Slip | | | |
| Allmot ors | 100 | | | |

Anexo 6 – Freqüências e Correntes Harmônicas das Cargas Não-Lineares

| Precipitador | | |
|-----------------------|-------------------|-----------------|
| Ordemharmônica | Freqüência | Corrente |
| 2ª | 120 Hz | 45,6978 A |
| 3ª | 180 Hz | 28,7383 A |
| 4ª | 240 Hz | 27,7941 A |
| 5ª | 300 Hz | 19,2318 A |
| 6ª | 360 Hz | 13,5219 A |
| 7ª | 420 Hz | 7,7581 A |
| 8ª | 480 Hz | 7,7179 A |
| 9ª | 540 Hz | 6,5672 A |
| 10ª | 600 Hz | 6,3124 A |
| 11ª | 660 Hz | 5,7118 A |
| 12ª | 720 Hz | 5,2874 A |
| 13ª | 780 Hz | 4,7891 A |
| 14ª | 840 Hz | 4,3609 A |
| 15ª | 900 Hz | 4,1209 A |
| Retificador | | |
| Ordemharmônica | Freqüência | Corrente |
| 3ª | 180 Hz | 0,5951 A |
| 4ª | 240 Hz | 0,1163 A |
| 5ª | 300 Hz | 0,3793 A |
| 6ª | 360 Hz | 0,122 A |
| 7ª | 420 Hz | 6,2564 A |
| 8ª | 480 Hz | 0,124 A |
| 9ª | 540 Hz | 0,1465 A |
| 11ª | 660 Hz | 0,2612 A |
| 13ª | 780 Hz | 0,1115 A |
| 17ª | 1020 Hz | 0,1152 A |
| 19ª | 1140 Hz | 0,1456 A |
| No-break | | |
| Ordemharmônica | Freqüência | Corrente |
| 2ª | 120 Hz | 0,3407 A |
| 3ª | 180 Hz | 0,8774 A |
| 4ª | 240 Hz | 0,3534 A |
| 5ª | 300 Hz | 7,1983 A |
| 7ª | 420 Hz | 4,1221 A |
| 11ª | 660 Hz | 0,7575 A |
| 13ª | 780 Hz | 1,0962 A |
| 17ª | 1020 Hz | 0,3407 A |
| 19ª | 1140 Hz | 0,4036 A |
| 23ª | 1380 Hz | 0,2129 A |
| 25ª | 1500 Hz | 0,1223 A |
| 29ª | 1740 Hz | 0,2301 A |