
	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

## Sumário

1.	OBJETIVO .....	2
2.	ÂMBITO DE APLICAÇÃO .....	2
3.	DEFINIÇÕES .....	2
4.	DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA.....	3
4.1	Normas da ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica .....	3
4.2	Normas do ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico .....	3
4.3	Normas da IEC - International Electrotechnical Commission .....	3
4.4	Normas da IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers .....	4
4.5	Documentos CPFL .....	4
4.6	Referências Bibliográficas e Técnicas .....	4
5.	RESPONSABILIDADES.....	4
6.	REGRAS BÁSICAS .....	4
6.1	Estrutura e Funcionamento de um Forno Elétrico a Arco .....	4
6.2	Arco Elétrico .....	7
6.3	Impactos causados pelo Forno Elétrico a Arco .....	9
6.4	Indicadores e Limites estabelecidos .....	10
6.4.1.	Flutuação de Tensão .....	10
6.4.2.	Distorção Harmônica .....	11
6.4.3.	Considerações IEC 61000-3-7 e Demais Literaturas .....	13
6.5	Princípios para Avaliação da Qualidade do Produto .....	14
6.6	Critérios de Análise e Atendimento.....	15
6.6.1.	Análise da pré conexão do Forno a Arco .....	16
6.6.2.	Análise da pós conexão do Forno a Arco .....	17
6.7	Sugestões para Mitigação dos Distúrbios da Qualidade de Energia.....	18
7.	CONTROLE DE REGISTROS .....	20
8.	ANEXOS.....	20
	Anexo I - Detalhes de um Forno Elétrico a Arco.....	21
	Anexo II - Informações a serem disponibilizadas pelo Acessante .....	22
	Anexo III - Medições no PAC Antes e Após a Conexão do Forno Elétrico a Arco .....	25
	Anexo IV - Modelagem e Simulação do Forno Elétrico a Arco (CYME) .....	27
	Anexo V - Limites de Distorção Harmônica de Corrente .....	39
9.	REGISTRO DE ALTERAÇÕES.....	41
9.1	Colaboradores.....	41
9.2	Alterações .....	41

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	1 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

## 1. OBJETIVO

A presente orientação técnica trata dos Fornos Elétricos a Arco (FEA), de qualquer potência, especificamente aqueles ligados em redes de distribuição primária. Tem como objetivo estabelecer um modelo de cálculo para este tipo de carga, a fim de se quantificar o padrão de variação de tensão causado pelo acionamento de um ou mais fornos na rede de distribuição da CPFL, assim como, estabelecer o critério para atendimento destes fornos, visando assegurar a manutenção da qualidade do fornecimento de energia elétrica a todos os consumidores.

## 2. ÂMBITO DE APLICAÇÃO

Diretoria de Engenharia, contemplando as Gerências de Normas e Padrões, Gestão de Ativos e Planejamento, assim como, aos Acessantes do sistema elétrico do Grupo CPFL Energia (CPFL Paulista, Piratininga, Santa Cruz e RGE).

## 3. DEFINIÇÕES

**Coefficiente de transferência:** o nível relativo de perturbação que pode ser transferido entre dois barramentos ou duas partes de um sistema de energia para várias condições de operação.


**Distorção Harmônica:** As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. Ela é representada pela raiz quadrada do somatório quadrático das tensões harmônicas de ordens 2 a 50. Esse conceito quantifica o conteúdo harmônico total existente em um determinado ponto da rede elétrica da Distribuidora.

**Flutuação de Tensão:** As flutuações de tensão são variações sistemáticas do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea. Este fenômeno também é relacionado a impressão visual resultante das variações do fluxo luminoso nas lâmpadas elétricas, causada pelas flutuações da tensão de alimentação, conhecida também como flicker. A severidade de cintilação é uma representação do incômodo visual percebido pelas pessoas e seus níveis são associados à flutuação da tensão.

**Ponto de Acoplamento Comum (PAC) ou Point of Common Coupling (PCC):** Ponto da rede pública que está eletricamente mais próximo da instalação em questão e ao qual outras instalações estão ou podem ser conectadas. O PCC é um ponto localizado a montante da instalação considerada.

**Ponto de Avaliação (PDA) ou Point of Evaluation (POE):** ponto em um sistema público de fornecimento de energia onde os níveis de emissão de uma determinada instalação devem ser avaliados em relação aos limites de emissão. Este ponto pode ser o ponto de acoplamento

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	2 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

comum (PAC) ou o ponto de conexão (PDC) ou qualquer outro ponto especificado pelo operador ou proprietário do sistema ou acordado.

**Ponto de Conexão (PDC) ou Point of Connection (POC):** ponto em um sistema de fornecimento de energia público, onde a instalação em consideração é ou pode ser conectada.

**Potência de curto circuito:** valor teórico expresso em MVA da potência inicial de curto circuito trifásico simétrico em um ponto do sistema de alimentação. É definido como o produto da corrente simétrica inicial de curto circuito, a tensão nominal do sistema e o fator  $\sqrt{3}$  com o componente aperiódico (DC) sendo desprezado.

**Qualidade da Energia Elétrica:** Desempenho do sistema elétrico em termos de continuidade do serviço, conformidade na forma de onda da tensão e tempo de pronto restabelecimento de energia, incluindo os efeitos de flutuação de tensão, desequilíbrio, distorção harmônica, cintilação luminosa e variação de tensão de curta duração.

**Queda de Tensão:** Qualquer redução verificada no nível de tensão de alimentação produzida pela ligação de cargas no sistema.

**Tensão de Fornecimento:** É a tensão efetivamente recebida pelo consumidor (acessante), no ponto de entrega de energia, em condições normais de operação.

## 4. DOCUMENTOS DE REFERÊNCIA

### 4.1 Normas da ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

- PRODIST - Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica.


### 4.2 Normas do ONS - Operador Nacional do Sistema Elétrico

- Submódulo 2.9 - Requisitos mínimos de qualidade de energia elétrica para acesso ou integração à Rede Básica, do Procedimentos de Rede.

### 4.3 Normas da IEC - International Electrotechnical Commission

- IEC 61000-4-15:2010/ISH1:2017 - *Interpretation Sheet 1 - Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-15: Testing and measurement techniques - Flickermeter - Functional and design specifications*;
- IEC/TR 61000-3-6 - *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-6: Limits – Assessment of emission limits for the connection of distorting installations to MV, HV and EHV power systems*.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	3 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

- IEC/TR 61000-3-7 - *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 3-7: Limits - Assessment of emission limits for the connection of fluctuating installations to MV, HV and EHV power systems.*

#### 4.4 Normas da IEEE - Institute of Electrical and Electronics Engineers

- Std 519-2014 IEEE - *Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems.*

#### 4.5 Documentos CPFL

- GED 10099 – Requisitos para Conexão de Cargas Potencialmente Perturbadoras ao Sistema Elétrico da CPFL;
- GED 2855, GED 2856, GED 2858, GED 2859 e GED 2861 – Fornecimento em Tensão Primária 15 kV e 25 kV;
- GED 4732 – Sistema CPFL de Projetos Particulares Via Internet – Fornecimento em Tensão Primária.

#### 4.6 Referências Bibliográficas e Técnicas

- [1] A. Robert and M. Couvreur, “Arc Furnace Flicker Assessment and Mitigation”, Proceedings of the 3rd International Conference on Power Quality - End-Use Applications and Perspectives (PQA'94), Amsterdam, The Netherlands, 1994;
- [2] FILHO, João Mamede. Instalações Elétricas Industriais. 9. ed. LTC, 2017;
- [3] JUNIOR, José Rubens Macedo. UMA CONTRIBUIÇÃO À ANÁLISE DAS COMPONENTES INTER-HARMÔNICAS E SEUS EFEITOS NOS INDICADORES DE FLUTUAÇÃO DE TENSÃO. Universidade Federal do Espírito Santo, 2009;
- [4] Power Quality Indices and Objectives, WG C4.07 report. CIGRE Technical Brochure 261, Oct. 2004.
- [5] Technical regulations for the evaluation of grid distortion effects D-A-CH-CZ.

### 5. RESPONSABILIDADES


A área de Engenharia de Normas e Padrões das distribuidoras do Grupo CPFL é a responsável pela publicação deste documento.

### 6. REGRAS BÁSICAS

#### 6.1 Estrutura e Funcionamento de um Forno Elétrico a Arco

Os Fornos Elétricos a Arco (FEA), são reatores metalúrgicos que possuem a capacidade de transformar sucata em aço de alta qualidade, a partir da reciclagem do material. A estrutura básica de um FEA tem uma carcaça, abóbada, porta de escória, um canal de vazamento, três

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	4 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

eletrodos de grafite com seu sistema de controle, um sistema de queimadores e injetores. O Anexo I - Detalhes de um Forno Elétrico a Arco, apresenta um modelo exemplificando a estrutura e os principais componentes do equipamento.

Estes equipamentos funcionam através de ciclos distintos de operações, iniciando com o carregamento do forno e subsequente ignição do arco, terminando com a corrida do metal fundido. Este ciclo, carga-fusão-descarga, é repetido várias vezes num processo siderúrgico. No ciclo de operação do forno a arco, observam-se fases distintas, caracterizando comportamentos diversos do forno em relação ao sistema elétrico. Dois períodos distintos de operação são destacados: o período de fusão e o período de refino.

O processo de fusão corresponde a fase com maiores perturbações ao sistema elétrico, devido as grandes variações e elevadas magnitudes de corrente de um meio ciclo para outro, causado pelo arco elétrico entre os eletrodos e a superfície irregular da sucata a ser derretida. Quando os eletrodos entram em curto circuito a potência ativa absorvida pelo forno se reduz a quase zero, enquanto a potência reativa se eleva notavelmente. Consequentemente, observa-se grandes variações do fator de potência do forno, o qual, em certos momentos, atinge valores muito próximos de zero.

Na fase de refino ou redução, o metal já atingiu a forma líquida, sendo possível manter uniforme o comprimento do arco nos três eletrodos, mediante o uso de dispositivos de regulação automática. Esta fase de operação é caracterizada por uma carga trifásica estável, de alto fator de potência.

A Figura 1 exemplifica o comportamento elétrico no forno durante a aplicação do arco elétrico entre os eletrodos e a sucata a ser derretida, principalmente durante a fase de fusão do metal.

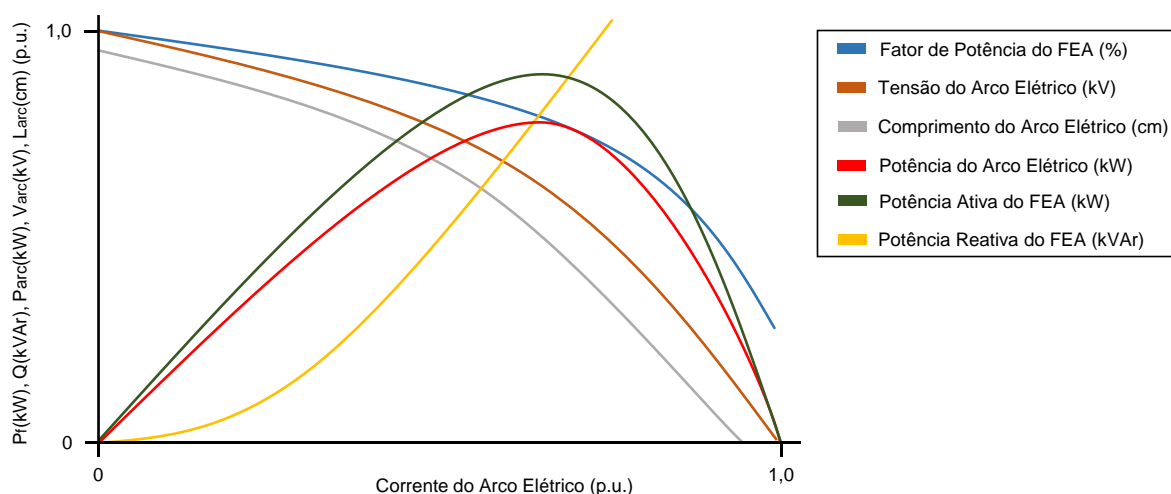



Figura 1. Características elétricas do FEA.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	5 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

Deste modo, conforme apresentado nas principais fases do processo de operação do FEA, estes equipamentos operam com variações de correntes muito rápidas e sob condições de alto consumo de reativo, causando variações bruscas na tensão em consequência do caráter não linear destes equipamentos, gerando uma corrente de alimentação do forno altamente distorcida.

Ressalta-se que além da operação dos FEA em corrente alternada (CA), estes equipamentos também podem operar em corrente contínua (CC). A corrente contínua é produzida a partir de conversores estáticos controlados por tiristores, a partir da alimentação trifásica em corrente alternada. A corrente de operação é controlada através da seleção do ângulo de disparo dos tiristores, gerando menores distúrbios ao sistema elétrico, contudo, não mitiga totalmente o problema.

Para suportar o estresse elétrico, o transformador do FEA é usualmente imerso em óleo e refrigerado a água. O óleo é bombeado através do transformador e da serpentina mergulhada em água. Como o transformador do forno alimenta frequentes curto circuitos, no seu projeto tem que se prever os esforços mecânicos resultantes destes curtos. O seu enrolamento secundário tem que ser forte e muito bem preso por braçadeiras especiais. Contrariamente aos transformadores comuns, as bobinas de alta tensão são colocadas próximas do núcleo, sendo que o enrolamento primário fica aberto fora do tanque, a fim de permitir as mudanças de ligação triângulo ou estrela.


Um transformador de um forno a arco pode ser exigido em até 130 interrupções por dia, sobrecarregando também o disjuntor. A reatância própria dos transformadores para fornos se situa entre 4% e 6%. Para os transformadores pequenos, isto é, de potência abaixo de 7.500 kVA, há necessidade de se adicionar reatores no forno, para prevenir exageradas correntes de curto-circuito, em geral, estes transformadores recebem 30% de reatância adicional. Dependendo do tamanho e de justificativa econômica, o reator adicional pode ser mantido dentro do próprio tanque do transformador. Nas maiores potências, o reator encontra-se em tanque separado. Quanto as ligações, o reator pode ficar na linha, caso do transformador com o primário em estrela ou ficar nas bobinas primárias, caso do transformador em delta.

Adicionalmente, os FEA também podem ser caracterizados de acordo com a forma de operação de seus eletrodos e, particularmente, em função da disposição do arco elétrico associado, conforme apresentado a seguir:

- Forno a arco direto: a potência útil se transforma em calor em maior parte no arco elétrico. Em termos práticos consiste no contato direto dos eletrodos do forno (energizados) com a sucata metálica fria. São os tipos mais utilizados de fornos a arco na produção de aço;
- Forno a arco submerso: a potência elétrica útil se transforma em calor em parte no arco (submerso) e em parte na matéria-prima. É também conhecido como forno panela,

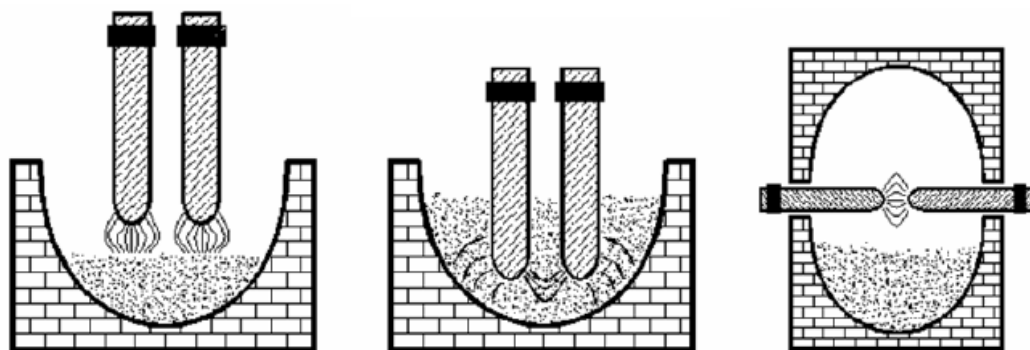
N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	6 de 41



	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

sendo comumente utilizado como um forno secundário, cujo objetivo é realizar o refino da sucata metálica derretida, liberando o forno principal (arco direto) para uma maior sequência de corridas;

- Forno a arco indireto: a potência útil se transforma em calor totalmente no arco elétrico. Nesse caso, os eletrodos operam totalmente dissociados da matéria-prima.



Forno a Arco Direto

Forno a Arco Submerso

Forno a Arco Indireto

Figura 2. Tipos construtivos de Fornos a Arco Elétrico.


Estes diferentes tipos construtivos, adicionados às diferentes fases de operação do forno, determinam a intensidade da flutuação e distorção da tensão de fornecimento. Deste modo, o capítulo subsequente apresenta a descrição do comportamento do arco elétrico entre os eletrodos e o material a ser fundido, assim como, entre suas diferentes fases de operação.

## 6.2 Arco Elétrico

O arco elétrico é formado pela passagem de uma corrente elétrica através do ar ionizado que separa os dois pontos entre os quais o arco é formado. Sua ignição se dá quando a tensão de alimentação dos eletrodos, dentro de um semiciclo, eleva-se além de um determinado valor, tornando-se capaz de romper a rigidez dielétrica do meio onde os eletrodos se encontram. Quando a corrente passa por zero o arco se extingue, voltando à ignição no semiciclo seguinte.

A Figura 3 apresentam o modelo linear e o comportamento entre tensão e corrente durante as fases de ignição e extinção do arco elétrico, entre as passagens de um semiciclo a outro. A tensão de ignição ( $V_{ig}$ ) e a tensão de extinção ( $V_{ex}$ ) são determinados pelo comprimento do arco elétrico durante a operação do forno. O ponto AC representa a resistência durante a pré ocorrência do arco, enquanto que os pontos de AB e CD representam a resistência durante o arco elétrico.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	7 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

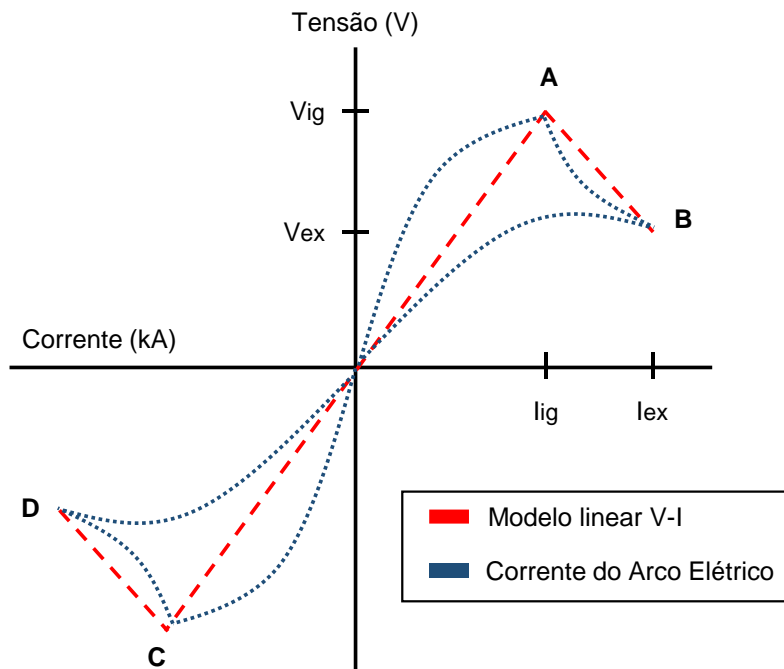


Figura 3. Características da Tensão x Corrente durante a fase de fusão no FEA.


No primeiro período, o arco começa a reignição desde a extinção. Conforme a tensão do arco aumenta para a tensão de reignição ( $V_{ig}$ ), o FEA atua como um circuito aberto. A tensão de reignição é considerada proporcional ao comprimento do arco (vide Figura 1). No segundo período, o arco é estabelecido e um transitório de tensão aparece no início do processo de fusão do arco. Assim, a tensão do arco cai repentinamente de  $V_{ig}$  para um valor constante, até atingir o próximo período. Por fim, durante o terceiro período, o arco começa a se extinguir. A tensão do arco continua a cair suavemente, exceto a uma mudança brusca após atingir a tensão de extinção do arco ( $V_{ex}$ ).

Para a fase de refino, a operação do forno se estabelece através de um arco mais longo e constante, sendo dependente do fator de potência de operação do forno. Com um fator de potência acima de 0,9, a tensão no instante da extinção do arco é suficiente para a reignição imediata, resultando em um arco praticamente estável. Por outro lado, para fatores de potência da ordem de 0,7 a 0,8, a tensão durante a extinção do arco não é suficiente para sua reignição imediata, levando a um arco mais instável. Este fato acarreta em uma alta demanda de reativos, que deve ser compensada com a correção do fator de potência da unidade consumidora.

Para eficiência do processo de fusão e refino, os controles dos eletrodos são peças fundamentais para regulação do comprimento do arco, de modo a permitir que a potência consumida seja o mais constante possível durante a operação. Como o FEA é alimentado por uma fonte de tensão constante, a condição de potência constante é atendida se a resistência

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	8 de 41



	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

do arco varia. Uma vez que o arco é parte de um circuito com resistência e reatância constante, o mesmo resultado é atingido se a impedância do arco permanece inalterada.

Por outro lado, o FEA de corrente contínua, não apresenta as mesmas características do forno de corrente alternada. A corrente contínua suprime a passagem por zero da corrente alternada, consequentemente, a estabilidade do arco será melhorada e os distúrbios associados serão minimizados. O método de utilização da corrente elétrica para fusão de metais em um forno de corrente contínua é basicamente o mesmo que um forno de corrente alternada.

### 6.3 Impactos causados pelo Forno Elétrico a Arco

Do ponto de vista da qualidade da energia elétrica, dois aspectos apresentam maior relevância na análise da operação de um forno elétrico a arco: as flutuações de tensão, causadas pelas variações do arco que causam o efeito flicker, e o aparecimento de harmônicos de corrente e tensão.


Entre os principais impactos causados ao sistema elétrico, destacam-se:

- Falhas de sensores e equipamentos de comando elétrico, que operam através da identificação da passagem por zero ou de pico dos valores instantâneos da tensão e/ou corrente elétrica;
- Impactos na operação de equipamentos sensíveis às oscilações de tensão, como: televisores, sistemas computacionais, sistemas de acionamento e dispositivos de proteção ajustados para referência fixa de tensão;
- Aumento das perdas nos equipamentos dos sistemas de potência, como a redução na eficiência de motores C.A., e consequente aumento da demanda de potência reativa;
- Saturação de transformadores de corrente;
- Interferência em sistemas de telecomunicação;
- Incremento de vibrações mecânicas e ruídos audíveis;
- Efeito de cintilação luminosa, ou flicker.

Estes impactos, consequentemente, prejudicam a Distribuidora e consumidores, como por exemplo, o aumento da necessidade de investimentos no sistema elétrico, o aumento nos custos de manutenção, o aumento nas contas de energia elétrica, bem como falhas de equipamentos sensíveis a estas interferências elétricas, gerando perdas em processos industriais.

Sendo assim, métodos de análise e soluções de mitigação devem ser estudadas e aplicadas antes da conexão de cargas potencialmente perturbadoras ao sistema elétrico, garantindo a qualidade do fornecimento de energia elétrica aos nossos clientes.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUEN	05/05/2022	9 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

## 6.4 Indicadores e Limites estabelecidos

Este item estabelece valores e limites para os principais parâmetros e indicadores do sistema elétrico que permitem avaliar os níveis de perturbação introduzidos por determinadas cargas e dispositivos conectados. Tais valores estão baseados nos requisitos prescritos no PRODIST Módulo 8, Submódulo 2.9 do Procedimentos de Rede e demais normas referenciadas ao longo desta orientação técnica.

Para o caso dos fornos elétricos a arco, conforme já mencionado neste documento, espera-se analisar, principalmente, os impactos gerados para os indicadores de **flutuação de tensão e distorções harmônicas**.

### 6.4.1. Flutuação de Tensão

As flutuações de tensão são variações sistemáticas do valor eficaz ou de pico da tensão instantânea. Este fenômeno também é relacionado a impressão visual resultante das variações do fluxo luminoso nas lâmpadas elétricas, causada pelas flutuações da tensão de alimentação, conhecida também como *flicker*. A severidade de cintilação é uma representação do incômodo visual percebido pelas pessoas e seus níveis, associados à flutuação da tensão, são quantificados pelos indicadores Pst e Plt, conforme descrição e recomendação da Norma Técnica IEC Publicação 61000-4-15 "*Flickermeter – Functional and design specifications*".


O indicador Pst (*probability short term*, ou probabilidade no curto prazo) 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*, ou probabilidade no longo prazo) 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. O detalhamento da formulação para o cálculo e obtenção dos valores destes indicadores podem ser obtidos na citada publicação da IEC.

São os seguintes os limites individuais adotados para os indicadores de severidade de cintilação no ponto de conexão do acessante com o sistema elétrico da CPFL:

- **Pst95%** → valor do indicador **Pst** que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos num período contínuo de 10 (dez) minutos;
- **Plt95%** → valor do indicador **Plt** que foi superado em apenas 5 % dos registros obtidos num período contínuo de 2 (duas) horas. A integralização semanal deverá ser em janelas de 2 horas não deslizantes.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	10 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

Para sistemas atendidos pela Rede Básica do Sistema Elétrico Interligado, ou em pontos de fronteira com estes sistemas, deverão ser consultados os limites individuais e globais estabelecidos no Procedimentos de Redes do ONS. Aos demais sistemas de subtransmissão e distribuição, devem ser adotados os limites estabelecidos no PRODIST Módulo 8, conforme representado na Tabela 1, detalhada abaixo, correspondendo ao máximo valor desejável a ser observado no sistema de distribuição.

Tabela 1 - Limites para Flutuação de Tensão.

Indicador	Tensão Nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
<b>Pst95%</b>	1,0 pu	1,5 pu	2,0 pu

Conforme pode ser observado, os valores de Plt não são apurados pelo PRODIST, deste modo, os valores referenciados na Tabela 4 podem ser utilizados para análises do indicador.

#### 6.4.2. Distorção Harmônica

O indicador para avaliar o desempenho quanto a harmônicos, em regime permanente, no ponto de conexão do acessante, corresponde à distorção de tensão e corrente harmônica. As distorções harmônicas são fenômenos associados a deformações nas formas de onda das tensões e correntes em relação à onda senoidal da frequência fundamental. Ela é representada pela raiz quadrada do somatório quadrático das tensões harmônicas de ordens 2 a 50. Esse conceito quantifica o conteúdo harmônico total existente em um determinado ponto da rede elétrica da Distribuidora. A representação matemática deste fenômeno é demonstrado abaixo.

$$DTT\% = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{h \text{ máx}} V_h^2}}{V_1} \cdot 100$$

Sendo:

- $V_1$  = Tensão fundamental medida.
- $V_h$  = Tensão harmônica de ordem h.
- h = todas as ordens harmônicas de 2 até h<sub>máx</sub>.
- h máx = máxima ordem harmônica considerada, por exemplo, 50ª ordem.

Para representar os limites regulados deste fenômeno, o PRODIST Módulo 8 definiu os limiares da distorção harmônica, dividida entre harmônicas totais, pares, ímpares não múltiplas de três e múltiplas de três, conforme apresentado na Tabela 2.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUEN	05/05/2022	11 de 41


	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

Tabela 2. Terminologia Harmônicas de Tensão.

Identificação da Grandeza	Símbolo
Distorção harmônica total de tensão	DTT%
Distorção harmônica total de tensão para os componentes pares não múltiplos de 3	DTTp%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes ímpares não múltiplas de 3	DTTi%
Distorção harmônica total de tensão para as componentes múltiplas de 3	DTT3%
Valor do indicador DTT% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT95%
Valor do indicador DTTp% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTTp95%
Valor do indicador DTTi% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTTi95%
Valor do indicador DTT3% que foi superado em apenas 5 % das 1008 leituras válidas	DTT395%

Com estas terminologias, são definidos os limites de distorção harmônica de tensão, de acordo com cada classe de tensão, conforme apresentado na Tabela 3.


Tabela 3. Limites das distorções harmônicas totais (em % da tensão fundamental).

Indicador	Tensão nominal		
	$V_n \leq 1,0 \text{ kV}$	$1,0 \text{ kV} < V_n < 69 \text{ kV}$	$69 \text{ kV} \leq V_n < 230 \text{ kV}$
DTT95%	10,0%	8,0%	5,0%
DTTp95%	2,5%	2,0%	1,0%
DTTi95%	7,5%	6,0%	4,0%
DTT395%	6,5%	5,0%	3,0%

**Importante:** No caso de medições realizadas utilizando-se TPs com conexão do tipo V ou delta aberto, os limites permitidos para o indicador DTT395% deverão corresponder a 50% dos respectivos valores indicados na Tabela 3.

Em razão da não existência de limites regulados pelo PRODIST Módulo 8, referente às distorções harmônicas de corrente, é referenciado a este documento as recomendações dispostas na *IEEE 519 - Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems*. Nesta normativa, recomenda-se a medição deste fenômeno entre os pontos de conexão, ou PAC, dos consumidores e operadores do sistema de energia elétrica, para que seja possível determinar se os limites apurados estão em valores razoáveis de operação. Portanto, no Anexo V - Limites de Distorção Harmônica de Corrente deste

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	12 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

documento, são apresentadas as tabelas com as faixas de limites reguladas para as harmônicas de corrente, de acordo com cada faixa de tensão.

Para as tabelas supracitadas, os harmônicos pares são limitados a 25% dos limites de harmônicos ímpares, referenciados em cada tabela. Adicionalmente, não é permitida a implementação de soluções que resultam em um deslocamento CC (corrente contínua) para as distorções de corrente, por exemplo, conversores de meia onda.

Para determinação do limite deste indicador, é preciso determinar a razão  $I_{sc}/I_L$ . Deste modo, é necessário determinar o valor de corrente ( $I_L$ ) no PAC, determinado pela soma das correntes, correspondentes à demanda máxima, durante cada um dos doze meses anteriores, dividida por 12. Enquanto que, a máxima corrente de curto circuito no PAC ( $I_{sc}$ ) é disponibilizado pela CPFL ao acessante. Para os casos de novas conexões, o valor de  $I_L$  pode ser determinado pela estimativa da demanda daquela unidade consumidora, para os próximos 12 meses.

Por fim, para os sistemas em que os valores estabelecidos na Tabela 3 e nas tabelas dispostas no Anexo V - Limites de Distorção Harmônica de Corrente não sejam atendidos, o acessante deverá propor soluções para adequação dos limites apurados para as faixas aceitáveis.

#### 6.4.3. Considerações IEC 61000-3-7 e Demais Literaturas


Além dos limites normativos já conhecidas do PRODIST Módulo 8, a norma IEC 61000-3-7 orienta os princípios que podem ser usados como base para determinar os requisitos de conexão de instalações que geram flutuação de tensão, podendo ser uma carga ou um gerador, em sistemas de energia de media tensão (MT), alta tensão (AT) e extra alta tensão (EAT ou EHV). O objetivo principal é fornecer orientações aos operadores ou Distribuidoras, sobre as práticas de engenharia que proverão um adequado fornecimento de energia para todos os clientes.

A Tabela 4 apresenta os níveis de flutuação de tensão que podem ser usados para determinar os limites de emissão, levando em consideração todas as instalações que causam este fenômeno. Apenas valores indicativos podem ser fornecidos, porque os níveis de planejamento variam de caso a caso, dependendo da estrutura do sistema e das circunstâncias.

Tabela 4. Valores indicativos de níveis de planejamento para flutuação de tensão em sistemas de energia MT, AT e EAT.

Indicador	MT	AT - EAT
Pst	0,9 pu	0,8 pu
Plt	0,7 pu	0,6 pu

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	13 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

**NOTA 1:** Estes valores foram escolhidos na suposição de que o coeficiente de transferência entre sistemas MT ou AT e sistemas BT é unitário.

**NOTA 2:** Na prática, os coeficientes de transferência entre diferentes níveis de tensão são menores que 1,0. Isso pode ser levado em consideração ao estabelecer novos níveis de planejamento. Por exemplo, um valor típico para o coeficiente de transferência entre AT e BT é  $TPstHL = 0,8$ . Nesse caso, o nível de planejamento indicativo para AT torna-se  $LPstHV = 0,8 / 0,8 = 1,0$ .

**NOTA 3:** Em alguns países, os níveis de planejamento são definidos em padrões ou diretrizes nacionais.

**NOTA 4:** As características de tensão que são níveis quase garantidos existem em alguns países para sistemas MT e AT.

Conforme nota 2, devem ser considerados os coeficientes de transferência para determinar o limite do indicador, ou seja, os limites definidos na Tabela 4 devem ser divididos pelo seu respectivo coeficiente de transferência. O exemplo do Anexo B da norma IEC 61000-3-7, apresentado na Tabela 5 abaixo, apresenta estes coeficientes apurados para as diferentes classes de tensão.

Tabela 5. Exemplo de coeficientes de transferência para flutuação de tensão.

Nível de Tensão	Coeficiente de Transferência
220 kV até 70 kV	0,82
70 kV até 15 kV	0,91
15 kV até 0,23 kV	0,98 - 1,0

Adicionalmente, cita-se as considerações do livro Instalações Elétricas Industriais [2], onde são apresentados limites mais restritos para análise da conexão de um forno a arco, conforme apresentado na Tabela 6. Estes limites são referenciados pela metodologia inglesa, utilizados em meados da década de sessenta, que iniciou os estudos de um fator de severidade.

Tabela 6. Limites esperados para o cálculo simplificado da flutuação de tensão.


Nível de Tensão	Limite (%)
$\leq 138$ kV	0,25
$> 138$ kV	0,20

Como pode ser observado, as referências dos limites indicados neste item são inferiores aos limites regulados no PRODIST Módulo 8, contudo, apesar de não atenderem a referência regulatória nacional, pode-se utilizar para análises do indicativo da qualidade de energia no sistema elétrico da CPFL, a critérios do analisador.

## 6.5 Princípios para Avaliação da Qualidade do Produto

Para análise da conexão destas cargas ao sistema elétrico da CPFL, deve-se atender as etapas destacadas na Figura 4. Para que cada etapa seja atendida, o consumidor deverá preencher

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	14 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

os anexos listados neste GED, sendo eles: Anexo II - Informações a serem disponibilizadas pelo Acessante e Anexo III - Medições no PAC Antes e Após a Conexão do Forno Elétrico a Arco, além das informações requisitadas no GED 10099. Da mesma forma, os técnicos e engenheiros da CPFL, deverão analisar os impactos gerados pela conexão destes fornos ao sistema elétrico, a partir da modelagem das cargas nos softwares de simulação computacional, como exemplo, CYME e Sinapgrid (vide exemplo de aplicação no Anexo IV - Modelagem e Simulação do Forno Elétrico a Arco).

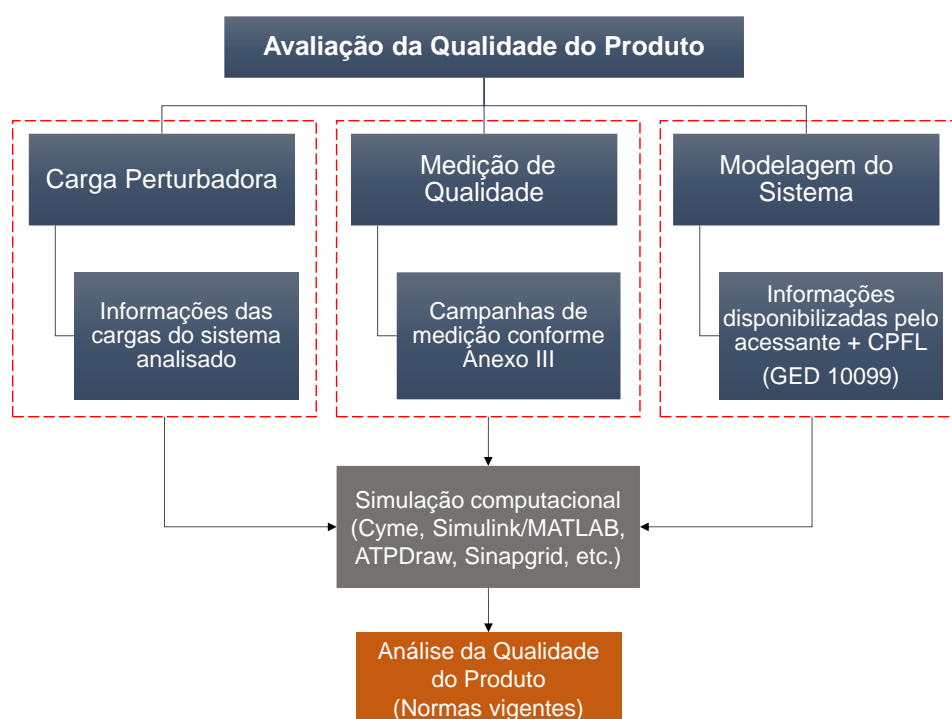



Figura 4. Estrutura analítica para análise da qualidade de energia.

## 6.6 Critérios de Análise e Atendimento

Neste capítulo são definidos os critérios de análise da pré e pós conexão dos fornos elétricos a arco, a serem conectados no sistema de distribuição elétrica da CPFL. As análises aqui representadas, são baseadas nas informações contidas no Anexo E da norma IEC 61000-3-7 e literaturas complementares (como o livro Instalações Elétricas Industriais, do autor João Mamede Filho). Ressalta-se que esta análise não sobrepõe a necessidade da realização das campanhas de medição e modelagem/simulação da conexão do forno a arco no sistema elétrico da CPFL.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	15 de 41



	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

### 6.6.1. Análise da pré conexão do Forno a Arco

A pré-análise ou predeterminação da flutuação produzida por um forno a arco CA ou CC (antes que o equipamento seja colocado em operação) é um exercício difícil, mas importante. A pré-análise é necessária para avaliar o local de conexão do forno a arco e a necessidade de instalação de compensação ou ações mitigatórias.

As medições de flutuação de tensão realizadas no passado permitiram o desenvolvimento de uma equação empírica para estimar a cintilação produzida por um forno a arco:

$$P_{st95\%} = K_{st} \cdot \frac{S_{SCf}}{S_{SC}}$$

Na falta de informação do valor de  $S_{SCf}$ , a relação abaixo pode ser utilizada:

$$S_{SCf} = 2 \cdot S_{nom}$$

Onde:

$S_{SCf}$  = potência de curto-circuito do forno (teste de eletrodos de curto-circuito), em kVA.

$S_{nom}$  = potência nominal do forno a arco, em kVA.

$S_{SC}$  = potência de curto-circuito do sistema no POE, em kVA.

$K_{st}$  = fator de emissão de oscilação característico do forno a arco.


Sabe-se que, se a potência do curto-circuito é aumentada, a flutuação produzida diminui na mesma proporção. No entanto, no caso de um nível muito baixo de curto-circuito, a quantidade de flutuação pode ser maior do que o previsto por uma relação linear com o nível de curto-circuito. Isso pode ser explicado pelo fato de que a instabilidade do arco aumenta quando o forno é operado a partir de um sistema menos robusto.

O fator  $K_{st}$  pode ser determinado por uma medição de emissão de flutuação em um forno a arco de tamanho e tecnologia semelhantes que já está em operação. Este fator deve ser fornecido pelo acessante, requisito presente no Anexo II - Informações a serem disponibilizadas pelo Acessante. Em algumas literaturas, como [2], quando não se conhece o fator  $K_{st}$  recomenda-se um valor usual de 0,12, contudo, para estes casos, os limites da Tabela 6 devem ser considerados.

Se o  $P_{st95\%}$  calculado ultrapassar o limite de emissão, a compensação deve ser instalada.

Caso uma compensação seja proposta, sua eficácia pode ser avaliada determinando o coeficiente de redução da flutuação ( $R_{COMP}$ ). Esta é a razão entre o nível de oscilação medido

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	16 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

sem e com o equipamento de compensação em serviço. Este coeficiente de redução pode ser determinado por medições de emissão de flutuação em fornos a arco existentes com o mesmo tipo de compensação. O coeficiente  $R_{COMP}$  está entre 1,5 e 2,0 para um SVC e entre 3 e 6 para a compensação STATCOM.

### 6.6.2. Análise da pós conexão do Forno a Arco

Conforme ilustrado na Figura 5, a instalação a ser avaliada (forno a arco e compensador) é conectada no ponto A, no lado secundário do transformador abaixador, de impedância  $Z_T$ . O transformador em seu lado alta tensão é conectado no ponto B do sistema elétrico. A alimentação de curto-circuito nos pontos A e B são, respectivamente,  $S_{SCA}$  e  $S_{SCB}$ .

No caso de um forno a arco,  $S_{SCA}$  será muito menor do que  $S_{SCB}$ , isso resultará em um nível de flutuação importante no ponto A quando o forno a arco estiver operando. Na maioria dos casos, a influência de outras instalações flutuantes conectadas ao sistema será completamente desprezível no ponto A, mesmo que não seja o caso no ponto B.

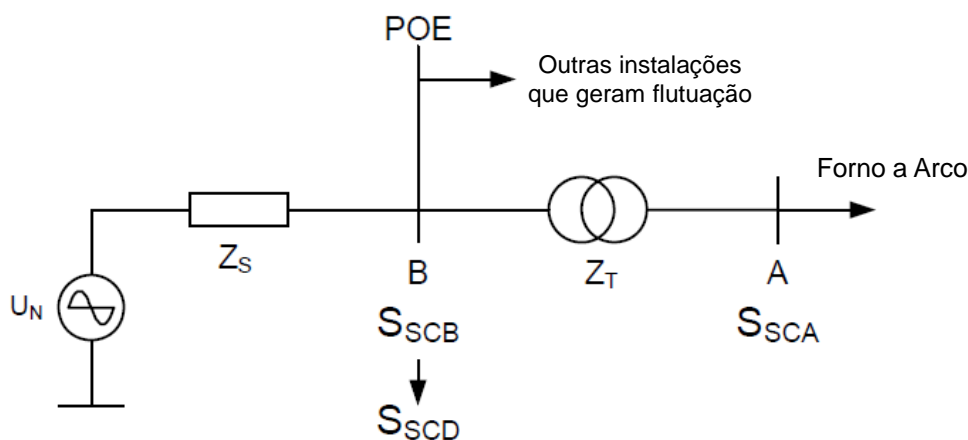



Figura 5. Sistema modelo para exemplificar a avaliação de emissão de flicker.

O nível de flutuação é medido no ponto A e pode ser convertido em “potência de curto-circuito real” no ponto de avaliação ( $S_{SCB}$ ) ou “potência de curto-circuito declarada” ( $S_{SCD}$ ) para determinar o nível de emissão do forno a arco no ponto de avaliação (ponto B):

$$P_{stB} = \frac{S_{SCA}}{S_{SCD}} \cdot P_{stA}$$

Para obter bons resultados, o ângulo das impedâncias  $Z_S$  e  $Z_T$  deve ser semelhante (a relação X/R deve ser aproximadamente a mesma). Em geral, a impedância do transformador  $Z_T$  é predominantemente indutiva, e a impedância de curto-circuito dos sistemas MT, AT ou EAT

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUEN	05/05/2022	17 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

também é quase indutiva (ângulo de  $Z_S$  entre  $80^\circ$  e  $85^\circ$ ). Se este não for o caso, o impacto das variações da potência ativa no nível de emissão de flutuação da tensão não será estimado corretamente.

## 6.7 Sugestões para Mitigação dos Distúrbios da Qualidade de Energia


Após a análise do estudo da conexão do FEA e verificado o não atendimento aos limites regulados, algumas soluções podem ser direcionadas ao cliente, a fim de mitigar ou eliminar os distúrbios causados por este(s) forno(s). As soluções podem ser divididas em: redução da carga do forno, melhoria do sistema supridor e instalação de equipamentos de compensação. Para atingir tal objetivo, pode-se tomar as seguintes providências, sendo as responsabilidades divididas entre Distribuidora e Consumidor:

- Distribuidora (CPFL):
  - Recondutoramento do circuito de alimentação do cliente, de forma a reduzir a impedância série do circuito, elevando-se os níveis de curto-circuito;
  - Elevação dos níveis de tensão de fornecimento, reduzindo-se a corrente de linha;
  - Instalação de um novo alimentador para atendimento ao consumidor, também denominado de “alimentador expresso”, reduzindo-se a impedância série do mesmo e, conseqüentemente, elevando-se o nível de curto-circuito.

**Nota 1:** Entre as soluções destacadas para Distribuidora, o recondutoramento é uma prática convencional com baixo nível de complexidade técnica, podendo trazer resultados satisfatórios. Contudo, dependendo do tamanho do circuito a ser recondutorado, os custos e o tempo de execução da obra serão elevados consideravelmente, onerando a solução e causando desligamentos programados aos consumidores para execução desta solução. Além disso, a solução é restrita à capacidade física, referente a bitola dos condutores.

- Consumidor:
  - Redução da carga ou potência do forno;
  - Implementação de sistema de compensação série no circuito de alimentação da planta industrial, de forma a reduzir a impedância série do circuito, elevando-se os níveis de curto-circuito;
  - Instalação de condensadores síncronos na barra de suprimento do forno e instalação de um reator série com o circuito do alimentador (para minimizar a corrente);
  - Instalação de compensadores estáticos e auto comutados, como: capacitor chaveado a tiristores (CCT), reator controlado a tiristores (RCT), soluções mistas (RCT + CCT), compensador auto comutado (STATCOM) ou compensador estático de reativo (SVC);
  - Instalação de reatores a núcleo saturado.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUEN	05/05/2022	18 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

**Nota 2:** Entre as soluções destacadas ao consumidor, os compensadores estáticos de reativo, também denominados de Static VAR Compensators (SVC), são uma boa resposta para correção e compensação para diminuir as flutuações de potência reativa causadas pelo FEA. Estes equipamentos são conectados em paralelo (shunt) com o barramento a ser monitorado, utilizando-se de elementos passivos, como reatores e capacitores, para controle da tensão do barramento. Seu controle é realizado por tiristores, os quais possuem rápida resposta para absorver ou injetar potência reativa na barra, garantindo uma melhor estabilidade para as variações nas impedâncias do sistema. Entretanto, os custos de implementação desta solução são elevados, podendo não se tornar viável para determinados sistemas industriais. A Figura 6 apresenta um modelo simplificado da estrutura de um SVC conectado ao barramento (PAC) a ser regulado.

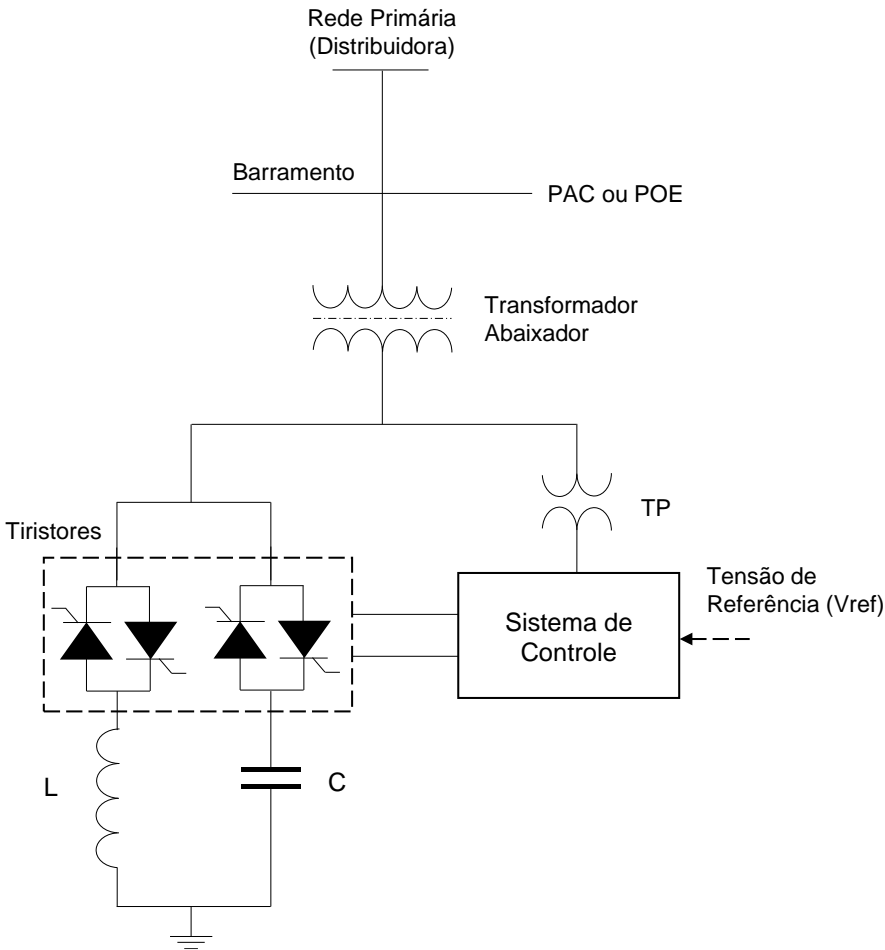



Figura 6. Estrutura simplificada de um SVC.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	19 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

A Figura 7 apresenta um exemplo de compensador estático instalado em um cliente conectado na alta tensão (138kV), após ocorrências de constantes flutuações de tensões em município atendido pela CPFL, tendo a solução sido alinhada em comum acordo com o cliente.



Figura 7. Compensador estático instalado em um cliente com FEA.

## 7. CONTROLE DE REGISTROS

Não se aplica.

## 8. ANEXOS

Os anexos desta orientação técnica são apresentados a seguir.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUEN	05/05/2022	20 de 41



Tipo de Documento:	Orientação Técnica
Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

Anexo I - Detalhes de um Forno Elétrico a Arco

A fim de exemplificar a estrutura física de um forno elétrico a arco, a Figura 8 apresenta a concepção do equipamento e seus principais componentes, assim como citado no item 6.1.

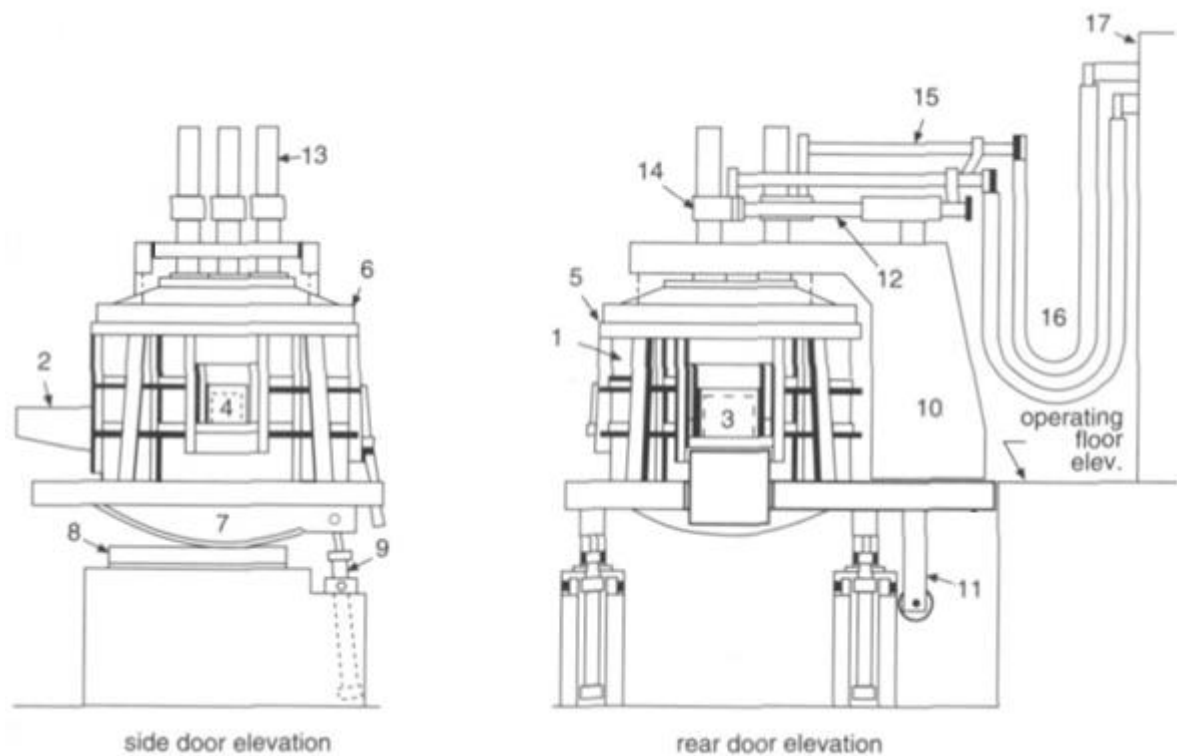



Figura 8. Detalhe de um Forno Elétrico a Arco.

Principais componentes do Forno Elétrico a Arco	
1. Carcaça	10. Estrutura de abertura da abóboda
2. Canal de vazamento	11. Coluna de elevação do eletrodo
3. Porta	12. Braço do eletrodo
4. Porta lateral	13. Eletrodos de grafite
5. Anel de apoio da abóboda	14. Porta eletrodo
6. Anel da abóboda	15. Barramento
7 e 8. Trilho para basculamento	16. Cabos elétricos secundários
9. Pistão para basculamento	17. Barramento secundário

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	21 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

## Anexo II - Informações a serem disponibilizadas pelo Acessante


DADOS DO CONSUMIDOR	
Unidade Consumidora (UC):	
Razão Social:	
Tensão de Contrato (kV):	

1. Preencher a tabela abaixo para cada forno a arco disponível na Unidade Consumidora:

DADOS TÉCNICOS DOS FORNOS ELÉTRICOS A ARCO				
DESCRIÇÃO DA INFORMAÇÃO	FORNO 1	FORNO 2	FORNO 3	FORNO 4
1. Aplicação do forno (tipos de materiais a serem fundidos)				
2. Ciclo diário de operação do forno (enviar diagrama de potência (MW) diária total e individual dos fornos (indicar fases: ignição, fusão, refino, carga e descarga))				
<b>A) Dados Físicos</b>				
1. Capacidade dos fornos (ton.)				
<b>B) Dados sobre o funcionamento do(s) forno(s)</b>				
1. Fornos operando simultaneamente (Sim ou Não)				
2. Tempo médio por corrida (min.)				
3. Número de carregamentos durante a corrida				
4. Tempos médios para as fases de ignição, de fusão, refino e carga/descarga (min.)				
<b>C) Características elétricas</b>				
1. Potência nominal do forno (MVA)				
2. Fator de potência sob potência nominal				
3. Tensão nominal (V)				
4. Corrente nominal (kA)				
5. Potência de curto-circuito do forno (MVA)				
6. Potência máxima (MVA)				
7. Fator de potência sob potência máxima				
8. Comprimento médio do arco elétrico (cm)				
9. Tensão média de arco elétrico (V)				
10. Potências ativas médias para as fases de ignição, fusão e refino (MW)				
11. Fatores de potência médios para as fases de ignição, fusão e refino.				

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	22 de 41




	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

12. Comprimentos médios de arco para as fases de ignição, fusão e refino.				
13. Alterações de tensão (r) (por min.)				
14. Dados do(s) transformador(es) dos fornos				
a) potência nominal (MVA)				
b) impedância de curto-circuito (base 100 MVA)				
c) ligações dos enrolamentos				
d) relação dos tapes disponíveis				
e) tape fixo				
f) mudança de tape sob carga				
g) mudança de tape em vazio				
15. Resistência do circuito de alimentação do eletrodo, incluindo o eletrodo.				
16. Reatância do circuito de alimentação do eletrodo, incluindo o eletrodo.				
17. Fator de emissão ou severidade (Kst) do forno. Fator que depende do projeto do forno, tipo de sucata e ciclo de operação.				
Para fornos a arco em corrente contínua, além dos dados acima, fornecer os dados para o retificador do forno.				
<b>D) Sistema de controle de eletrodos</b>				
1. Tipo de controle: (automático ou manual)				
a) corrente constante ou impedância constante				
b) acionamento hidráulico ou acionamento elétrico				
<b>E) Dados sobre equipamentos para controle da tensão e atenuação das perturbações</b>				
1. Compensadores estáticos				
a) tipo: (RCT, CCT, RCT/CCT, SVC, Núcleo saturável, etc.)				
b) potência mínima (MVar)				
c) potência máxima (MVar)				
d) Características V x I reativa - Anexar curva				
e) diagrama elétrico - Anexar diagrama				
2. Filtros - Diagramas elétricos com valores das impedâncias (R, X, C), tensões nominais e locais de ligação				
3. Bancos de capacitores - Anexar diagrama elétrico com capacidade, tensão nominal e local de ligação.				
4. Reator série - Informar a impedância e os tapes				
5. Outros tipos de compensação de flicker (compensador série de indutância variável, compensador síncrono etc.) - Incluir descrição e diagramas.				

2. Sistema de controle dos eletrodos: fornecer o diagrama de blocos indicando parâmetros das funções de transferência e tempo mínimo de resposta em segundos.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	23 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

3. Forno de Indução (caso possua):

- a. Fornecer as características e dados dos fornos.


4. Forno a arco ou fornos de indução:

- a. Fornecer o diagrama unifilar do sistema de alimentação do forno, com as impedâncias dos elementos do circuito elétrico.
- b. Fornecer as curvas características de operação do forno (potência ativa, potência reativa e fator de potência em função da corrente).

5. No caso de utilização de gradadores para fornos ou outras atividades industriais, enviar informação desses dispositivos, incluindo tipo de válvulas, diagramas de conexão das válvulas, transformadores, etc., assim como do sistema de filtragem.

6. Adicionalmente, enviar os Anexos II e III do GED 10099 - Requisitos para Conexão de Cargas Potencialmente Perturbadoras ao Sistema Elétrico da CPFL.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUEN	05/05/2022	24 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

### Anexo III - Medições no PAC Antes e Após a Conexão do Forno Elétrico a Arco

#### RESULTADOS DA CAMPANHA DE MEDIÇÃO


<b>Início da medição:</b>	00/00/0000 00:00	<b>RTP de medição:</b>	
<b>Fim da medição:</b>	00/00/0000 00:00	<b>RTC de medição:</b>	
<b>Amostras válidas<sup>1</sup>:</b>		<b>Nº Série Medidor:</b>	
<b>Amostras expurgadas:</b>		<b>Última Calibração:</b>	
<b>Tensão nominal:</b>		<b>ID Ponto Medição:</b>	

<sup>1</sup> serão aceitas as campanhas de medição com no mínimo 1.008 registros válidos.

Indicadores de Qualidade da Energia			
Indicador	Fase A	Fase B	Fase C
Tensão máxima (V)			
Tensão média (V)			
Tensão mínima (V)			
DTT 95%			
Pst 95%			
FD 95%			

Componentes Harmônicas de Tensão (fase com maior DTT)										
Ordem	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Amplitude (%)										
Ordem	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Amplitude (%)										
Ordem	22	23	24	25						
Amplitude (%)										

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	25 de 41


	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

Componentes Harmônicas de Corrente (fase com maior DTI)										
Ordem	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Amplitude (%)										
Ordem	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Amplitude (%)										
Ordem	22	23	24	25						
Amplitude (%)										

#### Observações:

- Preferencialmente, estes valores deverão ser informados pela CPFL, ou excepcionalmente pelo Acessante através dos sinais dos TPs e TCs de medição, a critério da CPFL.
- As medições deverão ser realizadas por um período de medição de pelo menos 1.008 leituras válidas, conforme determinações do PRODIST Módulo 8.
- Estas informações deverão ser consideradas nas simulações.
- Estas informações devem estar contidas no Anexo III do GED 10099 - Requisitos para Conexão de Cargas Potencialmente Perturbadoras ao Sistema Elétrico da CPFL.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUEN	05/05/2022	26 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

## Anexo IV - Modelagem e Simulação do Forno Elétrico a Arco (CYME)

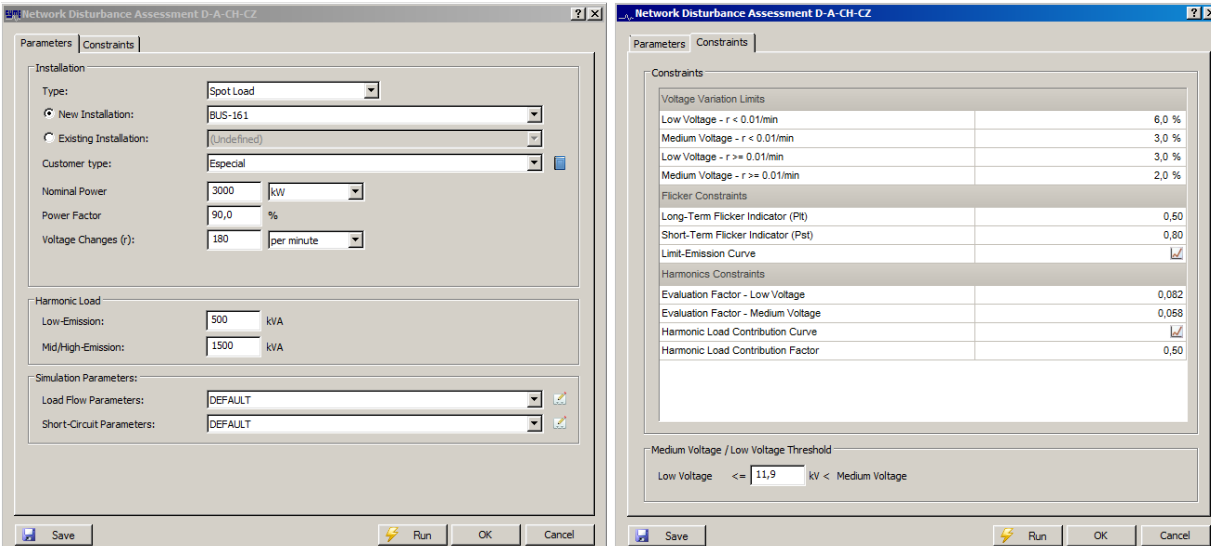
Para a modelagem do FEA, a CPFL dispõe dos softwares CYME e Sinapgrid para análise dos impactos causados por estes equipamentos no sistema elétrico. Entre as soluções, o CYME se destaca com uma maior gama de módulos focados na análise da qualidade de energia, sendo assim, este software será utilizado como exemplificador da análise requerida. Abaixo são descritos os principais módulos do CYME para realização das análises de impacto da qualidade do produto, assim como, uma aplicação prática e seus relatórios gerados.

### 1. Módulo “Network Disturbance Assessment D-A-CH-CZ”

Este módulo quantifica e avalia várias perturbações de qualidade de tensão introduzidas por um equipamento, por meio de uma série de testes. O módulo usa o fluxo de carga e simulações de curto-circuito do CYME para avaliar variações de tensão, níveis de oscilação e distorção harmônica, a fim de ajudar a determinar se a interconexão de uma carga ou gerador é aceitável ou não, de acordo com uma série de limites ajustáveis.

Para isso, utiliza como referência a norma D-A-CH-CZ: Technical regulations for the evaluation of grid distortion effects [5], utilizada em países como: Alemanha, Áustria, Suíça e República Tcheca. Além disso, utiliza as referências da norma IEC 61000-3-7, citada e apresentada nesta orientação técnica.

Acessando a função (Analysis > Network Disturbance Assessment), conforme Figura 9, é possível verificar que o módulo possui três subconjuntos: Análise de variação de tensão, Análise de oscilação (ou flutuação de tensão – Pst e Plt) e Análise de distorção harmônica.



**Network Disturbance Assessment D-A-CH-CZ - Parameters**

Installation:

Type: Spot Load

New Installation: BUS-161

Existing Installation: (Undefined)

Customer type: Especial

Nominal Power: 3000 kW

Power Factor: 90,0 %

Voltage Changes (r): 180 per minute

Harmonic Load:

Low-Emission: 500 kVA

Mid/High-Emission: 1500 kVA

Simulation Parameters:

Load Flow Parameters: DEFAULT

Short-Circuit Parameters: DEFAULT

**Network Disturbance Assessment D-A-CH-CZ - Constraints**

Constraints:

Voltage Variation Limits	
Low Voltage - $r < 0.01/\text{min}$	6,0 %
Medium Voltage - $r < 0.01/\text{min}$	3,0 %
Low Voltage - $r \geq 0.01/\text{min}$	3,0 %
Medium Voltage - $r \geq 0.01/\text{min}$	2,0 %

Flicker Constraints	
Long-Term Flicker Indicator (Pit)	0,50
Short-Term Flicker Indicator (Pst)	0,80
Limit-Emission Curve	<input checked="" type="checkbox"/>


Harmonics Constraints	
Evaluation Factor - Low Voltage	0,082
Evaluation Factor - Medium Voltage	0,068
Harmonic Load Contribution Curve	<input checked="" type="checkbox"/>
Harmonic Load Contribution Factor	0,50

Medium Voltage / Low Voltage Threshold

Low Voltage  $\leq$  11,9 kV < Medium Voltage

Figura 9. Módulo Network Disturbance Assessment.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUEN	NO05/05/2022	27 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

A lista das instalações suportadas (tipos de carga) são: Induction Motor (Motor de Indução), Spot Load (Carga Pontual), Induction Generator (Gerador de Indução), Synchronous generator (Gerador síncrono); Electronically coupled generator (Gerador acoplado eletronicamente); Photovoltaic (Fotovoltaico); Micro-turbine (Microturbina); Sistema de conversão de energia eólica (Wind Energy Conversion System - WECS) e Célula de combustível de óxido sólido (Solid Oxide Fuel Cell - SOFC).

Para que seja representado a alteração de tensão produzida pela variação de corrente na carga, é necessário parametrizar o voltage changes (r), podendo ser representado "por minuto" ou "por dia". Estas informações devem ser fornecidas pelo acessante, vide Anexo II - Informações a serem disponibilizadas pelo Acessante.


Para determinar se a instalação selecionada excede os limites de distorção harmônica declarados em [5] (default) ou aqueles definidos pelo usuário, grupos de emissão podem ser definidos por meio da caixa de grupo Harmonic Load (Carga Harmônica).

- Low-emission (Emissão baixa): Representa a carga em kVA para o grupo de dispositivos emissores de harmônicas baixas ( $10\% \leq \text{THDi} \leq 25\%$ ). Isso inclui retificadores com um número de pulso maior ou igual a 12, lâmpadas fluorescentes e outras lâmpadas de descarga de gás com reator indutivo.
- Mid/High-emission (Emissão média/alta): Representa a carga em kVA para o grupo de dispositivos emissores de harmônicas médias/altas ( $\text{THDi} > 25\%$ ). Isso inclui retificadores de 6 picos, dimmers trifásicos, estações de solda eletrônicas, motores CA regulados eletronicamente, módulos de redução de luminosidade de lâmpadas, TVs, computadores e periféricos, lâmpadas fluorescentes compactas com reator eletrônico integrado, aparelhos eletrônicos de consumo e até fornos a arco.

Na aba "Constraints" (Restrições), é possível personalizar os valores limite para a análise de variação de tensão, item "Voltage Variation Limits".

- Low voltage (Baixa tensão) ( $r < 0,01/\text{min}$ ): Os limites de variação de baixa tensão para as variações de tensão da carga abaixo de 0,01 vez por minuto. O valor padrão é definido como 6% conforme estabelecido em [5].
- Medium voltage (Média tensão) ( $r < 0,01/\text{min}$ ): Os limites de variação de média tensão para as variações de tensão de carga abaixo de 0,01 vez por minuto. O valor padrão é definido como 3% conforme estabelecido em [5].
- Low voltage (Baixa tensão) ( $r \geq 0,01/\text{min}$ ): Os limites de variação de baixa tensão para as variações da tensão de carga que excedem 0,01 vez por minuto. O valor padrão é definido como 3% conforme estabelecido em [5].
- Medium voltage (Média tensão) ( $r \geq 0,01/\text{min}$ ): Os limites de variação de média tensão para as variações da tensão de carga que excedem 0,01 vez por minuto. O valor padrão é definido como 2% conforme estabelecido em [5].

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUEN	05/05/2022	28 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

Na sequência, é possível personalizar os valores limite para a análise de oscilação (Flicker Constraints).

- Long-term flicker indicator (Indicador de oscilação de longo prazo) (Plt): O indicador de oscilação de longo prazo (Plt) é importante ao determinar a qualidade da tensão. Este parâmetro é definido em [5] como 0,5.
- Short-term flicker indicator (Indicador de oscilação de curto prazo) (Pst): O indicador de oscilação de curto prazo (Pst) é importante para a normalização de um produto. Este parâmetro é definido em [5] como 0,8.
- Limit-emission curve (Curva de emissão limite): Se algum dos indicadores de oscilação foi modificado, as novas curvas são obtidas multiplicando (ponto por ponto) os indicadores de curto e longo prazo de oscilação com a oscilação de referência: (Pst ref = 1,0).

No campo “Harmonic Constraints”, é possível personalizar os valores de restrição para a análise harmônica.

- Evaluation factor – Low Voltage (Fator de Avaliação – Baixa Tensão): Usado para personalizar a curva de contribuição da carga harmônica e a relação matemática entre a relação de potência  $S_{KV}/S_{OS}$  e a contribuição da carga harmônica  $S_{OS}/S_A$  (parâmetro  $b$  na equação abaixo). É definido em [5] como 0,082.

$$\frac{S_{OS}}{S_A} = b \cdot \sqrt{\frac{S_{KV}}{S_A}}$$

Onde:

$S_{OS}$  = carga harmônica.

$S_{KV}$  = potência de curto-circuito.


$S_A$  = potência nominal da instalação.

$b$  = fator de avaliação, segundo norma D-A-CH-CZ (0,082 para baixa tensão e 0,052 para média tensão).

- Evaluation factor – Medium Voltage (Fator de Avaliação – Média Tensão): Usado para personalizar a curva de contribuição da carga harmônica da Figura 2 e a relação matemática entre a relação de potência  $S_{KV}/S_{OS}$  e a contribuição da carga harmônica  $S_{OS}/S_A$  (parâmetro  $b$  na equação anterior). O valor padrão é definido como 0,052, conforme estabelecido em [5].

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUEN	05/05/2022	29 de 41



	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

- Harmonic load contribution curve (Curva de contribuição da carga harmônica): Exibe a curva de contribuição da carga harmônica com as curvas atualizadas. Se algum fator de avaliação foi modificado, as novas curvas são calculadas usando a equação anterior.
- Harmonic load contribution factor (Fator de contribuição da carga harmônica): Consulte o fator na equação abaixo, que calcula a carga harmônica  $S_{OS}$ .

$$S_{OS} = 0,5 \cdot S_{GR2} + S_{GR2}$$

Onde:

$S_{GR1}$  = potência da carga harmônica do campo Low-emission (Emissão baixa).

$S_{GR2}$  = potência da carga harmônica do campo Mid/High-emission (Emissão média/alta).


Por fim, a seção “Medium Voltage/Low Voltage Threshold” (Limite de média tensão/baixa tensão), permite definir o limite entre baixa tensão e média tensão. Por padrão, o nível de tensão igual ou menor que 1kV é considerado baixa tensão e o nível de tensão acima de 1kV é considerado média tensão.

## 2. Módulo “Harmonic Analysis”

O módulo permite ao usuário modelar cargas não lineares e outras fontes de correntes harmônicas, como conversores e fornos a arco, e detectar facilmente as frequências ressonantes devido aos bancos de capacitores, tornando-se possível avaliar com precisão o impacto de cargas não lineares na rede elétrica. Além disso, apresenta uma série de análises, como varredura de frequência, cálculos de distorção de tensão e corrente, classificação de capacitor, análise de dimensionamento de filtro e cálculos do Fator K de transformadores. Entre as abas de parametrização, cita-se:

- Global Settings: Nesta aba é possível definir os critérios da simulação de harmônicos por condutores, cargas, motores, etc.
- Impedance Calculation: Nesta etapa é possível definir a faixa e o passo de simulação da varredura de frequência para as impedâncias do sistema analisado.
- Voltage & Current: Aqui são definidos os pontos de análise e limites de distorção (referenciados pela IEEE 519) para simulação da distorção de tensão e corrente.
- Capacitor Range: Neste item são calculados a classificação do capacitor shunt, de acordo com a referência da norma IEEE 18-2012, gerando relatórios de varredura de frequência e impactos na tensão, corrente e potência reativa.
- Transformer K-Factor: Por fim, esta aba gera um relatório do fator-K do transformador e varredura da frequência, de acordo com referências da norma ANSI/IEEE C57.110.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUEN	05/05/2022	30 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

Na modelagem do forno a arco, o software permite inserir a magnitude de corrente harmônica percentual medida, de acordo com cada ordem harmônica, vide Figura 10. Para isso, basta acessar na barra de tarefas a opção: Equipment > Harmonic > Arc Furnace, e gerar um novo dispositivo para modelagem.

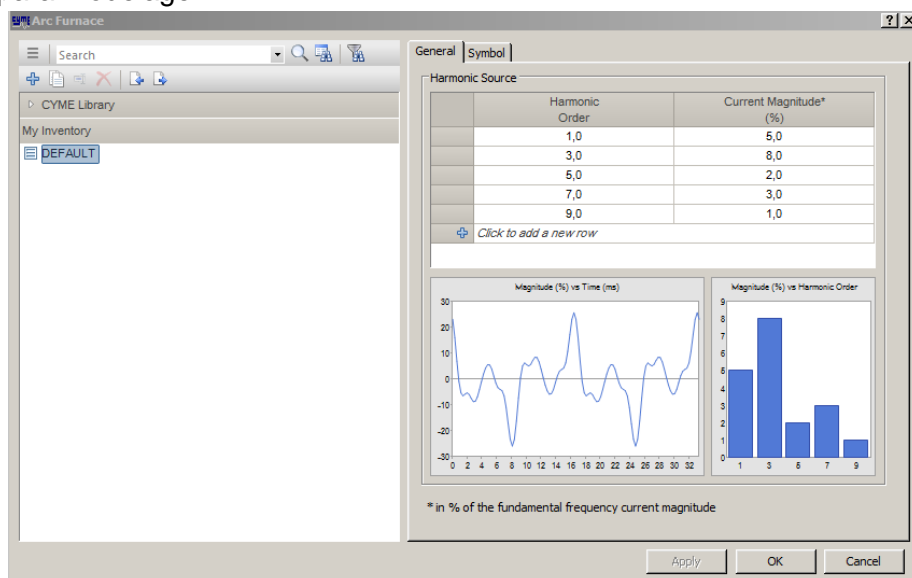

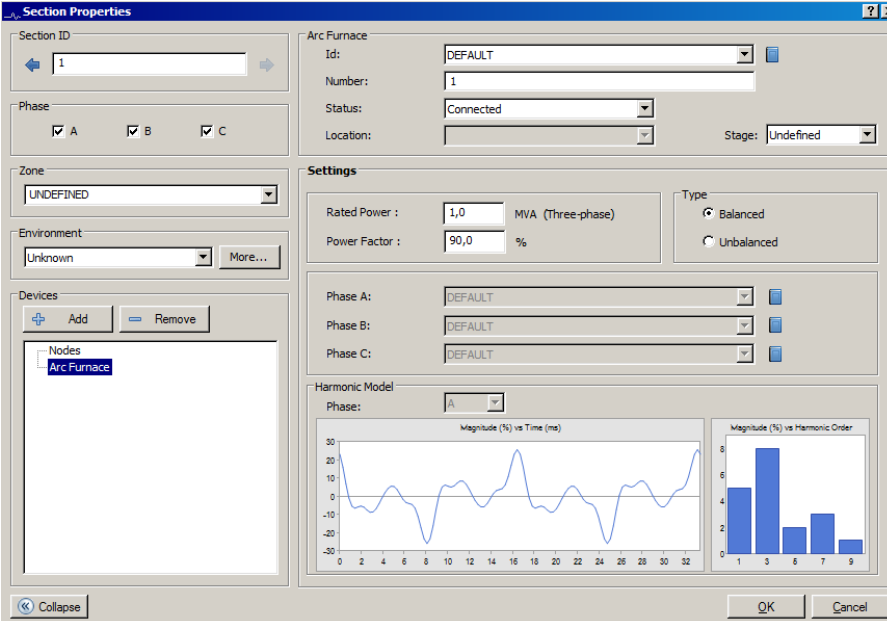


Figura 10. Modelagem do FEA a partir das componentes harmônicas.

Caso o sistema seja desequilibrado, é possível alterar as referências fase a fase, conforme opções apresentadas na Figura 11, assim como, alterar sua potência nominal e fator de potência de operação (necessário avaliar condições para as fases de fusão e refino). Esta configuração é realizada após a conexão do equipamento na rede estudada.

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco



**Section Properties**

Section ID: 1

Phase: ☒ A ☒ B ☒ C

Zone: UNDEFINED

Environment: Unknown

Devices: Add Remove

Nodes: Arc Furnace

Arc Furnace Id: DEFAULT

Number: 1

Status: Connected

Location:

Stage: Undefined

**Settings**

Rated Power: 1,0 MVA (Three-phase)

Power Factor: 90,0 %

Type: ☒ Balanced ☐ Unbalanced

Phase A: DEFAULT

Phase B: DEFAULT

Phase C: DEFAULT

Harmonic Model

Phase: A

Magnitude (%) vs Time (ms)

Magnitude (%) vs Harmonic Order

Figura 11. Propriedades do forno após conexão na rede.

O módulo também permite criar uma fonte de frequência, que pode ser acessada em Equipment > Harmonic > Frequency Source. Esta fonte permite emular uma campanha de medição realizada no ponto de conexão do cliente, ou PAC, a fim de recriar o comportamento real do circuito de análise da pré e/ou pós conexão do forno.

A Figura 12 apresenta os dados que podem ser inseridos neste módulo, sendo possível inserir as medições de corrente ou tensão, com referência à ordem harmônica, magnitude (em valores de tensão, corrente ou % da fundamental) e ângulo de fase, apresentando graficamente o comportamento senoidal apurada em medição.

Neste ponto, é fundamental destacar que durante a criação do módulo recomenda-se que apenas as medições referentes às componentes harmônicas, em amperes, sejam injetadas pela fonte de frequência. Como resultado, a componente fundamental será injetada pela resistência e pela reatância da carga estudada no ponto de conexão do cliente, ou no PAC. Ao executar a simulação deste modo, a matriz de impedâncias do sistema será alterada devido à inclusão da carga com a componente fundamental e, portanto, refletirá com maior precisão a operação real do sistema estudado.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	32 de 41



Tipo de Documento:	Orientação Técnica
Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

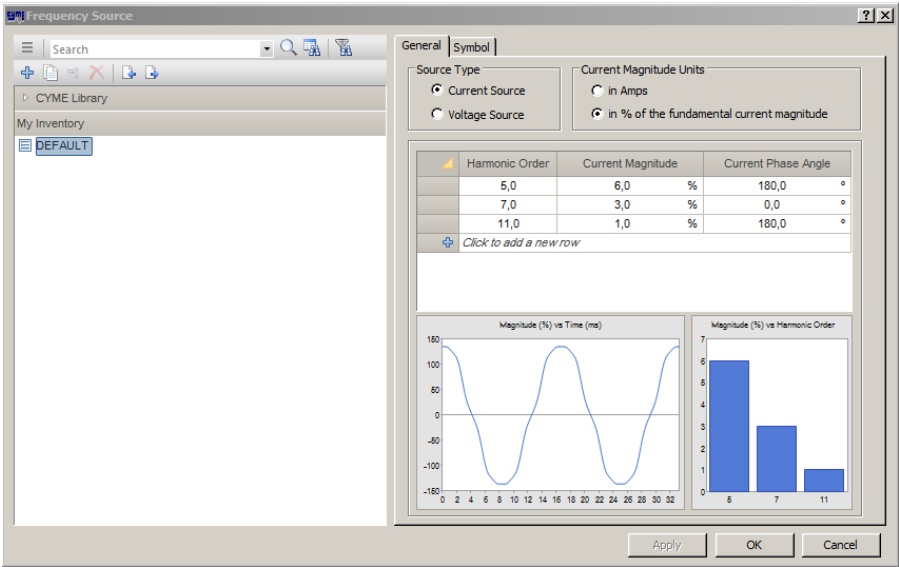



Figura 12. Fonte de frequência harmônica, simulando a medição no PAC.

3. Modelagem e Simulação da Conexão de um Forno Elétrico a Arco

Neste exemplo, foram considerados os seguintes parâmetros para modelagem de um consumidor que iria conectar um forno elétrico a arco em um determinado ponto do sistema elétrico da CPFL. Estes dados estão representados nas tabelas abaixo.

Tabela 7. Informações dos equipamentos utilizados na modelagem.

Equipamento	Informação	Valor
Transformador	Potência (kVA)	1.500
	Tipo da Ligação	Dyn1
	Impedância (%)	10
	Tensão Primária (kV)	11,9
	Tensão Secundária (V)	440
Fonte de Frequência Harmônica - Campanha de Medição - (Magnitude da Tensão)	3ª Ordem (%)	3,50
	5ª Ordem (%)	7,00
	7ª Ordem (%)	4,00
	9ª Ordem (%)	1,00
	11ª Ordem (%)	1,50
Forno Elétrico a Arco (Magnitude da Corrente)	1ª Ordem (%)	10,00
	3ª Ordem (%)	15,00
	5ª Ordem (%)	8,00
	7ª Ordem (%)	5,00
	9ª Ordem (%)	1,00

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

Forno Elétrico a Arco (Dados Técnicos)	Potência do forno (kVA)	1.000
	Fator de Potência (%) em Operação	80
	Fator de severidade ou emissão de oscilação (Kst)	3,0
	Alterações da Tensão (r) (por dia)	180
Carga (Demanda Total da UC)	Demanda (kW)	2.000
	Fator de Potência (%)	90
	Potência Instalada (kVA)	3.000

Tabela 8. Corrente de curto-circuito no PAC e FEA.

Tipo da Falta	Corrente (A) no PAC	Corrente (A) no FEA
Trifásico	1.344	12.862
Bifásico-Terra	1.255	14.527
Bifásico	1.164	11.139
Fase-Terra	845	14.435
Fase-Terra Min.	845	14.435


Primeiramente, podemos realizar uma pré análise do impacto da conexão do forno, utilizando as considerações do item 6.6.1. Sendo assim, temos:

$$P_{st95\%} = K_{st} \cdot \frac{S_{SCf}}{S_{SC}} = 3 \cdot \frac{14435.440 \cdot \sqrt{3}}{845.11900 \cdot \sqrt{3}} = 3 \cdot 0,6316 = \mathbf{1,8948 \text{ pu}}$$

Considerando os limites regulados para esta classe de tensão, avalia-se que a conexão do forno a arco poderá trazer impactos na qualidade da energia aos demais consumidores da região, sendo necessário ações para compensação do problema.

Para verificar os impactos gerados pela carga no PAC com maior detalhamento técnico, é necessário realizar as simulações com os módulos anteriormente citados. Antes disso, será necessário a diversificação da rede analisada, a modelagem dos equipamentos (transformador, pontos de carga, fonte de frequência, entre outros dispositivos necessários) e, por fim, a conexão destes no PAC a ser estudado, conforme exemplo da Figura 13.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	34 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

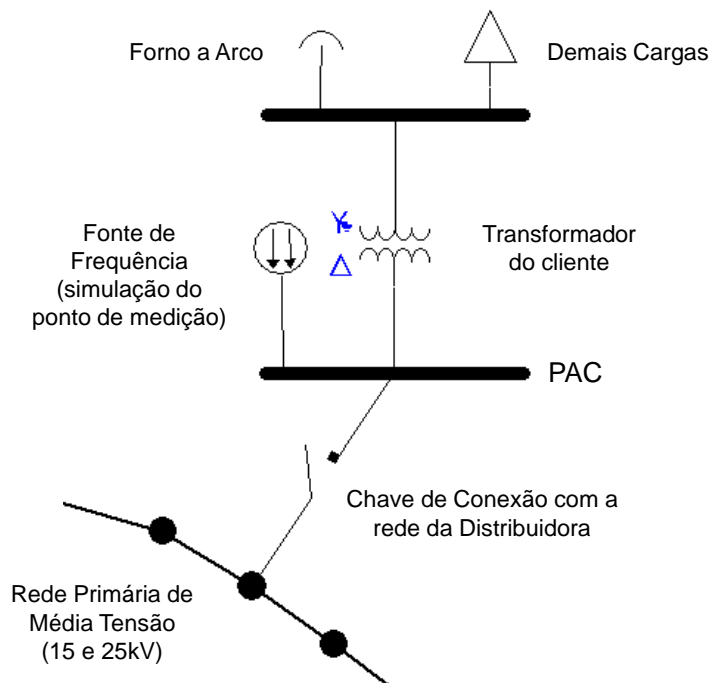


Figura 13. Modelagem da conexão de um forno a arco no CYME.

Com o sistema pronto, utilizando-se o módulo “Harmonic” e parametrizando conforme item 2, é possível gerar as análises gráficas (Figura 14) e os relatórios tabulares (Figura 15), a fim de direcionar a análise realizada.

As análises gráficas permitem avaliar ressonância no sistema, distorção senoidal, magnitude de cada ordem harmônica com a fundamental, etc. A análise tabular apresenta a distorção harmônica no barramento de análise (PAC), tanto para tensão como corrente (IEEE 519). Os valores apurados apresentam indicadores fora das faixas reguladas, sendo necessário a compensação das distorções pelo acessante.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUEN	05/05/2022	35 de 41



**Tipo de Documento:** Orientação Técnica  
**Área de Aplicação:** Engenharia de Normas e Padrões  
**Título do Documento:** Critério para Atendimento a Forno a Arco

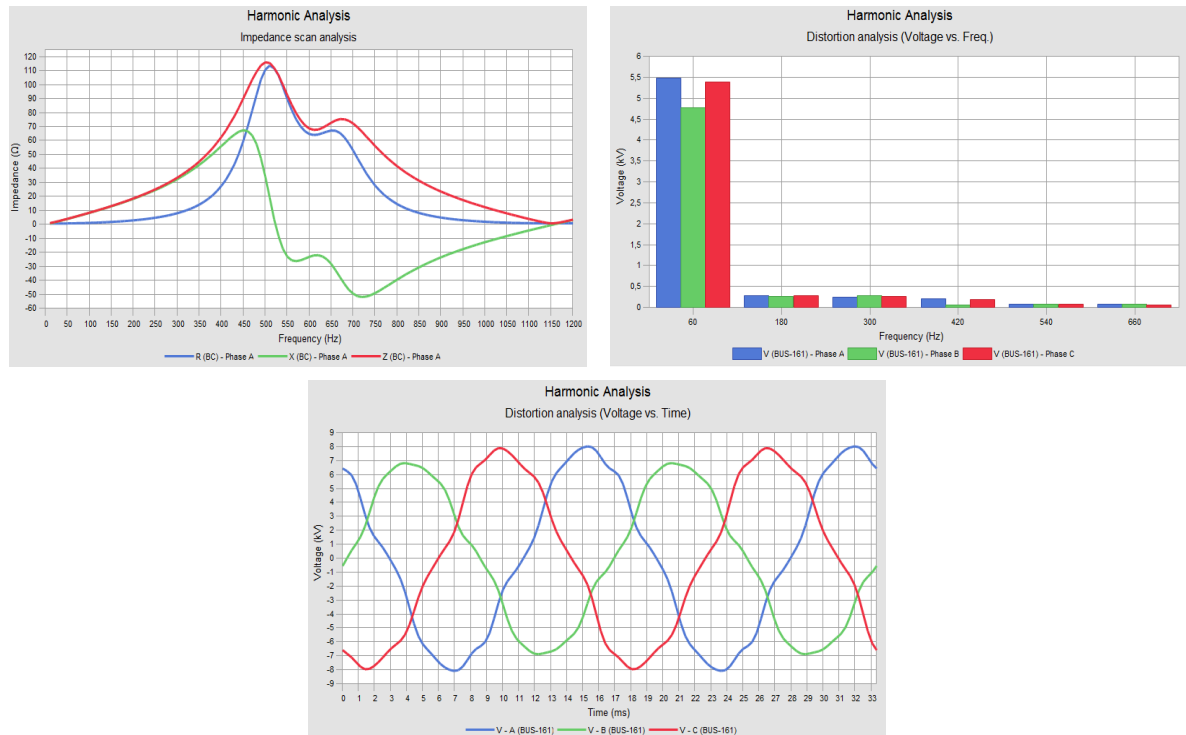


Figura 14. Exemplos de análises gráficas gerados pelo módulo “Harmonic Analysis”.


	Node ID	Freq. (Hz)	Real V (V)	Imag V (V)	Modulus V (V)	Angle (deg)	IHD (%)	THD (%)	KVT (kV)	TIF
1	BUS-161-A	60,00	5638,6130	3373,9211	6570,9436	30,90	0,000	7,216	290,24	44,06
2	BUS-161-A	180,00	-162,9000	195,9000	254,8000	129,74	3,878	7,216	290,24	44,06
3	BUS-161-A	300,00	239,5000	-184,5000	302,4000	-37,60	4,602	7,216	290,24	44,06
4	BUS-161-A	420,00	-152,2000	-171,5000	229,3000	-131,59	3,490	7,216	290,24	44,06
5	BUS-161-A	540,00	-12,2100	-83,4200	84,3100	-98,33	1,283	7,216	290,24	44,06
6	BUS-161-A	660,00	-93,6400	5,3830	93,8000	176,71	1,427	7,216	290,24	44,06
7	BUS-161-B	60,00	-238,0965	-5683,0093	5687,9948	-92,40	0,000	7,361	254,94	44,70
8	BUS-161-B	180,00	-115,9000	184,8000	218,2000	122,11	3,836	7,361	254,94	44,70
9	BUS-161-B	300,00	96,7300	309,6000	324,3000	72,65	5,701	7,361	254,94	44,70
10	BUS-161-B	420,00	51,0300	64,4400	82,2000	51,62	1,445	7,361	254,94	44,70
11	BUS-161-B	540,00	-34,1000	-76,6100	83,8600	-113,99	1,474	7,361	254,94	44,70
12	BUS-161-B	660,00	-43,7900	-82,4400	93,3500	-117,98	1,641	7,361	254,94	44,70
13	BUS-161-C	60,00	-5173,7486	3899,6375	6478,7998	142,99	0,000	8,270	285,52	43,92
14	BUS-161-C	180,00	-73,5100	218,3000	230,3000	108,61	3,555	8,270	285,52	43,92
15	BUS-161-C	300,00	-365,4000	180,6000	407,6000	153,70	6,291	8,270	285,52	43,92
16	BUS-161-C	420,00	-12,3800	-230,0000	230,3000	-93,08	3,555	8,270	285,52	43,92
17	BUS-161-C	540,00	-63,6900	-59,0300	86,8400	-137,18	1,340	8,270	285,52	43,92
18	BUS-161-C	660,00	42,6900	-74,3000	85,6900	-60,12	1,323	8,270	285,52	43,92

Figura 15. Relatório tabular “Harmonic Voltage Report” das distorções harmônicas por fase.

Utilizando o módulo “Network Disturbance Assessment”, parametrizou-se a conexão de uma carga no PAC, simulando a conexão do forno a arco, com alteração da tensão de 180 vezes por dia (r) e carga harmônica nominal do forno.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	36 de 41



	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

Após a execução, um relatório resumido será gerado, onde será apresentado se a instalação deve ser aprovada ou não, para cada um dos três testes (variação de tensão, oscilação e harmônicas) de acordo com [5], e, conseqüentemente, se a conexão é recomendada ou não. Abaixo são apresentados os relatórios gerados para cada tipo de análise do módulo.

Voltage Variation & Flicker	
Voltage Changes (r)	180,0 /day
<b>Voltage Variation</b>	
Limit (dLim)	3,0
Reference (dRef)	6,498
Maximum Voltage Variation (dMax)	13,165
Maximum Voltage Variation (dMax < dLim)	Failed
	Limit-Emission Curve
<b>Flicker</b>	
Short-Time Flicker (Pst)	2,026
Short-Time Flicker - Limit	0,8
Short-Time Flicker < 0,80	Failed
Long-Time Flicker (Plt)	2,026
Long-Time Flicker - Limit	0,5
Long-Time Flicker < 0,50	Failed

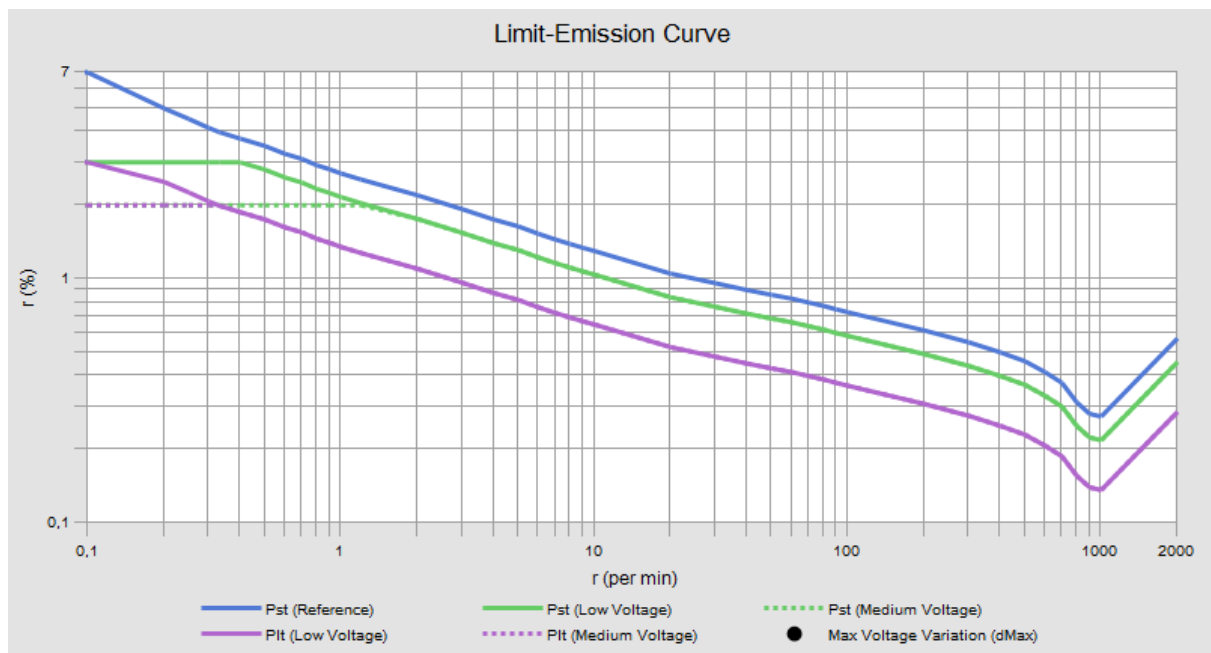



Figura 16. Relatório e gráfico gerado para variação de tensão e flicker.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	37 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

Harmonics	
Nominal Power (Sa)	1666,4 kVA
Short-Circuit Power (Skv)	9390,3 kVA
Power Ratio (Skv / Sa)	5,6
Power Ratio Limit	150,0
Power Ratio > 150,0	Failed (additional test required)
Harmonic Load (Sos)	1000,5 kVA
Harmonic Load Contribution (Sos / Sa)	0,6
Harmonic Load Contribution Limit	0,195
Harmonic load contribution < 0,195	Failed
	<a href="#">Harmonic Load Contribution Curve</a>

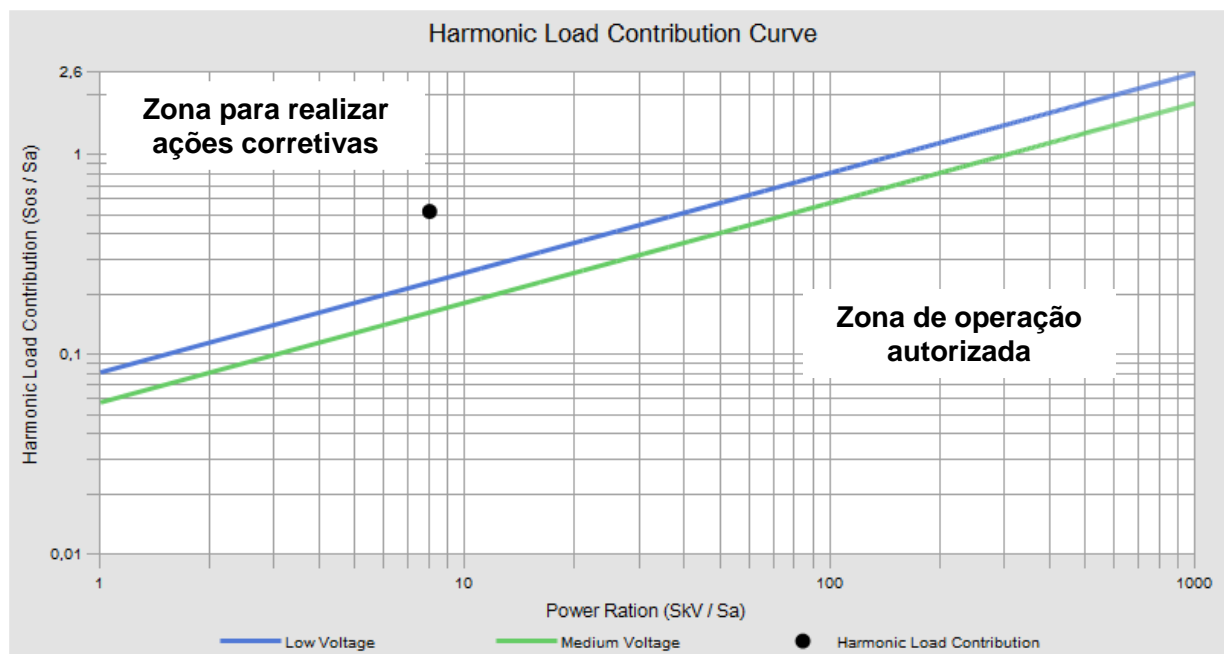



Figura 17. Relatório e gráfico gerado para a curva de contribuição de carga harmônica.

Como podemos notar, os resultados dos relatórios apontam a necessidade de ações mitigatórias, antes da liberação da conexão do forno a arco no sistema elétrico da CPFL. O cliente deverá informar as ações de compensação e encaminhar para nova avaliação e aprovação da CPFL.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	38 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

## Anexo V - Limites de Distorção Harmônica de Corrente

Tabela 9 - Limites de distorção de corrente para sistemas com tensão entre de 120 V a 69 kV.

Máxima distorção harmônica de corrente em porcentagem de IL						
Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares)						
Isc/IL	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20 < 50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50 < 100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100 < 1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
> 1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0

Tabela 10 - Limites de distorção de corrente para sistemas com tensão acima de 69 kV a 161 kV.

Máxima distorção harmônica de corrente em porcentagem de IL						
Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares)						
Isc/IL	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20 < 50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50 < 100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100 < 1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
> 1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0


Tabela 11 - Limites de distorção de corrente para sistemas com tensão > 161 kV.

Máxima distorção harmônica de corrente em porcentagem de IL						
Ordem harmônica individual (harmônicos ímpares)						
Isc/IL	$3 \leq h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h \leq 50$	TDD
< 25	1,0	0,5	0,38	0,15	0,1	1,5
25 < 50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
$\geq 50$	3,0	1,5	1,15	0,45	0,22	3,75

Legendas:


- **IL:** corrente de carga de demanda máxima (componente de frequência fundamental) no ponto de conexão sob condições operacionais de carga normal.
- **Isc:** corrente máxima de curto circuito no ponto de conexão.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	39 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

- **Total demand distortion (TDD) ou Distorção de demanda total (DDT):** A razão da raiz quadrada média do conteúdo harmônico, considerando os componentes harmônicos até a ordem 50 e, especificamente, excluindo interharmônicas, expressa como um percentual da corrente de demanda máxima. Componentes harmônicos de ordem superior a 50 podem ser incluídos quando necessário.

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUEN	05/05/2022	40 de 41

	Tipo de Documento:	Orientação Técnica
	Área de Aplicação:	Engenharia de Normas e Padrões
	Título do Documento:	Critério para Atendimento a Forno a Arco

## 9. REGISTRO DE ALTERAÇÕES

### 9.1 Colaboradores

Empresa	Área	Nome
CPFL Piratininga	REDN	Heliton de Oliveira Vilibor
CPFL Paulista	REDN	Rafael Augusto de Godoy Rosolen

### 9.2 Alterações

Versão Anterior	Data da Versão Anterior	Alterações em relação à Versão Anterior
-	-	<ul style="list-style-type: none"> <li>Emissão inicial do documento.</li> </ul>
1.0	14/07/2000	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adequação ao novo padrão de documentação CPFL e consequente revisão da estrutura e conteúdo técnico do documento.</li> <li>Inserido tópico com as referências de normas internas (CPFL), normas nacionais, normas internacionais e referências bibliográficas de trabalhos acadêmicos consultados.</li> <li>Inserido novo item contendo os limites técnicos dos indicadores de flutuação de tensão e distorção harmônica, de acordo com as resoluções e normas vigentes.</li> <li>Adequação dos critérios de análise e cálculos da pré e pós conexão do FEA, conforme IEC 61000-3-7.</li> <li>Atualização das indicações e propostas de mitigação dos impactos causados pela conexão dos fornos a arco.</li> <li>Adequação dos Anexos, referente aos dados a serem disponibilizados pelo acessante, modelo para coleta das campanhas de medição, exemplo de modelagem e simulação do forno no CYME, além da atribuição dos limites de referência da distorção harmônica de corrente, conforme norma IEEE 519.</li> </ul>
1.1	10/05/2021	<ul style="list-style-type: none"> <li>Adequação da imagem do Anexo I.</li> <li>Inserido observação com intuito do método de simulação do Anexo V. Considerada o método de injeção da harmônica fundamental por parte da carga e, para as demais ordens harmônicas, considerado uma fonte de corrente separada da carga.</li> </ul>

N.Documento:	Categoria:	Versão:	Aprovado por:	Data Publicação:	Página:
161	Instrução	1.2	JOSE CARLOS FINOTO BUENO	05/05/2022	41 de 41