

Cálculo de Potências de Fornos a Arco: Considerações sobre a Recomendação IEEE 1459 -2010 em Sistemas com Flutuação de Tensão e Corrente

Ariadne de Lourdes J. Bertolin, Silvia C. Ferreira, Daniel F. Leite, Paulo Vitor G. de Souza, Vinicius M. Pacheco, Leonardo M. Barbosa.

UFLA-Universidade Federal de Lavras. Av. Doutor Sylvio Menicucci, 1001 - Kennedy, Lavras - MG, 37200-000.
aribertolin@hotmail.com, ferreira.silviac@gmail.com, danfl7@gmail.com.

Resumo —Este artigo considera e analisa a aplicação da recomendação IEEE 1459-2010 em conjunto com a transformada síncrona para determinação de potências em sistemas com flutuação de tensão e corrente. A análise é baseada em uma carga comum na indústria, o forno a arco. Em particular, sua característica não linear causa uma redução da qualidade da energia da rede como flutuações de tensão e corrente, harmônicos, inter-harmônicos e desequilíbrio entre fases. Os resultados obtidos em simulação caracterizam, principalmente, a presença de altas potências relativas aos harmônicos e oscilações nas potências fundamentais, devido a flutuação de potência na carga.

Palavras-chaves —Forno a arco, Qualidade de Energia, IEEE Std. 1459-2010, Referência Síncrona.

I. INTRODUÇÃO

O forno a arco é um componente muito importante nas siderúrgicas, principalmente na reciclagem de metais, e na produção de ligas metálicas de alta qualidade [1]. Porém, ele é responsável por causar à rede elétrica uma série de distúrbios como, as flutuações de tensão (causadoras do efeito flicker), harmônicos e inter-harmônicos [2]-[5]. Devido ao alto nível de potência envolvida e das características não lineares dos fornos a arco, esses distúrbios causam impactos severos na qualidade da energia elétrica (QEE) do sistema em que estão conectados.

Alguns desses distúrbios, tais como as distorções harmônicas e desequilíbrios, influenciam diretamente no cálculo da potência envolvida. Quantificar adequadamente as potências consumidas por fornos a arco não é uma tarefa trivial. Além disso, as definições relacionadas ou formulações matemáticas são inadequadas para tratar o caso de cargas não lineares e altamente variantes no tempo.

Diversas definições de potência para sistemas não lineares são encontradas na literatura [6]. Dentre elas, a recomendação IEEE Std. 1459-2010 apresenta uma abordagem capaz de quantificar os fenômenos físicos que ocorrem no sistema. A recomendação utiliza como base o cálculo de tensões e correntes efetivas e a separação das componentes fundamentais e de sequência positiva das demais componentes [7]. Essa separação, além de permitir análises mais adequadas, pode ser utilizada para determinar as potências totais e fundamentais; e as potências associadas ao desequilíbrio e à distorção harmônica.

As principais técnicas para o cálculo de potências, de acordo com a recomendação IEEE Std. 1459-2010, podem ser

dadas no domínio do tempo [8], [9] ou da frequência [10], [11]. Entretanto, após a revisão da Recomendação no ano de 2010, ressalta-se que a última não é ideal para análises em tempo real ou para diagnóstico de eventos específicos. A recomendação sugere que sejam empregadas apenas técnicas no domínio do tempo nestes casos [7]. Já para sistemas que não possuem flutuações na tensão e/ou corrente, e também não apresentam inter-harmônicos, o cálculo das potências e as análises relacionadas podem ser conduzidos no domínio do tempo ou no domínio da frequência de forma equivalente.

Em sistemas sujeitos a distúrbios, os resultados podem divergir de acordo com o número de amostragens e com o intervalo de tempo escolhido para a transformação tempo-frequência. Além disso, no domínio da frequência, certas informações relativas às variações temporais das potências são perdidas. Essas informações são quantificadas como potência harmônica uma vez que flutuações de tensão e corrente são refletidas no domínio da frequência como inter-harmônicos [12].

Esse trabalho apresenta uma análise no domínio do tempo para um forno a arco modelado de acordo com [13]. Através da utilização do software Matlab/Simulink, simulações de flutuação de tensão e corrente foram consideradas. O cálculo das potências envolvidas, no domínio do tempo, levou em conta a transformada síncrona e filtros de médias móveis. A ideia é preservar a oscilação na frequência fundamental causada por distúrbios. Os resultados têm mostrado que a análise no domínio do tempo, principalmente àquela das componentes fundamentais, auxilia na escolha da melhor estratégia para compensação de distúrbios causados por fornos a arco.

II. A RECOMENDAÇÃO IEEE 1459-2010

O principal conceito utilizado na recomendação IEEE 1459-2010, para o sistema trifásico a três fios, se baseia na separação da componente fundamental das demais [8]. Para tanto, as tensões e as correntes efetivas do sistema são separadas em componentes fundamentais e componentes harmônicas conforme [8]:

$$I_e^2 = \frac{I_e^2}{\frac{1}{3}(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2)} + \frac{I_{eH}^2}{(I_1^+)^2 + (I_1^-)^2 + 4(I_1^0)^2} \quad (1)$$

$$\underbrace{V_e^2}_{\frac{1}{9}(V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2)} = \underbrace{V_{e1}^2}_{(V_1^+)^2 + (V_1^-)^2 + \frac{(V_1^0)^2}{2}} + \underbrace{V_{eH}^2}_{V_e^2 - V_{e1}^2} \quad (2)$$

onde V_e e I_e são a tensão e a corrente efetiva do sistema; V_{e1} e I_{e1} são as componentes fundamentais da tensão e da corrente efetiva; V_{eH} e I_{eH} são as componentes da tensão e da corrente efetiva harmônica. As componentes efetivas são obtidas através das correntes (I_a, I_b, I_c) e tensões de linha (V_{ab}, V_{bc}, V_{ca}) a fim de representar as perdas equivalentes em um sistema trifásico. Já as componentes fundamentais efetivas são calculadas a partir das componentes fundamentais de sequência positiva (I_1^+, V_1^+), negativa (I_1^-, V_1^-) e zero (I_1^0, V_1^0).

A partir de (1) e (2), a potência aparente efetiva ($S_e = 3 V_e I_e$) pode ser calculada como:

$$S_e^2 = \underbrace{(3V_{e1}I_{e1})^2}_{S_{e1}^2} + \underbrace{(3V_{e1}I_{eH})^2}_{D_{e1}} + \underbrace{(3V_{eH}I_{e1})^2}_{D_{eV}} + \underbrace{(3V_{eH}I_{eH})^2}_{S_{eH}^2} \quad (3)$$

onde S_{e1} é a potência aparente efetiva fundamental; D_{e1} é a potência de distorção da corrente; D_{eV} é a potência de distorção da tensão; e S_{eH} é a potência aparente harmônica. A potência aparente efetiva fundamental ($S_{e1}^2 = S_{1U}^2 + S_1^{+2}$) é calculada pela soma quadrática de S_{1U} , que é a potência de desequilíbrio, e S_1^+ , que é a potência aparente fundamental de sequência positiva.

A potência aparente fundamental de sequência positiva (S_1^+) é obtida por:

$$S_1^{+2} = \underbrace{P_1^{+2}}_{P_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \cos \theta^+} + \underbrace{Q_1^{+2}}_{Q_1^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin \theta^+} \quad (4)$$

onde P_1^+ é a potência ativa de sequência positiva; Q_1^+ é potência reativa fundamental de sequência positiva; e θ^+ é o ângulo de defasagem entre a tensão e corrente de sequência positiva.

Os outros três termos da potência aparente efetiva (D_{e1}, D_{eV}, S_{eH}) formam a potência aparente efetiva não-fundamental, S_{eN} , que é dada por:

$$S_{eN}^2 = D_{e1}^2 + D_{eV}^2 + S_{eH}^2 = S_e^2 - S_{e1}^2 \quad (5)$$

A decomposição completa da potência aparente (S_e) é ilustrada na Fig. 1.

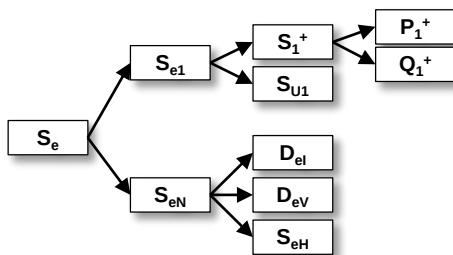


Fig. 1. Decomposição de potências segundo IEEE 1459-2010 [11]

A recomendação IEEE 1459-2010 fornece definições importantes de potência para sistemas não senoidais e

desequilibrados. Entretanto, o seu foco é para medição e quantificação de potências. Os autores da recomendação enfatizam que esta não é ideal para controles em tempo real de compensadores dinâmicos ou para diagnósticos de eventos específicos.

III. A TRANSFORMADA SÍNCRONA

A Transformada Síncrona consiste em uma transformação de coordenadas, onde o sinal é projetado em um sistema de coordenadas que gira com a frequência da rede (sistema de referência síncrono). Desta forma, a componente de frequência fundamental torna-se uma componente contínua, podendo ser mais facilmente filtrada e isolada das demais. Outro aspecto interessante da transformada síncrona é a sua capacidade em separar as componentes de sequência positiva, negativa e zero [6].

Primeiramente, as correntes e tensões do sistema trifásico são transformadas para um sistema de referências estacionário, composto por dois vetores ortogonais ($\alpha\beta$). Essa transformação é conhecida como Transformada de Clarke [10].

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & 1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

onde X representa tensão ou corrente; a, b, c são as fases do sistema e $\alpha, \beta, 0$ são as componentes da Transformada de Clarke. É importante ressaltar que, a componente de sequência zero do sistema (X_0) só existirá para sistemas desequilibrados que possuem o condutor de neutro (sistema trifásico a quatro fios). Após a Transformada de Clarke, uma nova transformação de coordenadas é realizada, criando-se uma referência síncrona rotativa, onde dois vetores ortogonais giram na frequência da rede. Esta transformação é conhecida como Transformada de Park [11]:

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (7)$$

onde X representa tensão ou corrente; d, q são as componentes da Transformada de Park; $\sin(\omega t)$ e $\cos(\omega t)$ são vetores ortogonais fornecidos por um PLL (Phase Locked Loop). O PLL é uma malha de controle que busca fornecer sinais senoidais unitários em sincronismo com a rede elétrica [14]. A transformada para a tensão e corrente é mostrada na Fig. 2.

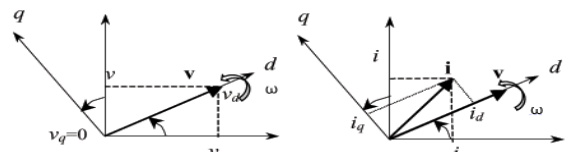


Fig. 2. Eixos d e q sobrepostos aos eixos α e β

IV. ALGORITMO PARA CÁLCULO DAS POTÊNCIAS UTILIZANDO A IEEE 1459-2010

A IEEE 1459-2010 calcula as potências do sistema elétrico separando as componentes fundamentais das demais. Inicialmente, o algoritmo de cálculo, proposto neste trabalho,

separa a componente fundamental de sequência positiva das demais utilizando a Transformada Síncrona e filtros passa-baixa. O diagrama de blocos da Fig. 3 mostra o esquema de aplicação da Transformada Síncrona para obtenção da componente fundamental.

A vantagem em usar a referência síncrona neste caso se dá devido a sua capacidade de 'deslocar' em 60Hz as componentes do sinal. Desta forma, a componente fundamental e de sequência positiva se transforma em um sinal contínuo, que pode ser isolado dos demais através de filtros passa-baixas tradicionais, sem a preocupação com defasagens no sinal.

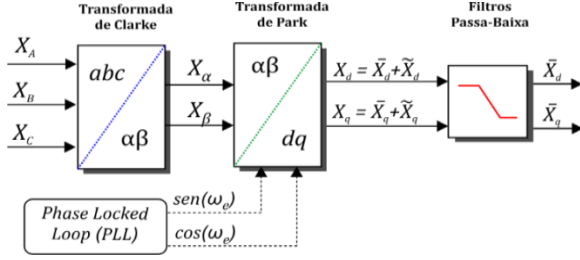


Fig. 3. Diagrama em blocos da Transformada Síncrona para obtenção da componente fundamental [11]

O filtro passa-baixa utilizado na referência síncrona desempenha um papel importante na qualidade do sinal obtido e na capacidade de isolamento harmônica. Neste trabalho, optou-se por utilizar filtros de médias móveis na forma:

$$\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{k=N} X(n-k) \quad (8)$$

onde $\bar{X}$ representa o valor filtrado da tensão ou corrente, N é o número de amostras usadas no somatório, n é a amostra atual e k é um contador. Filtros de média móvel são projetados de forma que suas respostas em frequência filtrem apenas os sinais múltiplos de 60Hz, mantendo as oscilações na frequência fundamental [16].

Após a filtragem, apenas o sinal fundamental de sequência positiva (I_1^+ , V_1^+) é recuperado. Uma vez isolados os valores fundamentais de sequência positiva, o sistema de referência síncrono é ajustado para retirar as componentes de sequência negativa (I_1^- , V_1^-). Para tanto, basta inverter o PLL, para fazer o sistema de coordenadas girar em sequência negativa. Os valores *rms* das componentes fundamentais podem ser obtidos diretamente pelos componentes do eixo *dq* da seguinte maneira:

$$X_{rms} = \sqrt{X_d^2 + X_q^2} \quad (9)$$

onde X_{rms} representa os valores *rms* da tensão e da corrente de sequência positiva (I_1^+ , V_1^+) e negativa (I_1^- , V_1^-). As componentes de sequência zero não são consideradas neste trabalho por se tratar de um sistema a três fios, sem neutro.

De acordo com (1) e (2), os valores fundamentais de sequência positiva e negativa são utilizados para calcular os valores efetivos fundamentais (V_{e1} , I_{e1}). O valor efetivo total (V_e , I_e) é calculado diretamente através dos valores *rms* dos sinais originais de tensão e corrente. Já os valores efetivos harmônicos (V_{eh} , I_{eh}) são dados pela diferença entre os valores efetivos totais e os valores efetivos fundamentais.

A partir destes valores, e baseado nas definições de potência da recomendação IEEE 1459-2010, são calculadas as potências efetivas. As potências ativa e reativa de sequência positiva, por sua vez, podem ser calculadas diretamente com os valores obtidos na referência síncrona da seguinte maneira:

$$P_1^+ = V_d^+ I_d^+ + V_q^+ I_q^+ = 3V_1^+ I_1^+ \cos \theta^+ \quad (10)$$

$$Q_1^+ = V_q^+ I_d^+ - V_d^+ I_q^+ = 3V_1^+ I_1^+ \sin \theta^+ \quad (11)$$

O diagrama de blocos da Fig. 4 sintetiza o algoritmo utilizado para o cálculo de potências de acordo com a recomendação IEEE 1459-2010.

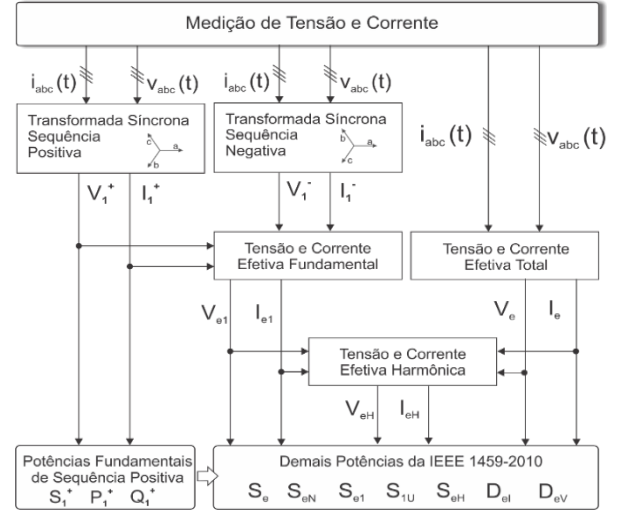


Fig. 4. Diagrama em Blocos do Algoritmo Proposto para Cálculo de Potência de acordo com a IEEE 1459-2010

V. MODELO DO FORNO A ARCO PARA FLUTUAÇÕES DE TENSÃO

Em geral existem duas maneiras de elaboração de modelos para fornos a arco: no domínio da frequência e no domínio do tempo. Na primeira, a representação da corrente e da tensão do arco é baseada nos componentes harmônicos. Nesse caso, a resposta total do sistema é a superposição das respostas obtidas em cada frequência. Na segunda, a representação da corrente e da tensão são baseadas em equações diferenciais, propostas originalmente por Cassy e Mayr [15]. Nesse caso, há uma melhor descrição da não linearidade e das variações no tempo. Entretanto, neste trabalho utiliza-se uma modelagem no domínio do tempo baseada em funções hiperbólicas e senoidais [13].

A característica hiperbólica da tensão e da corrente representa as mudanças rápidas de polaridade da tensão do arco, negligenciando a tensão no tempo de subida. Isto resulta em uma mudança repentina da tensão quando a corrente é zero [13]. A equação do modelo da tensão (V) para cada fase é:

$$V_{Hyp}(i) = \left(V_{at} + \frac{C}{D + |i|} \right) \sinh(i) \quad (12)$$

onde, V_{at} é a tensão limite do arco ao qual a tensão se aproxima com o aumento da corrente, i é a corrente de fase, C é a potência do arco, e D é a corrente do arco.

O efeito do Flicker na tensão é determinada por V_{at} , que acrescenta uma componente senoidal em (12),

proporcionando o comportamento característico do Flicker. A equação de V_{at} é dada por:

$$V_{at}(i) = V_{at0} [1 + m \sin(\omega_f t)] \quad (13)$$

onde V_{at0} é a tensão básica de referência, i.e., quando não há a atividade do arco; m é o índice de modulação; e ω_f é a frequência do Flicker.

VI. RESULTADOS

Para aplicação da referência síncrona no cálculo de potências de um forno a arco de acordo com a IEEE 1459-2010 foi implementada uma simulação utilizando o software Matlab/Simulink. O sistema simulado, mostrado na Fig. 5, representa um forno a arco de 200kVA, conectado por um transformador abaixador 13,8:0,4 kV cuja a potência de curto circuito é de 1MVA.

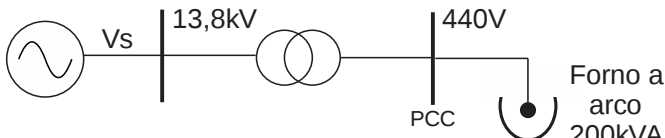


Fig. 5. Diagrama unifilar do forno a arco modelado

Para que o modelo do forno a arco represente o comportamento de um flicker periódico, as simulações foram feitas atribuindo uma variação senoidal ao comprimento do arco. Escolheu-se utilizar uma frequência de 10Hz para a variação do comprimento do arco, por ser uma frequência próxima a de sensibilidade máxima do olho humano (8,8Hz).

O algoritmo de cálculo de potências descrito na sessão IV foi também implementado no software Matlab. O sistema foi amostrado a uma frequência de 40080Hz. O valor eficaz das tensões e das correntes foi calculado por janela deslizante de meio ciclo da componente fundamental, i.e., a cada 334 amostras. Os resultados da simulação do forno a arco e do algoritmo proposto para o cálculo de potências são apresentados a seguir.

A. Simulação do Forno a Arco

Esta seção mostra resultados de simulação do forno a arco. A Fig. 6 ilustra a não linearidade entre a tensão e a corrente do sistema. Neste modelo, a tensão precisa atingir uma amplitude suficientemente alta para dar ignição ao arco e começar a conduzir corrente. Entretanto, a amplitude da corrente e a tensão exata de ignição do arco elétrico dependem basicamente do comprimento do arco que é variável e não linear. Geralmente, esse efeito resulta em uma modulação na corrente do sistema.

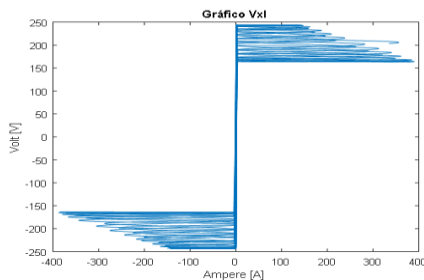


Fig. 6. Tensão versus Corrente do forno a arco

As Fig. 7 e Fig. 8 mostram as tensões e as correntes trifásicas resultantes do modelo implementado. Devido às características do equipamento, pode-se observar uma flutuação da tensão (Fig. 7), resultado da queda de tensão causada pela variação da corrente (Fig. 8).

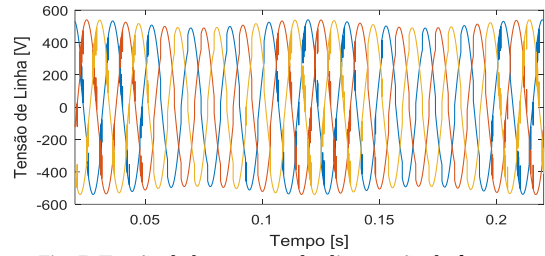


Fig. 7. Tensão do barramento de alimentação do forno a arco

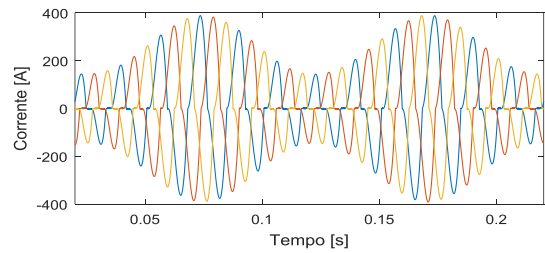


Fig. 8. Corrente do barramento de alimentação do forno a arco

A Fig. 9 mostra o espectro harmônico da tensão e da corrente. A distorção harmônica, consequência da não linearidade do sistema, fica bastante evidente no quinto harmônico (300 Hz). Já os inter-harmônicos são resultado da modulação em amplitude da tensão e da corrente.

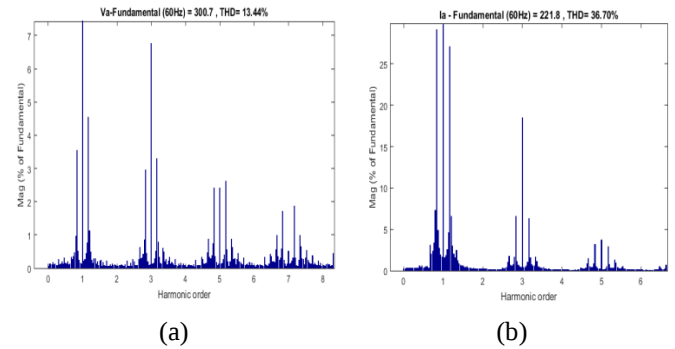


Fig. 9. Espectro harmônico corrente (a) e tensão (b) do forno elétrico a arco

A recomendação IEEE 1459-2010 considera os inter-harmônicos como parte da tensão e corrente efetiva harmônica do sistema. Desta forma, o cálculo da tensão e corrente efetiva fundamental e das potências fundamentais deveriam levar em consideração apenas um valor constante no domínio da frequência da componente de 60Hz.

Por outro lado, os inter-harmônicos de 50 e 70Hz são resultado de uma variação no domínio do tempo da amplitude da corrente e tensão fundamental do sistema. A análise no domínio da frequência para a componente fundamental desconsidera as variações de amplitude da tensão e corrente, perdendo informações importantes que podem ser utilizadas em análises em tempo real.

Levando isso em consideração, o cálculo das potências conforme IEEE 1459-2010 foi efetuado no domínio do tempo. Adicionalmente, as variações de amplitude da frequência fundamental (inter-harmônicos 50 e 70Hz) foram computadas na frequência fundamental.

B. Tensões e Correntes Efetivas do Sistema

As Fig. 10 e 11 mostram os valores da tensão e da corrente efetiva total (V_e , I_e), fundamental (V_{e1} , I_{e1}) e harmônica (V_{eh} , I_{eh}), respectivamente.

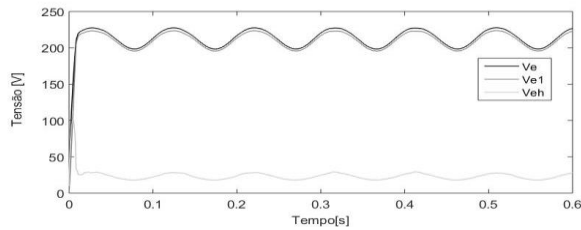


Fig. 10. Tensão Efetiva Total, Fundamental e Harmônica no domínio do tempo

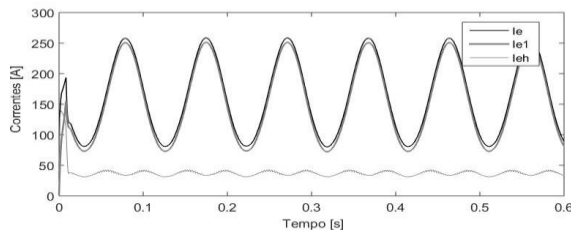


Fig. 11. Corrente Efetiva Total, Fundamental e Harmônica no domínio do tempo

Os inter-harmônicos são resultado da modulação em amplitude da tensão e da corrente. Dessa forma é possível observar nas Figs. 10 e 11 que os valores efetivos totais fundamentais da tensão e da corrente apresentam oscilações devido a essa modulação. Além disso, nota-se a semelhança entre os valores fundamentais e totais; há uma influência menor dos harmônicos na fundamental. A Tabela II, mostra o valor médio das tensões e correntes efetivas totais, fundamentais e harmônicas.

TABELA II. TENSÃO E CORRENTE EFETIVAS DO SISTEMA

	Total	Fund.	Harm.
Tensão Efetiva [V]	213,3	211,8	23,52
Corrente Efetiva [A]	162,6	156,2	37,6

C. Potências de Acordo com a IEEE 1459-2010

As potências efetivas total, fundamental e não fundamental são mostradas na Fig. 12. É possível observar que a potência efetiva total e fundamental apresentam valores muito próximos, uma vez que os inter-harmônicos de maior amplitude são avaliados como uma oscilação da frequência fundamental. Já a Fig. 13 mostra as potências ativa, reativa e aparente de sequência positiva. Essas são as potências mais importantes quando deseja-se mitigar os efeitos da flutuação e/ou regulação de tensão. A potência reativa Q_1^+ é um valor instantâneo que serve de referência para compensadores ativos, tais como: STATCOMs e Filtro Ativos de Potência. Alguns desses condicionadores podem ser utilizados com elementos armazenadores de energia, como baterias, por exemplo, para manter o fluxo de potência ativa do sistema constante, minimizando os efeitos de flutuação de tensão [14]. A forma de onda das potências calculadas em tempo real, mostram informações importantes dos fenômenos físicos que

estão presentes no sistema, uma vez que os inter-harmônicos de 50 e 70Hz dificilmente seriam mitigados com o uso de filtros passivos sintonizados, por exemplo.

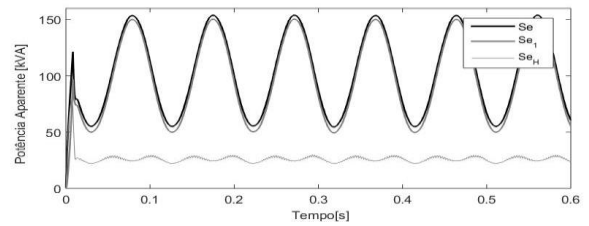


Fig. 12. Potência Aparente Efetiva Total, Fundamental e Não Fundamental

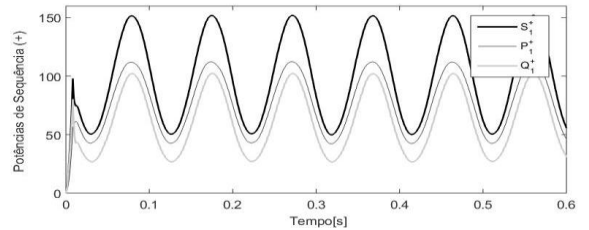


Fig. 13. Potências de Sequência Positiva: Aparente, Ativa e Reativa

Os valores médios das potências apresentadas anteriormente são apresentados na Tabela III. Em termos de avaliação de distúrbios de qualidade da energia, é possível observar que esse sistema possui uma potência relativa a distorção harmônica e também alto consumo de potência reativa, devido as características indutivas e não lineares dos fornos a arco.

TABELA III. POTÊNCIAS DO FORNO A ARCO CALCULADAS PELA IEEE 1459-2010

Potências Aparentes		Potências de Sequência Positiva	
Se	104 kVA	S_1^+	98,2 kVA
Se1	99,2 kVA	P_1^+	76,44 kW
Sen	28,7 kVA	Q_1^+	61,41 kVar

A Fig. 14 mostra as potências relativas à distorção harmônica da tensão e da corrente. Sendo possível observar que existe distorção harmônica tanto na tensão quanto na corrente, devido a presença das três potências D_{e1} , D_{eV} e S_{eH} .

Na Fig. 15 percebe-se que o fator de potência a fundamental de sequência positiva é maior do que para sistema total. Isso porque o fator de potência fundamental de sequência positiva (PF⁺) indica de fato a quantidade de potência reativa que deve ser compensada no sistema. Já o fator de potência total (PF) indica se o sistema possui potências relativas ao desequilíbrio e distorções harmônicas. Desta forma, PF pode ser tratado como um indicador global de distúrbios.

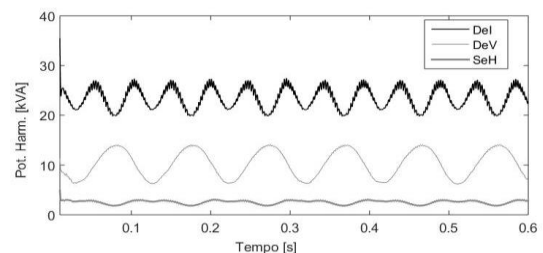


Fig. 14. Potências Harmônicas: Distorção da Tensão, Distorção da Corrente e Aparente Harmônica

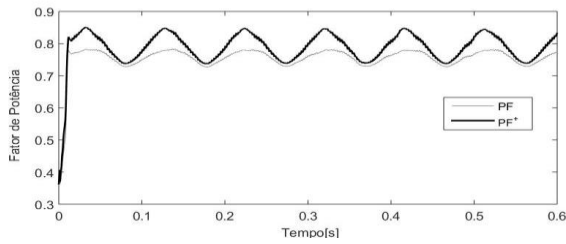


Fig. 15. Fator de Potência Total e Fator de Potência Fundamental Positiva

A Tabela IV mostra os valores médios das potências relativas à distorção (D_{el} , D_{ev} e S_{eH}), potência relativa ao desequilíbrio (S_{1U}) e fatores de potência (FP e FP^+). Pode-se observar que a potência relativa ao desequilíbrio é praticamente igual a zero, e que os fatores de potência do sistema estão muito abaixo dos valores permitidos para os padrões exigidos pelas concessionárias e pela ANEEL (2010) [17], em que o fator de potência deve ser igual ou superior a 0,92. Isso se dá devido às características indutivas do forno, que diminuem sua eficiência energética.

TABELA IV. POTÊNCIAS HARMÔNICAS, DESEQUILÍBRIO E FATOR DE POTÊNCIA

Potências Harmônicas		Potência do Desequilíbrio e FP	
D_{el}	23,5 kVA	S_{1U}	~ 0
D_{ev}	11,2 kVA	PF	0,76
S_{eH}	2,67 kVA	FP^+	0,79

Os cálculos de potência ativa, reativa e aparente (S, P, Q) feitos pela definição clássica são apresentados na Tabela V. A partir desses valores, pode-se observar uma diferença significativa entre a potência reativa (Q) e a potência reativa fundamental de sequência positiva (Q_1^+). Em termos de tarifação e compensação, Q apresenta valores errôneos, uma vez que, incorpora as quantidades relativas aos harmônicos e ao desequilíbrio. Além disso, não é possível quantificar e indentificar os diferentes distúrbios de qualidade de energia.

TABELA V. POTÊNCIAS ATIVA, REATIVA E APARENTE – DEFINIÇÃO CLÁSSICA DE POTÊNCIAS

S	104 kVA	Q	70,13 kVA
P	76,8 kVA	FP	0,74

VII. CONCLUSÃO

Neste trabalho foi desenvolvida uma simulação para o cálculo das potências de um forno a arco utilizando como ferramenta a Transformada Síncrona. Como o forno a arco é uma carga altamente não linear utilizou-se a recomendação IEEE 1459-2010 e abordagem no domínio do tempo para cálculo adequado das potências consumidas.

Analisando os resultados obtidos é possível observar a presença de vários distúrbios da qualidade de energia elétrica, tais como: flutuação de tensão, inter-harmônicos e distorção harmônica. Estes se refletem nas potências calculadas do sistema, como, por exemplo, na potência de distorção (S_{eN}), e no consumo de potência ativa e reativa fundamental variável no tempo (devido à flutuação de tensão). Os fatores de potência, tanto fundamental quanto total, e as taxas de distorção harmônica, confirmam a afirmação anterior.

No processo de obtenção dos sinais fundamentais através da Transformada Síncrona e filtro de médias móveis, obteve-se resultados mais condizentes com os fenômenos físicos reais do que utilizando filtro passa-baixas. O filtro

passa-baixa suprime o inter-harmônico que representa a variação no tempo das potências ativa e reativa. Isto influencia a análise de potências no domínio do tempo.

Se comparada com a definição de potência clássica, os cálculos feitos pela recomendação IEEE 1459-2010 foram capazes de quantificar de forma mais adequada as potências consumidas por um forno a arco. Além disso, o algoritmo proposto pode ser utilizado em compensadores dinâmicos como base para compensação dos distúrbios.

VIII. REFERÊNCIAS

- [1] R. Nadira and P. B. Usoro, "Self-Adjusting Model Algorithmic Control of a Three-Phase Electric Arc Furnace," *1988 American Control Conference*, Atlanta, GA, USA, 1988, pp. 227-232.
- [2] Y. E. Vatankulu; Z. Senturk; O. Salor, "Harmonics and Interharmonics Analysis of Electrical Arc Furnaces Based on Spectral Model Optimization with High Resolution Windowing," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. PP, no.99, pp.1-1,2017.
- [3] E. Uz-Logoglu, O. Salor and M. Ermis, "Online characterization of interharmonics and harmonics of AC electric arc furnaces by multiple synchronous reference frame analysis," *2015 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, Addison, TX, 2015, pp. 1-11.
- [4] D. Clerici, L. Cristaldi, A. Ferrero and M. Prioli, "The impact of electrical disturbances on the casting of an arc furnace," *2012 IEEE International Workshop on Applied Measurements for Power Systems (AMPS) Proceedings*, Aachen, 2012, pp. 1-6.
- [5] L. F. Beites, J. G. Mayordomo, A. Hernandez and R. Asensi, "Harmonics, interharmonics and unbalances of arc furnaces: a new frequency domain approach," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 16, no. 4, pp. 661-668, Oct 2001.
- [6] L. Kukačka, J. Kraus, M. Kolář, P. Dupuis and G. Zissis, "Review of AC power theories under stationary and non-stationary, clean and distorted conditions," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 1, pp. 221-231, 17 2016.
- [7] IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions," in *IEEE Std 1459-2010 (Revision of IEEE Std 1459-2000)*, pp.1-50, Mar 2010.
- [8] S. C. Ferreira; R. B. Gonzatti; C. H. Silva; L. E. B. da Silva; R. R. Pereira; G. Lambert-Torres. "Adaptive Real-time Power Measurement Based on IEEE Standard 1459-2010". *Electric Power Components and Systems*. vol. 43, p. 1307-1317, 2016.
- [9] R. Reginatto, R. A. Ramos, "On electrical power evaluation in dq coordinates under sinusoidal unbalanced conditions," *IET Generat. Transm. Distribut.*, Vol. 8, No. 5, pp. 976–982, May 2014.
- [10] G. A. Mohamed, M. El-Geneidy and N. H. Abbasy, "A WT based high resolution approach to quantify three-phase power components defined in IEEE STD 1459-2010," *2014 IEEE 11th International Multi-Conf. on Systems, Signals & Devices (SSD14)*, Barcelona, 2014, pp. 1-6.
- [11] M. Islam, H. A. Mohammadpour, A. Ghaderi, C. W. Brice and Y. J. Shin, "Time-Frequency-Based Instantaneous Power Components for Transient Disturbances According to IEEE Standard 1459," in *IEEE Trans. on Power Delivery*, vol. 30, no. 3, pp. 1288-1297, June 2015.
- [12] D. Lu, W. Yan, M. Han and J. Liu, "Correlation Study of Voltage Fluctuation and Inter-Harmonics in Distribution Network," *2009 Asia-Pacific Power and Energy Eng. Conf.*, Wuhan, 2009, pp. 1-6.
- [13] M.A.Golkar and S.Meschi, "MATLAB Modeling of Arc Furnace for FlickerStudy" in *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*, Chengdu.
- [14] C. H. da Silva, R. R. Pereira, L. E. B. da Silva, G. Lambert-Torres, B. K. Bose and S. U. Ahn, "A Digital PLL Scheme for Three-Phase System Using Modified Synchronous Reference Frame," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 11, pp. 3814-3821, Nov. 2010.
- [15] S. Golestani and H. Samet, "Generalised Cassie–Mayr electric arc furnace models," in *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 10, no. 13, pp. 3364-3373, 10 6 2016.
- [16] E. Robles, J. Pou, S. Ceballos, J. Zaragoza, J. L. Martin and P. Ibanez, "Frequency-Adaptive Stationary-Reference-Frame Grid Voltage Sequence Detector for Distributed Generation Systems," in *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 58, no. 9, pp. 4275-4287, Sept. 2011.
- [17] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa No 414**: "Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica". Setembro 2010.