



## **Estudo dos Impactos da Conexão de um Forno de Indução no Sistema de Distribuição**

**Eng. Júlio S. Omori**  
**COPEL Distribuição**  
[julio.omori@copel.com](mailto:julio.omori@copel.com)

**Eng. Maurício R. Ortega**  
**COPEL Distribuição**

### **RESUMO**

O presente trabalho apresenta um estudo de caso referente aos impactos nos parâmetros de qualidade de energia de determinado sistema de distribuição de 34,5 kV da Copel (Companhia Paranaense de Energia) diante da conexão de um forno de indução de 1000 KVA.

Os fornos de indução são equipamentos eletro-térmicos cuja operação causam elevada não linearidade na corrente drenada do sistema elétrico, com componentes de elevada frequência e variações súbitas, que podem comprometer parâmetros de qualidade de energia no ponto de conexão no sistema de distribuição, tendo a situação agravada com a elevação da impedância do ponto escolhido.

São apresentados os resultados do estudo realizado para conexão de um consumidor com forno de indução instalado em sua planta, utilizando ferramenta de simulação computacional e comparação com índices de referência de qualidade de energia disponíveis. Também são apresentados os dados de medição obtidos após a liberação e conexão do consumidor no sistema de distribuição confrontando estes dados com os valores simulados durante os estudos.

Os principais parâmetros de qualidade de energia são analisados e comparados com os limites recomendados de maneira a verificar o impacto da conexão do forno de indução e a necessidade de alteração do sistema de distribuição ou da instalação elétrica do consumidor para atenuação dos problemas.

### **PALAVRAS-CHAVE**

Distorções Harmônicas, Forno de Indução, Qualidade de Energia.

### **1. INTRODUÇÃO**

Cargas elétricas que contém dispositivos eletrônicos tem crescido consideravelmente desde a década de sessenta, quando o desenvolvimento dos semicondutores de estado sólido e principalmente os transistores começaram a ser utilizados em escala comercial. Lâmpadas eletrônicas, reatores eletrônicos, fontes chaveadas, controladores de potência, chaves estáticas e variadores de velocidade estáticos para controle de velocidade de motores de indução são exemplos de cargas eletrônicas com utilização em larga escala tanto na área residencial e comercial, quanto na área industrial. Uma característica importante destas cargas eletrônicas é a elevada não linearidade da corrente de alimentação.

Acionamentos eletrônicos de potência também tem sido desenvolvidos com grande rapidez. A utilização de chaves estáticas com acionamento em média tensão com um elevado nível de corrente, já é comum em aplicações industriais e em sistemas elétricos de potência.

A combinação de cargas eletrônicas de grande potência, com elevada não linearidade de corrente conectadas a sistemas elétricos com baixa potência de curto circuito (elevada impedância), pode provocar a violação de parâmetros de qualidade de energia da tensão de fornecimento, provocando assim a não conformidade da forma de onda senoidal de tensão tanto para o elemento gerador desta não conformidade, quanto para as demais cargas conectadas ao sistema elétrico. Este é o grande desafio da análise de consumidores com cargas elétricas não lineares de alta potência: tentar prever a possibilidade de problemas durante o estudo de viabilidade do atendimento destas novas cargas no sistema elétrico envolvido.

Os fornos de indução são exemplos de acionamentos eletrônicos de média tensão e frequência superior a industrial (60 HZ) que podem causar problemas de qualidade de energia no ponto de conexão. O número destes equipamentos conectados ao sistema de distribuição da Copel (Companhia Paranaense de Energia) tem crescido consideravelmente, principalmente pelo custo benefício de sua utilização e pelo crescimento da reciclagem de lixo metálico.

Os problemas de qualidade de energia provocados no ponto de conexão poderão naturalmente trazer não somente o mau funcionamento e baixo desempenho de equipamentos na planta que contém os equipamentos geradores de distúrbios, mas também em consumidores que compartilham o mesmo circuito de alimentação. Estes problemas podem ser agravados caso existam equipamentos com grau de sensibilidade maior a diminuição da qualidade de energia ofertada pela concessionária.

A seguir serão apresentadas as principais características e o princípio de funcionamento de um forno de indução, aliado ao estudo de conexão de um consumidor com este tipo de carga no sistema de distribuição da Copel, e os resultados obtidos com medições após a sua conexão, tendo como foco principal a análise de parâmetros de qualidade de energia.

## **2. FORNOS DE INDUÇÃO**

Os fornos de indução provocam o aquecimento de materiais eletricamente condutivos em um campo magnético variável. O aquecimento por indução pode ser usado para derretimento, solda, endurecimento de superfície, secagem uniforme das pinturas, cola e aquecimento para encolhimentos<sup>3</sup>. O aquecimento ocorre através da aplicação de corrente alternada a uma bobina de cobre, sendo o fluxo desta corrente responsável pela criação de um intenso campo eletromagnético variável. Se um material condutivo é colocado no “núcleo” do indutor, correntes são induzidas causando o aquecimento pela circulação destas correntes pelo próprio material.

Mesmo materiais como cobre e alumínio que possuem baixa resistência elétrica, também serão aquecidos. Com materiais magnéticos como o aço, o aquecimento é gerado por fluxo de corrente e por histerese magnética.

A corrente flui em uma densidade maior perto da superfície e decresce em direção ao centro. A frequência que a corrente oscila afeta a profundidade na qual a corrente flui. Quanto maior a frequência mais superficial é o efeito. Por isso são escolhidas frequências de 5 kHz para derretimento e forja e 400 a 500 kHz para endurecimento e solda.

A figura 1 apresenta um exemplo de forno de indução, com os seu principais componentes. A qualidade do material fundido durante o processo de indução eletromagnética e aquecimento através da circulação da corrente elétrica em alta frequência é extremamente elevada. Sendo que o produto final apresenta grande homogeneidade podendo ser utilizado em diversas e exigentes aplicações da indústria metal-mecânica.

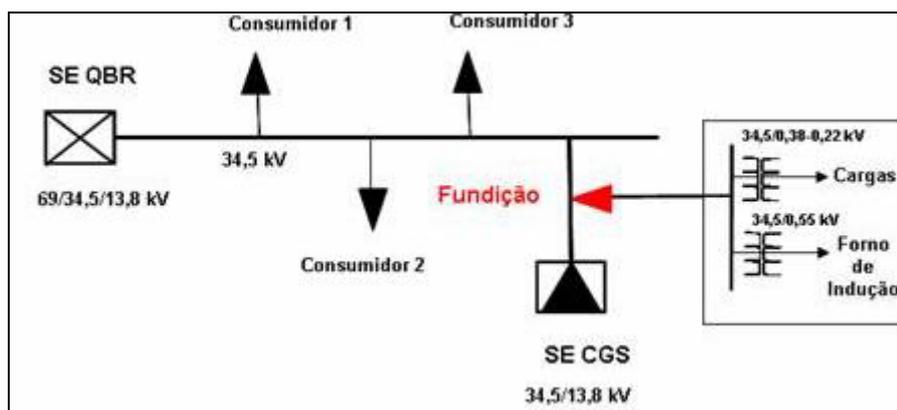


**Figura 1- Exemplo de Forno de Indução**

### 3. CONFIGURAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO

O consumidor cuja conexão ao sistema de distribuição foi estudada denomina-se de Fundição. A principal carga de sua planta é um forno de indução de 1000 KVA, e a demanda contratada solicitada de 1200 KW. O consumidor possui dois transformadores, o primeiro de 34,5/0,38-0,22 kV é utilizado para alimentação de cargas utilitárias (iluminação e tomadas) e demais equipamentos industriais de menor potência. O segundo transformador de 34,5/0,55 kV é utilizado exclusivamente para alimentação do forno de indução. Para este tipo de configuração e potência a Copel exige que os transformadores utilizados possuam delta no secundário ou terciário para evitar a circulação de corrente de terceiro harmônico no sistema de distribuição.

O ponto escolhido foi o circuito CGS (Campina Grande do Sul) para conexão do consumidor. Este é um circuito de 34,5 kV proveniente da SE QBR (Quatro Barras) 69/34,5/13,8 kV, a figura 2 ilustra a configuração descrita.



**Figura 2- Configuração do Sistema Elétrico**

Existem outros consumidores industriais conectados a montante do consumidor Fundição e uma subestação de 34,5/13,8 kV a jusante (SE CGS). Esta subestação alimenta a cidade de Campina Grande do Sul com aproximadamente dez mil consumidores. A conexão do consumidor Fundição foi estudada com detalhes, pois possíveis perturbações geradas no sistema de distribuição poderiam afetar diretamente os consumidores industriais além dos vários consumidores comerciais e residenciais conectados na SE CGS.

#### 4. CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO DE PARÂMETROS DE QUALIDADE DE ENERGIA

A Aneel (Agência Nacional de Energia Elétrica) regulamentará indicadores e padrões de Qualidade de Energia (harmônicos, desequilíbrio, flutuação de tensão, entre outros) para Sistemas de Distribuição no documento denominado “Procedimentos de Distribuição – Módulo 8 Qualidade de Energia Elétrica”, atualmente em elaboração.

Na falta deste documento, foram considerados os indicadores e padrões do documento “Procedimentos de Rede” do ONS (Operador Nacional do Sistema) válidos para a Rede Básica<sup>4,5</sup>.

#### 5. ESTUDO REALIZADO

Foram realizadas simulações com o consumidor ligado no sistema de distribuição, com o objetivo de verificar os impactos gerados pela sua conexão na qualidade de energia do sistema de distribuição.

A potência de curto circuito trifásico no ponto de conexão é de 116,8 MVA. A relação potência de curto/potência do transformador do forno é igual a 97,33. Sendo que este índice ( $S_{cc}/S_{forno} < 100$ ) indica a necessidade de estudos mais detalhados.

O consumidor informou que o DIHT (Distorção de Corrente Harmônica Total) de alimentação nominal do forno não superava 2%, e não informou dados mais precisos para realização de simulações. A falta de dados de cargas elétricas especiais requeridos para realização de um estudo detalhado é um sério problema encontrado pela Copel. Diante destes processos a conexão do consumidor tem sido liberada, com o compromisso de que medições serão realizadas e caso problemas sejam detectados o consumidor deve saná-los. Por isso, de acordo com as medições realizadas pode-se observar que durante o funcionamento normal do forno, o DIHT atinge patamares entre 15% e 22%. Também foi possível levantar o espectro de frequência da corrente do forno (fonte de injeção de correntes harmônicas) que apresenta grande repetibilidade durante o funcionamento do equipamento, com poucas variações de acordo com o regime de trabalho do forno. Estes dados de medições foram utilizados para simulação da DTHT (Distorção de Tensão Harmônica Total) provocada pelo consumidor, no ponto de conexão ao sistema de distribuição. A figura 3, apresenta a forma de onda típica da corrente de alimentação do forno, com as suas respectivas componentes harmônicas.

Foram realizadas simulações com o software Harmzs do Cepel. Estas simulações indicaram que a contribuição individual do consumidor para distorção de tensão harmônica total no ponto de conexão seria de aproximadamente 1,47%.

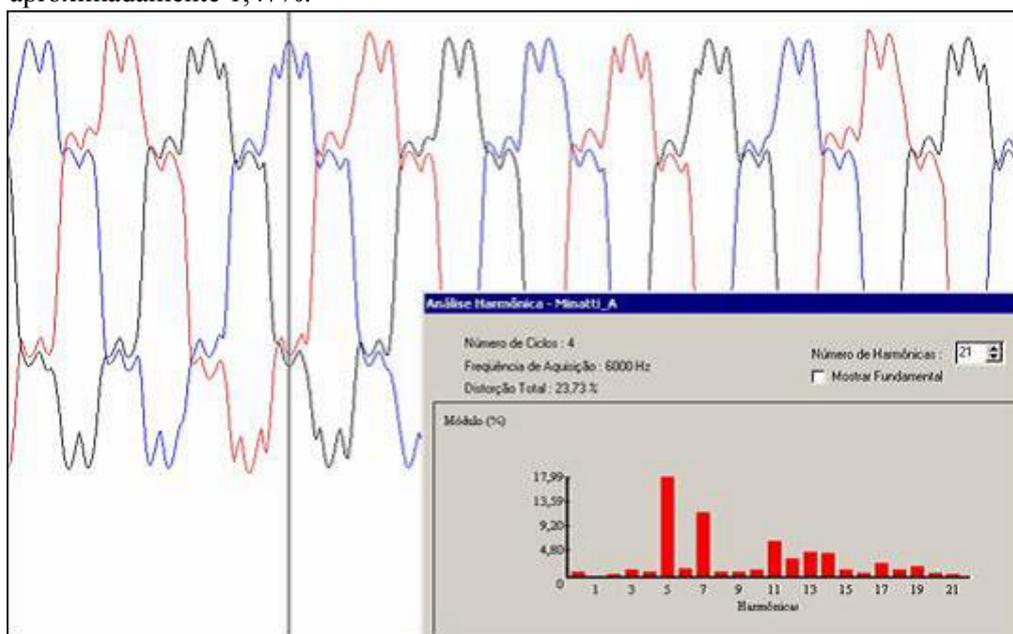


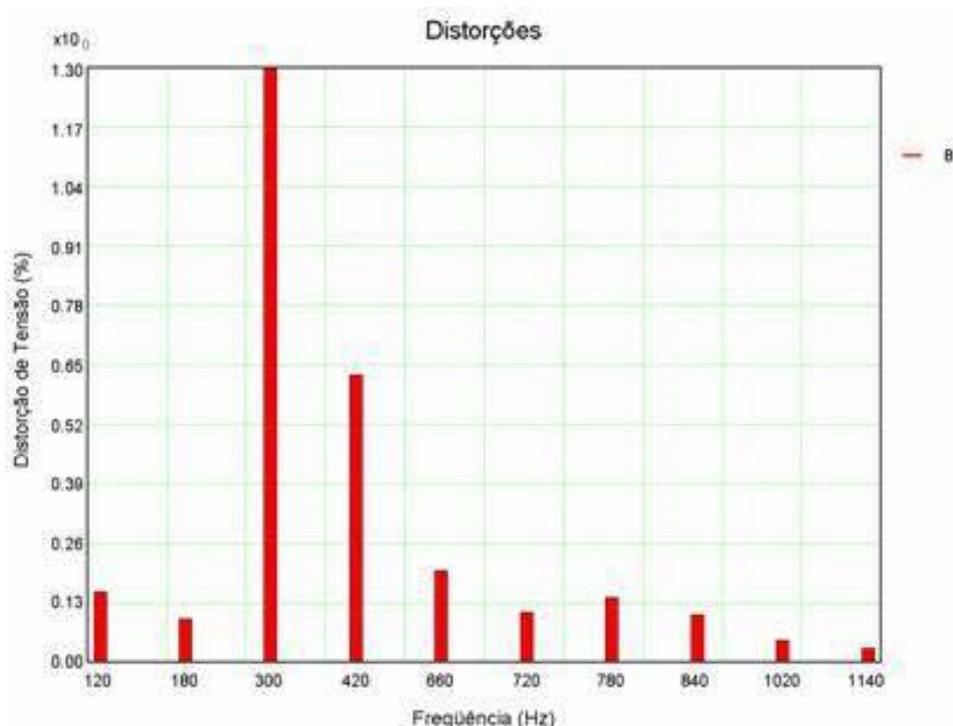
Figura 3- Forma de Onda da Corrente de Alimentação do Consumidor

O limite individual adotado foi de 3,0%, de acordo com a tabela 1, retirada dos “Procedimentos de Rede” submódulo 3.8 dos Requisitos Mínimos para Conexão a Rede Básica do ONS<sup>4</sup>.

**Tabela 1 – Limites de Distorção Harmônica Total de Tensão – Fonte ONS**

13,8 kV ≤ V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3 a 25	1,5%			3 a 25	0,6%		
		todos	0,6%			todos	0,3%
≥27	0,7%			≥27	0,4%		
DTHT = 3%				DTHT = 1,5%			

A figura 4 apresenta o espectro de distorção de tensão harmônica total resultante da simulação realizada. Foi simulada a injeção de correntes harmônicas na barra de alimentação do consumidor e o resultado refere-se a distorção de tensão harmônica total verificada no próprio ponto de conexão.



**Figura 4 – Simulação de DTHT Provocada pelo Consumidor**

Com relação a análise referente a resposta em frequência, foi estudado a possibilidade dos bancos de capacitores da SE CGS entrarem em ressonância numa frequência harmônica ditada pela corrente de carga do consumidor em análise.

A figura 5, apresenta a resposta em frequência da configuração adotada. Considerando a injeção de corrente na barra do consumidor e medição de tensão (saída) na barra de 34,5 kV da SE CGS. A figura 6 apresenta a mesma situação tendo como saída a barra da SE fonte QBR. Pode-se observar que existe uma elevação súbita da impedância nas frequências próximas de 100 HZ e de 2250 HZ (figuras 6 e 5). Denotando a possibilidade de sobrecarga e sobretensão nos bancos de capacitores para estas frequências.



Figura 5 –Resposta em Frequência até 4500 HZ - CGS

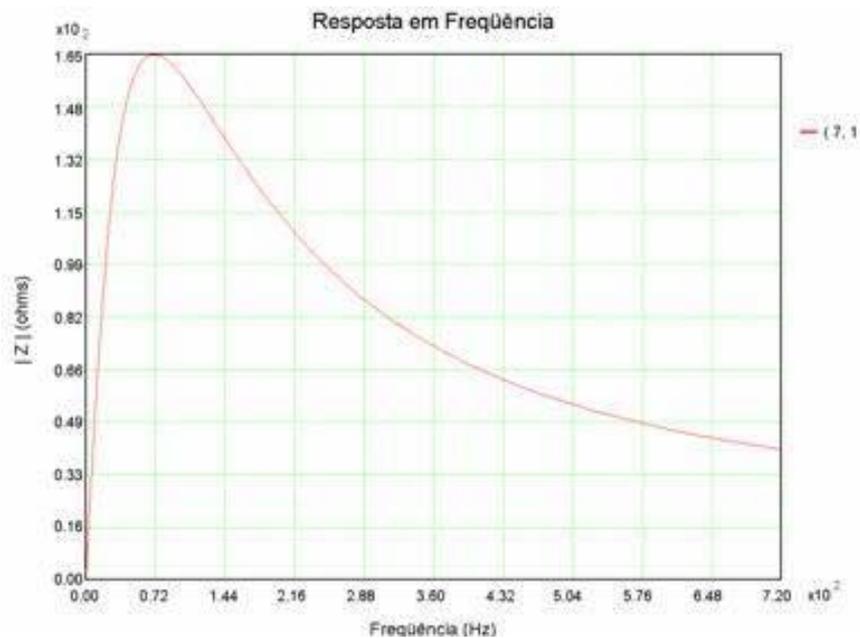


Figura 6 –Resposta em Frequência até 720 HZ –SE QBR

## 6. MEDIÇÕES REALIZADAS

O consumidor foi conectado, com a condição de que seriam realizadas medições de parâmetros de qualidade de energia que pudessem indicar danos ao sistema elétrico da Copel. Neste caso o consumidor deveria providenciar soluções. Sendo assim, foi instalada medição na entrada de energia do consumidor, em paralelo com a medição de faturamento num período de aproximadamente dois meses.

O resultado destas medições e de outras realizadas no sistema elétrico da Copel são apresentadas a seguir.

### 6.1. Medições de Potência e Fator de Potência

A figura 7 apresenta a curva de carga típica do consumidor. Este dado é proveniente do equipamento de medição de faturamento do consumidor. Pode-se verificar que existem degraus de consumo, durante o período em que o forno de indução é ligado. Provocando assim variações súbitas de corrente no alimentador.

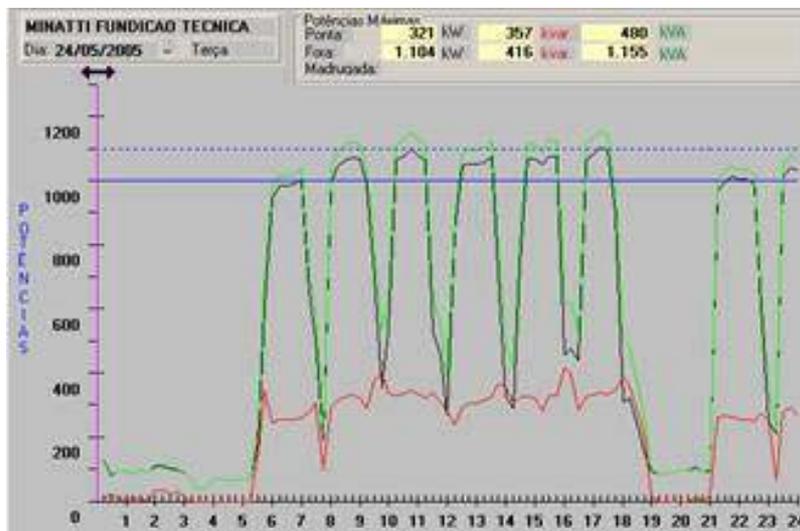


Figura 7 – Curva de Carga do Consumidor

O consumidor apresenta baixo fator de potência durante vários períodos do dia. O baixo fator de potência é acentuado durante o período em que a potência do forno é diminuída, e durante o período de início de desligamento do equipamento. O forno faz com que a variação de potência reativa seja atenuada, provocando assim um baixo fator de potência médio na instalação. A figura 8 ilustra o fator de potência medido.

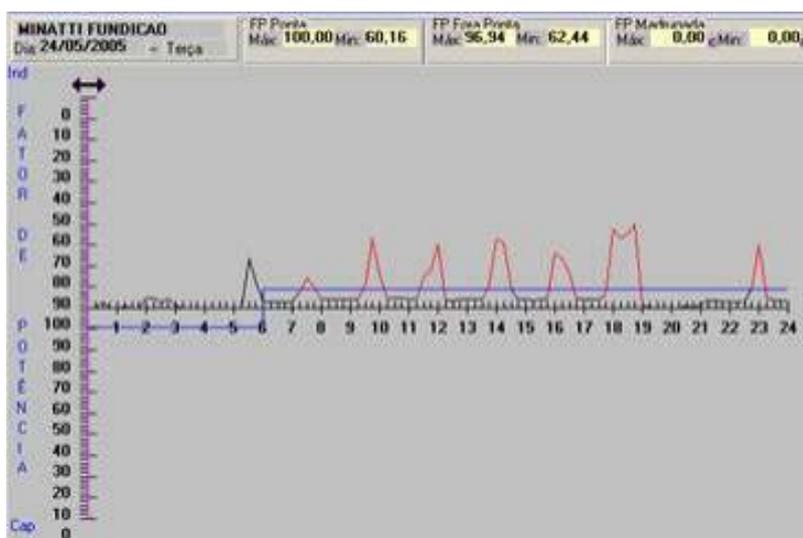
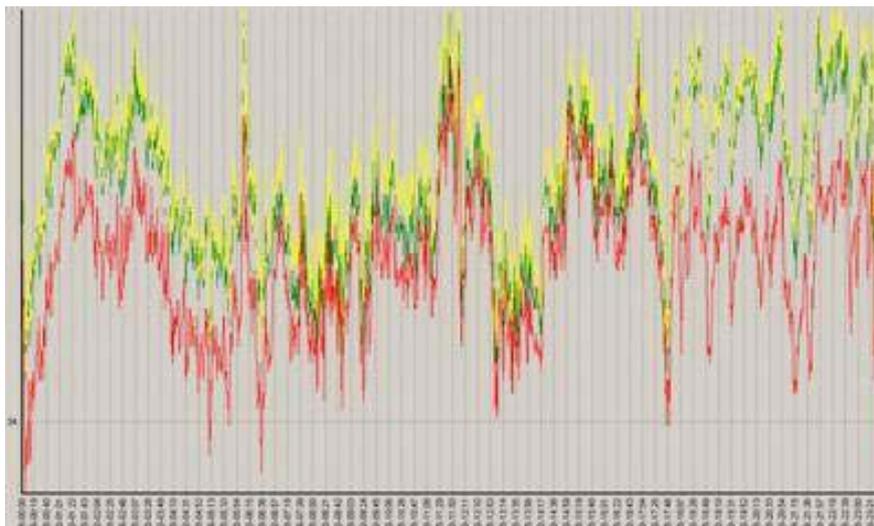


Figura 8 – Fator de Potência Medido

### 6.2. Medição de Tensão na Barra de 34,5 kV da SE Quatro Barras - QBR

A figura 9 apresenta o perfil de tensão na barra de 34,5 kV da Subestação QBR que alimenta o circuito Campina Grande do Sul.

Pode ser observado variações bruscas de tensão sobre as variações de tensão normais do sistema e do controle de tensão da subestação. Esta sobreposição de variações rápidas de tensão resulta das variações de carga da configuração, que atualmente alimenta vários consumidores industriais.



**Figura 9 –Perfil de Tensão na SE Quatro Barras**

### 6.3. Distorção Harmônica Total

Como parâmetro para verificação da qualidade de energia no ponto de entrega foi tomado como referência a tabela 2, que indica limites globais de distorção harmônica de tensão. Esta tabela também é um requisito do ONS descrito no submódulo 2.2 relativo ao desempenho da Rede Básica<sup>5</sup>. Nesta tabela a distorção de tensão harmônica total refere-se a contribuição de todos os consumidores e do próprio sistema elétrico.

**Tabela 2 – Limites Globais de Distorção Tensão Harmônica Total – Fonte ONS**

V < 69 kV				V ≥ 69 kV			
ÍMPARES		PARES		ÍMPARES		PARES	
ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)	ORDEM	VALOR(%)
3, 5, 7	5%			3, 5, 7	2%		
		2, 4, 6	2%			2, 4, 6	1%
9, 11, 13	3%			9, 11, 13	1,5%		
		≥8	1%			≥8	0,5%
15 a 25	2%			15 a 25	1%		
≥27	1%			≥27	0,5%		
<b>DTHT = 6%</b>				<b>DTHT = 3%</b>			

O valor do indicador a ser comparado com o valor padrão foi obtido, determinando-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 1 dia (24 horas), ao longo de 7 (sete) dias consecutivos. O valor deste indicador corresponde ao maior dentre os sete valores obtidos, anteriormente, em base diária.

O valor do indicador compilado durante o período de medições realizadas para cada fase está apresentado na tabela 4.

#### 6.4. Desequilíbrio de Tensão

Também foi utilizado as recomendações do ONS descrito no submódulo 2.2 relativo ao desempenho da Rede Básica<sup>5</sup>, onde o desequilíbrio global de tensão refere-se a contribuição de todos os consumidores e do próprio sistema elétrico. O desequilíbrio de tensão deve ser menor ou igual a 2%. A metodologia para avaliação do indicador do valor de desequilíbrio de tensão é a mesma utilizada para a distorção de tensão harmônica total. Ou seja, o valor do indicador foi obtido, determinando-se o valor que foi superado em apenas 5% dos registros obtidos no período de 1 dia (24 horas), ao longo de 7 (sete) dias consecutivos. O valor deste indicador corresponde ao maior dentre os sete valores obtidos, anteriormente, em base diária.

O maior valor compilado durante o período de medições realizadas está apresentado na tabela 4.

#### 6.5. Flutuação de Tensão

Foram utilizados os indicadores PST e PLT para parametrizar o impacto na flutuação de tensão do sistema .

O indicador Pst, “Probability short term”, representa a severidade dos níveis de cintilação associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 10 minutos e é calculado a partir dos níveis instantâneos de sensação de cintilação.

O indicador Plt, “Probability long term”, representa a severidade dos níveis de cintilação associados à flutuação de tensão verificada num período contínuo de 2 horas e é calculado a partir dos registros de Pst.

Os indicadores de severidade de cintilação, adotados também seguiram as recomendações do ONS descrito no submódulo relativo ao desempenho da Rede Básica<sup>5</sup> (tabela 3). Neste caso os parâmetros de flutuação de tensão globais referem-se a contribuição de todos os consumidores e do próprio sistema elétrico:

(a) PstD95%: valor do indicador Pst que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período de 1 dia (24 horas);

(b) PltS95%: valor do indicador Plt que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos no período de uma semana, 7 (sete) dias completos e consecutivos.

**Tabela 3 – Limites Globais de Flutuação de Tensão – Fonte ONS**

Limite	PstD95%	PltS95%
Limite Global Inferior	$1 pu / FT$	$0,8 pu / FT$
Limite Global Superior	$2 pu / FT$	$1,6 pu / FT$

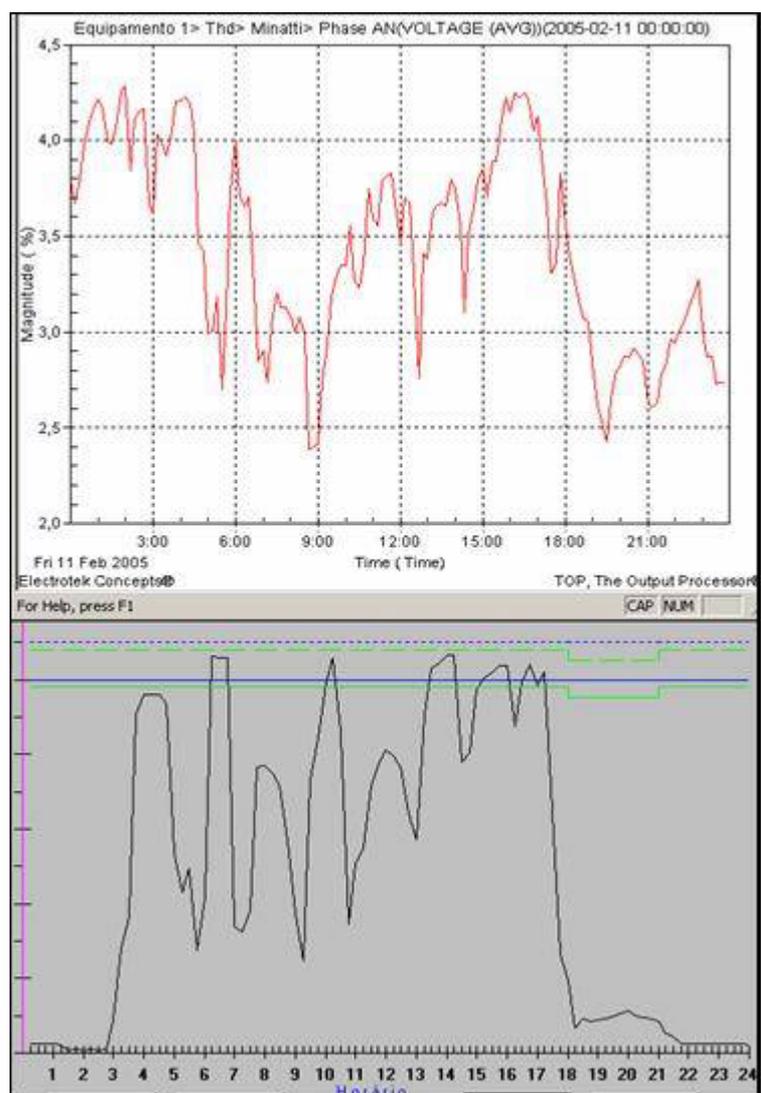
Para o nível de tensão do consumidor em análise (34,5kV) foi utilizado FT igual a um.

Os maiores valores de PSTD95% e PLTS95% compilados durante o período de medição são apresentados na tabela 4.

#### 6.6. Comparações Através da Mudança de Carga

Através das medições simultâneas de potência e distorção de tensão harmônica total foi possível comprovar o acréscimo neste parâmetro de qualidade de energia com a entrada em funcionamento do forno de indução do consumidor.

A figura 10, apresenta o resultado da medição simultânea realizada, sendo o primeiro gráfico referente a distorção de tensão harmônica total e o segundo a curva de carga da instalação.



**Figura 10 – Acréscimo de DTHT Provocada pelo Consumidor**

O acréscimo no nível de distorção de tensão harmônica total gerado pelo funcionamento do forno de indução foi de aproximadamente 1,35%.

### 6.7. Resumo dos Resultados

A tabela 4 apresenta o resumo dos resultados dos parâmetros de qualidade de energia medidos: DTHT de tensão, desequilíbrio de tensão e flutuação de tensão, conforme descrição realizada.

**Tabela 4 –Resumo dos Parâmetros de Qualidade de Energia Medidos**

DTHT – TENSÃO %			DESEQUILIBRIO	PLT95%			PST95%		
A	B	C	%	A	B	C	A	B	C
3,89	3,22	2,79	0,72	0,3	0,35	0,3	0,37	0,39	0,26

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Através da análise realizada sobre os dados de simulações e medições apresentados foi possível concluir:

- O valor de DIHT da corrente nominal de alimentação do forno informado pelo consumidor foi aproximadamente dez vezes inferior aos valores constatados.
- Apesar do elevado DIHT da corrente nominal de alimentação do forno, os parâmetros de qualidade de energia: Distorção Harmônica Total, Desequilíbrio e Flutuação de Tensão, verificados no ponto de conexão do consumidor ao sistema de distribuição apresentaram desempenho considerado normal e aceitável.
- Foi possível constatar o acréscimo da Distorção de Tensão Harmônica Total provocado pelo consumidor. Sendo que este valor está dentro do previsto, tanto pelas simulações, quanto pelos critérios adotados. Para fornos de indução com regime de funcionamento similar ao apresentado, é possível medir exatamente a evolução dos parâmetros de qualidade de energia monitorados, através da curva de carga do forno.
- Com a obrigatoriedade da instalação na entrada de energia do consumidor, de um transformador contendo ligação delta no secundário (ou terciário), foi possível verificar a efetividade na atenuação da componente de terceira ordem harmônica de corrente e suas múltiplas. Evitando que um valor superior desta componente circulasse pelo sistema de distribuição.
- Foi recomendada a correção do fator de potência da instalação do consumidor para evitar multas, e porque este valor acaba contribuindo para um baixo fator de potência do circuito Campina Grande do Sul.
- Também foi recomendada ao consumidor a instalação de filtros de sintonia durante a correção do fator de potência de sua instalação.

Foi possível verificar a elevação dos valores nominais dos parâmetros de qualidade de energia no ponto de conexão, após a instalação do forno de indução, comprovando a necessidade de execução do estudo detalhado. É importante ressaltar que a ferramenta de simulação utilizada correspondeu as expectativas e teve o resultado final comprovado.

Os procedimentos para a avaliação das perturbações provocadas por uma carga não linear, na fase de estudo de conexão é fundamental para que sejam evitados futuros problemas e também para estabelecer diretrizes para a difícil resolução destes problemas. Sendo assim, é fundamental a caracterização de responsabilidades entre a concessionária e o consumidor.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 R.C. Dugan, *Electric Power Systems Quality*, McGraw-Hill Professional; October, 1995.
- 2 G.A.D. Dias, *Harmônicas em Sistemas Industriais*, EDIPUCRS, 2a Edição, 2002.
- 3 G.A.D. Dias, *Interação entre Forno de Indução e Banco de Capacitores*, VI SBQEE, Belém/PA, agosto/2005.
- 4 ONS, *Procedimentos de Rede - Requisitos Mínimos para Conexão a Rede Básica, submódulo 3.8*, março/2002.
- 5 ONS, *Procedimentos de Rede – Desempenho da Rede Básica, submódulo 2.2*, dezembro/2002.
- 6 IEEE Std. 519-1992 Standart 519-1992, Requirements for Harmonic Control in Eletric Power Systems.